



**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN**

Análisis de los Mecanismos de Evaporación y Evaluación de los Recursos Hídricos del Salar de Atacama

INFORME FINAL

REALIZADO POR:

ICASS LTDA

S.I.T. N°357

Santiago, Diciembre 2014

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Comercial Sr. Alberto Undurraga Vicuña

Director General de Aguas
Abogado Sr. Carlos Estévez Valencia

Jefe de División Estudios y Planificación
Ingeniero Civil Sr. Adrián Lillo Zenteno

Inspector Fiscal
Ingeniero Civil Sr. Miguel Caro Hernández

INGENIERÍA Y CONSULTORÍA EN AGUAS LTDA

Wolf von Igel Grisar
Jefe de Proyecto
Hidrogeólogo

Profesionales:

Ingeniero Civil Scarlett Vásquez Paulus
Ingeniero Civil Bernardo Capino Díaz
Ingeniero Civil Gonzalo Jiménez Martínez
Hidrogeólogo Íñigo Irarrázaval
Geólogo Rodrigo Rauld
Geólogo Andrés Fock
Hidrogeólogo Felipe García Huidobro
Geofísico Juan Carlos Parra

Tabla de Contenido General

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	OBJETIVOS	2
3.	LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	3
4.	RECOPIACIÓN Y REVISIÓN DE ANTECEDENTES	5
5.	GEOLOGÍA	15
5.1	TRABAJOS ANTERIORES	15
5.2	UNIDADES MORFOESTRUCTURALES.....	16
5.2.1	Cordillera de Domeyko.....	16
5.2.2	Llano de la Paciencia	17
5.2.3	Cordillera de la Sal	17
5.2.4	Salar de Atacama.....	17
5.2.5	Cordillera Occidental de los Andes	18
5.2.6	Cordón de Lila	19
5.3	GEOLOGÍA EN SUPERFICIE	23
5.3.1	Basamento Mesozoico y Paleozoico.....	23
5.3.2	Formaciones Sedimentarias del Eoceno - Mioceno	26
5.3.3	Volcanes Miocenos - Holocenos	28
5.3.4	Ignimbritas Miocenas – Pleistocenas	29
5.3.5	Formaciones Sedimentarias Mioceno Superior - Pleistocenas	32
5.3.6	Depósitos No Consolidados o Parcialmente Consolidados.....	34
5.4	ESTRUCTURAS	37
5.4.1	Fallas y pliegues de la Cordillera de Domeyko	38
5.4.2	Fallas y pliegues de la Cordillera de la Sal	38
5.4.3	Sistema de Falla del Salar de Atacama.....	38
5.4.4	Sistema de Falla Miscanti	38
5.5	GEOLOGÍA EN SUBSUPERFICIE	41
5.5.1	Información disponible a partir de sondajes.....	41
5.5.2	Información disponible a partir de campañas geofísicas	53
6.	HIDROLOGÍA SUPERFICIAL	58
6.1	CLIMA.....	58
6.2	HIDROGRAFÍA.....	61
6.3	DELIMITACIÓN DE SUBCUENCAS.....	62
6.4	COBERTURA RED HIDROMÉTRICA DGA	65
6.4.1	Información disponible.....	65
6.4.2	Relleno y extensión de estadística	68
6.5	EVAPORACIÓN	73
7.	HIDROGEOLOGÍA.....	78
7.1	SECTOR NORTE	80

7.1.1	Unidades hidrogeológicas	80
7.1.2	Piezometría	81
7.1.3	Sistemas lacustres	83
7.1.4	Parámetros hidráulicos.....	84
7.2	SECTOR ORIENTAL	85
7.2.1	Unidades hidrogeológicas	85
7.2.2	Piezometría	87
7.2.3	Sistemas lacustres	91
7.2.4	Parámetros hidráulicos.....	95
7.2.5	Interpretación de los resultados del levantamiento geofísico.....	96
7.3	SECTOR SUR	97
7.3.1	Unidades hidrogeológicas	97
7.3.2	Piezometría	98
7.3.3	Sistemas lacustres	101
7.3.4	Parámetros hidráulicos.....	102
7.4	NÚCLEO	103
7.4.1	Unidades hidrogeológicas	103
7.4.2	Piezometría	103
7.4.3	Parámetros hidráulicos.....	105
8.	HIDROQUÍMICA	108
8.1	FUENTES DE INFORMACIÓN	108
8.2	PARÁMETROS	111
8.2.1	Concentración de cloruro.....	111
8.2.2	Relación Li/Cl.....	111
8.3	DIAGRAMAS DE SCHÖELLER	117
8.4	DIAGRAMA DE PIPER.....	121
8.5	IDENTIFICACIÓN DE ZONA DE INTERFAZ CUÑA SALINA	122
9.	EVALUACIÓN RECURSOS HÍDRICOS.....	127
9.1	ANÁLISIS DE RECARGA	127
9.2	ANÁLISIS DE LA DESCARGA	132
9.2.1	Evaporación desde el salar	132
9.2.2	Extracciones	141
9.3	VARIACIÓN VOLUMEN EMBALSADO	143
9.4	MODELO CONCEPTUAL	144
10.	MECANISMOS DE EVAPORACIÓN DESDE EL SALAR	147
10.1	EVAPORACIÓN DESDE EL AGUA SUBTERRÁNEA.....	147
10.2	EVAPORACIÓN CUERPOS SUPERFICIALES	149
10.3	EVAPOTRANSPIRACIÓN VEGAS, BOFEDALES Y ÁREAS CULTIVADAS	152
10.4	DISEÑO DE RED DE MONITOREO.....	152
10.4.1	Lisímetro.....	152
10.4.2	Pluviómetro.....	155
10.4.3	Sensor de temperatura	156

10.4.4	Piezómetro	156
10.5	UBICACIÓN DE ESTACIONES DE MONITOREO.....	157
10.5.1	Zonación superficial.....	158
10.5.2	Nivel freático	159
10.5.3	Otros criterios.....	159
10.5.4	Ubicación estación de monitoreo	159
11.	ACTIVIDADES DE TERRENO	165
11.1	INSTALACIÓN DE INSTRUMENTOS	165
11.1.1	Lisímetros	165
11.1.2	Piezómetros	170
11.2	CAMPAÑA DE GEOFÍSICA	173
11.3	CATASTRO POZOS Y SIG.....	177
11.4	CONCLUSIONES	181
11.4.1	Mantenimiento estaciones de monitoreo	181
11.4.2	Consideraciones para proyectos futuros	182
11.4.3	Trabajo con comunidades.....	184
12.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	185
13.	REFERENCIAS	190
	ANEXO 1: FICHAS REVISIÓN DE ANTECEDENTES.....	201
	ANEXO 2: BASE DE DATOS ESTRATIGRAFÍA.....	227
	ANEXO 3: INFORME TRABAJOS GEOFÍSICOS	229
	ANEXO 4: BASE DATOS HIDROQUÍMICA	231
	ANEXO 5: INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE EVAPORACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA.....	233
	ANEXO 6: PROTOCOLO DE INSTALACIÓN ESTACIONES DE MONITOREO	241
	ANEXO 7: RECONOCIMIENTO ACCESOS PUNTOS DE INTERÉS.....	255
	ANEXO 8: FICHAS ESTACIONES DE MONITOREO.....	259
	ANEXO 9: FICHA PIEZÓMETROS ADICIONALES.....	297
	ANEXO 10: SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)	313

Índice de figuras

FIGURA 3-1	UBICACIÓN SALAR DE ATACAMA.....	3
FIGURA 3-2	PUEBLOS ORIGINARIOS	4
FIGURA 5-1	PRINCIPALES MORFOESTRUCTURAS Y UNIDADES GEOLÓGICAS DE LA CUENCA DEL SALAR DE ATACAMA.....	21

FIGURA 5-2 SECCIONES GEOLÓGICAS OESTE-ESTE PRESENTADAS POR ARRIAGADA, ET AL., (2006). SE PRESENTA UBICACIÓN DE LAS SECCIONES EN FIGURA 5-1. FUENTE: ARRIAGADA, ET AL. (2006)	40
FIGURA 5-3 UBICACIÓN DE SONDAJES CON ESTRATIGRAFÍA Y UBICACIÓN DE PERFILES GEOLÓGICOS....	43
FIGURA 5-4 PERFIL W-E EN ELABORADO POR FOCK 2011. FUENTE: FOCK (2011).	45
FIGURA 5-5 SECCIÓN GEOLÓGICA N-S ELABORADA POR DÍAZ DEL RÍO, ET AL. (1972)	46
FIGURA 5-6 SECCIÓN GEOLÓGICA N-S ELABORADA POR DÍAZ DEL RÍO, ET AL. (1972). CONTINUACIÓN.	47
FIGURA 5-7 PERFIL W-E EN EL NORTE DEL SALAR ELABORADO POR EDRA (1997)	48
FIGURA 5-8 PERFIL GEOLÓGICO N-S.....	49
FIGURA 5-9 PERFIL GEOLÓGICO WE1	50
FIGURA 5-10 PERFIL GEOLÓGICO WE2	51
FIGURA 5-11 PERFIL GEOLÓGICO WE3	52
FIGURA 5-12 PERFIL DE REFRACCIÓN SÍSMICO 1G022. FUENTE: ARRIAGADA ET AL. (2006).....	53
FIGURA 5-13 TRAZADO EN SUPERFICIE DE LOS PERFILES TEM REALIZADOS EN EL SALAR.....	55
FIGURA 5-14 TRAZADO EN SUPERFICIE DE LOS PERFILES TEM Y MT REALIZADOS EN EL BORDE ESTE SALAR	57
FIGURA 6-1: PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES CUENCA DEL SALAR DE ATACAMA.	59
FIGURA 6-2: CLIMA DE LAS REGIONES XV, I, II Y III DE CHILE. FUENTE DGA/DICTUC 2008.	60
FIGURA 6-3: TEMPERATURAS MEDIAS MENSUALES EN PEINE.	61
FIGURA 6-4: HIDROGRAFÍA CUENCA DEL SALAR DE ATACAMA.	62
FIGURA 6-5: SUBCUENCAS CUENCA DEL SALAR DE ATACAMA. FUENTE: DGA/GCF 2010.	64
FIGURA 6-6: RED HIDROMÉTRICA DE LA DGA.	66
FIGURA 6-7: DATOS DISPONIBLES DE CAUDALES MENSUALES.	67
FIGURA 6-8: DATOS DISPONIBLES DE PRECIPITACIONES MENSUALES.....	68
FIGURA 6-9: RELACIÓN PRECIPITACIÓN ANUAL V/S ALTURA. FUENTE DGA/DICTUC 2008.	70
FIGURA 6-10: RELACIÓN COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL ENTRE 2 ESTACIONES V/S LA DISTANCIA ENTRE ELLAS. FUENTE DGA/DICTUC 2008.	70
FIGURA 6-11: SERIE DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS RÍO SAN PEDRO EN CUCHABRACHI.	72
FIGURA 6-12: ISOLÍNEAS DE EVAPORACIÓN. FUENTE: BALANCE HÍDRICO NACIONAL, 1987.....	75
FIGURA 6-13: GRADIENTE EVAPORACIÓN MEDIA ANUAL REGIONES DE LA XV A LA III. FUENTE: DGA/DICTUC 2008.....	76
FIGURA 7-1 ZONAS SALAR	79
FIGURA 7-2 UBICACIÓN POZOS PSAH SQM ZONA NORTE.	82
FIGURA 7-3 NIVEL PIEZÓMETRO L11-1 (PSAH SQM 2012)	83
FIGURA 7-4 NIVEL PIEZÓMETRO L11-2 (PSAH SQM 2014)	83

FIGURA 7-5 LAGUNAS SECTOR NORTE (CIREN, 2011)	84
FIGURA 7-6 PERFIL HIDROGEOLÓGICO DEL BORDE ORIENTAL DEL SALAR DE ATACAMA.....	86
FIGURA 7-7 PIEZOMETRÍA BORDE ORIENTAL (SALAS ET AL., 2010)	88
FIGURA 7-8 UBICACIÓN POZOS MARGEN ORIENTAL.....	89
FIGURA 7-9 POZOS ALLANA Y L11-1 (PSAH SQM 2012).....	90
FIGURA 7-10 POZOS L1-4 Y 1027 (PSAH SQM 2013).....	90
FIGURA 7-11 SISTEMA SONCOR (SALAS ET AL., 2010)	92
FIGURA 7-12 REGLILLA L1-G4 Y POZO L2-23	93
FIGURA 7-13 PIEZOMETRÍA AGUAS DE QUELANA (MODIFICADO DE FOCK, 2009).....	94
FIGURA 7-14 POZOS L5-2 Y L5-9	95
FIGURA 7-15 REGLILLA L4-10.....	95
FIGURA 7-16 DIAGRAMA HIDROGEOLOGÍA SECTOR SUR (MODIFICADO DE EIA RWL)	98
FIGURA 7-17 PIEZOMETRÍA 2012 SECTOR SUR (ANEXO 3 DE EIA DE RWL)	99
FIGURA 7-18 POZOS L10-4 Y L12-3 Y REGLILLA SALADITA	100
FIGURA 7-19 POZO L10-4 Y L12-3	100
FIGURA 7-20 REGLILLA SALADITA	101
FIGURA 7-21 SUPERFICIE LAGUNAS SECTOR SUR (PAT MEL 2013).	102
FIGURA 7-22 UBICACIÓN POZOS NÚCLEO.....	105
FIGURA 7-23 POZOS E-101 Y SOPM-05.....	105
FIGURA 7-24 TRANSMISIVIDAD (IZQUIERDA) Y POROSIDAD (DERECHA) NÚCLEO (SQM/MEL/CMZ/SCL, 2003).....	107
FIGURA 8-1: UBICACIÓN Y FUENTE DE LAS MUESTRAS UTILIZADAS EN ESTE TRABAJO.	109
FIGURA 8-2 CONCENTRACIÓN DE CLORURO (EN MG/L) DE LAS MUESTRAS	113
FIGURA 8-3 RELACIÓN LI/CL DE LAS MUESTRAS.....	115
FIGURA 8-4 DIAGRAMA DE SCHÖELLER CON LAS MUESTRAS DEL RÍO SAN PEDRO.....	117
FIGURA 8-5 DIAGRAMA DE SCHÖELLER CON LAS MUESTRAS DEL RÍO VILAMA.....	118
FIGURA 8-6 DIAGRAMA DE SCHÖELLER CON LAS MUESTRAS DE LA PARTE NORTE DEL SALAR DE ATACAMA	119
FIGURA 8-7 DIAGRAMA DE SCHÖELLER CON LAS MUESTRAS DEL NÚCLEO DEL SALAR DE ATACAMA.....	119
FIGURA 8-8 DIAGRAMA DE SCHÖELLER CON LAS MUESTRAS DEL BORDE ESTE DEL SALAR DE ATACAMA	120
FIGURA 8-9 DIAGRAMA DE SCHÖELLER CON LAS MUESTRAS DEL SECTOR SURESTE DEL SALAR DE ATACAMA.....	121
FIGURA 8-10 DIAGRAMA DE PIPER CON TODAS LAS MUESTRAS ANALIZADAS.	122
FIGURA 8-11 CUÑA SALINA (CORFO, 1977).	123

FIGURA 8-12 CUÑA SALINA.....	125
FIGURA 9-2: DELIMITACIÓN DE SUBCUENCAS MINUTA 60, 1998.	129
FIGURA 9-3 UBICACIÓN LISÍMETROS MARDONES 1986 E HYDROTECNICA 1988 EN KAMPF, 2002..	134
FIGURA 9-4 CURVA EVAPORACIÓN V/S PROFUNDIDAD DGA, 1986.....	136
FIGURA 9-5 ZONACIÓN SUPERFICIE KAMPF, 2006.....	138
FIGURA 9-6 CURVAS EVAPORACIÓN MUÑOZ ET AL., 2004.....	139
FIGURA 9-7 ZONAS EVAPORACIÓN DICTUC 2004 (NO ESTÁN A LA MISMA ESCALA).....	140
FIGURA 9-8 DERECHOS OTORGADOS. MODIFICADO DE DGA/CGF, 2010. LAS EXTRACCIONES EN EL NÚCLEO DE RWL Y SQM SE SEÑALAN CON UNA X Y CORRESPONDEN EXTRACCIONES MINERAS.....	142
FIGURA 9-9 EXTRACCIONES DE SALMUERA EN EL NÚCLEO DEL SALAR.....	143
FIGURA 9-1: MODELO CONCEPTUAL (MODIFICADO DE DICTUC, 2004).....	145
FIGURA 10-1 EVAPORACIÓN V/S PROFUNDIDAD. MODIFICADO DE KAMPF, 2002.....	148
FIGURA 10-2 EVAPORACIÓN ESTACIÓN SCL (2002-2012).....	151
FIGURA 10-3 IDE, 1978 EN DICTUC, 2004.....	151
FIGURA 10-4: DISEÑO LISÍMETRO.....	154
FIGURA 10-5 FOTOGRAFÍA LISÍMETRO.....	155
FIGURA 10-6 PLUVIÓMETRO.....	155
FIGURA 10-7 SOLAR RADIATION SHIELD.....	156
FIGURA 10-8 CONSTRUCCIÓN PIEZÓMETRO.....	157
FIGURA 10-9 UBICACIÓN ESTACIONES DE MONITOREO.....	163
FIGURA 11-1: MEDIDAS ESTANQUE.....	167
FIGURA 11-2 DIMENSIONES CARACTERÍSTICAS PIEZÓMETRO.....	170
FIGURA 11-3 UBICACIÓN ESTACIONES TEM.....	175
FIGURA 11-4 CATASTRO POZOS.....	179

Índice de tablas

TABLA 6-1: ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS REGIÓN DE ANTOFAGASTA.....	66
TABLA 6-2 ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS REGIÓN ANTOFAGASTA.....	67
TABLA 6-3: CAUDALES MEDIOS.....	73
TABLA 7-1: PARÁMETROS HIDRÁULICOS (DALANNAIS 1979).....	96
TABLA 7-2 PARÁMETROS HIDRÁULICOS SECTOR SUR (SQM/MEL/CMZ/SCL, 2003).....	103
TABLA 9-1 RESULTADOS ESTUDIO MARDONES 1986.....	133
TABLA 9-2 RESULTADOS KAMPF 2002.....	137

TABLA 9-3 COMPARACIÓN RESULTADOS KAMPF 2002	137
TABLA 9-4 EVAPORACIÓN SALAR DE ATACAMA KAMPF 2002.....	137
TABLA 9-14 BALANCE HÍDRICO ESTUDIOS SALAR DE ATACAMA.....	146
TABLA 10-1 UBICACIÓN ESTACIÓN DE MONITOREO (WGS84 / UTM ZONA 19S).....	160
TABLA 10-2 UBICACIÓN PIEZÓMETROS PROPUESTOS.....	161
TABLA 10-3: UBICACIÓN DEFINITIVA DE PIEZÓMETROS ADICIONALES.....	162
TABLA 11-1 CAMPAÑAS DE TERRENO	165
TABLA 11-2 LISÍMETRO ESTACIÓN DE MONITOREO 1.....	169
TABLA 11-3 PIEZÓMETRO DGA-15	172
TABLA 11-5 UBICACIÓN ESTACIONES TEM.....	174
TABLA 11-6 SIG	177
TABLA 12-1 RESUMEN RECOMENDACIONES.....	188

1. Introducción

La cuenca del Salar de Atacama corresponde a una cuenca endorreica, donde el Salar se ubica en la parte más baja de esta. Desde el punto hidrológico, el acuífero del Salar constituye una fuente importante de agua para el abastecimiento de los diferentes pueblos del sector. Desde el punto de vista minero, la salmuera que se encuentra en el acuífero ubicado bajo la costra del Salar es una valiosa fuente de recursos minerales como el litio, potasio, nitratos y otros, los cuales han sido explotados por diversas empresas mineras a lo largo del tiempo. Finalmente, desde el punto de vista ambiental, en el Salar de Atacama ocurre que el agua subterránea aflora en algunos sectores generando lagunas, lo cual resulta fundamental para sostener la gran biodiversidad que incluye variadas especies vegetales, aves migratorias, mamíferos y reptiles.

Dado lo anterior resulta fundamental contar con herramientas que permitan estimar la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo para fomentar tanto las actividades productivas como de consumo humano, sin generar un perjuicio tanto en la flora como en la fauna del Salar.

Al ser la cuenca del Salar de Atacama del tipo endorreica, en régimen natural la única descarga de agua subterránea corresponde a la evapotranspiración. Por lo tanto el acercamiento que se ha utilizado hasta ahora en la mayoría de los trabajos que han estudiado los recursos hídricos del Salar se basan en este parámetro para estimar la recarga de agua subterránea que llega al acuífero. Dentro de este contexto el trabajo más importante de estimación de evaporación corresponde al realizado por Mardones en 1986 en el cual se estimaron las tasas de evaporación a través de lisímetros.

Este trabajo tiene como principal objetivo aportar al conocimiento sobre la evaporación que se produce en el Salar de Atacama.

2. Objetivos

El objetivo general de este estudio es desarrollar y aplicar una metodología que permita estimar la evaporación proveniente del agua subterránea en el Salar de Atacama. Se busca mejorar las estimaciones de evaporación realizadas a la fecha y proporcionar un monitoreo continuo en el tiempo de la evaporación desde el agua subterránea, con el fin de mejorar el conocimiento de los recursos hídricos de la cuenca.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Recopilación y revisión de antecedentes
- Levantamiento de información hidrológica e hidrogeológica
- Instalación de estaciones de monitoreo que cuentan con lisímetro, pluviómetro, sensor de temperatura y piezómetro) e instalación de red complementaria de piezómetros
- Desarrollo de un modelo conceptual y balance hídrico del sistema

Se recopilará y analizará la información disponible del salar de Atacama, la que será complementada con observaciones en terreno. Existe una gran cantidad de información de las compañías mineras que extraen salmuera en el núcleo del salar, como niveles de agua subterránea, características del acuífero y signatura hidroquímica del agua, sin embargo esta información es en su mayoría confidencial y por lo tanto no se puede contar con su totalidad. Considerando esto, para este estudio se solicitó la colaboración de distintas compañías mineras con presencia en el Salar de Atacama, las han facilitado la información perteneciente a los planes de seguimiento ambiental, que es de carácter público, pero que aún no están disponibles en sus versiones más recientes.

3. Localización de la zona de estudio

La cuenca del salar de Atacama se ubica en la Región de Antofagasta, aproximadamente a 150 kilómetros al sureste de la ciudad de Calama, entre los 22°57' y 23°47' latitud sur. La cuenca corresponde a una cuenca endorreica donde el Salar de Atacama se ubica en la parte más baja de la cuenca homónima, tiene forma elipsoidal con un eje mayor de 85 km y una anchura máxima de 50 km. La parte central se encuentra a 2300 m.s.n.m. (Muñoz et al., 2004)

En las cercanías del Salar de Atacama se encuentran los poblados de San Pedro de Atacama en el norte y Toconao y Peine en el margen este. En la Figura 3-1 se destaca la ubicación del Salar de Atacama y su cuenca en color azul.

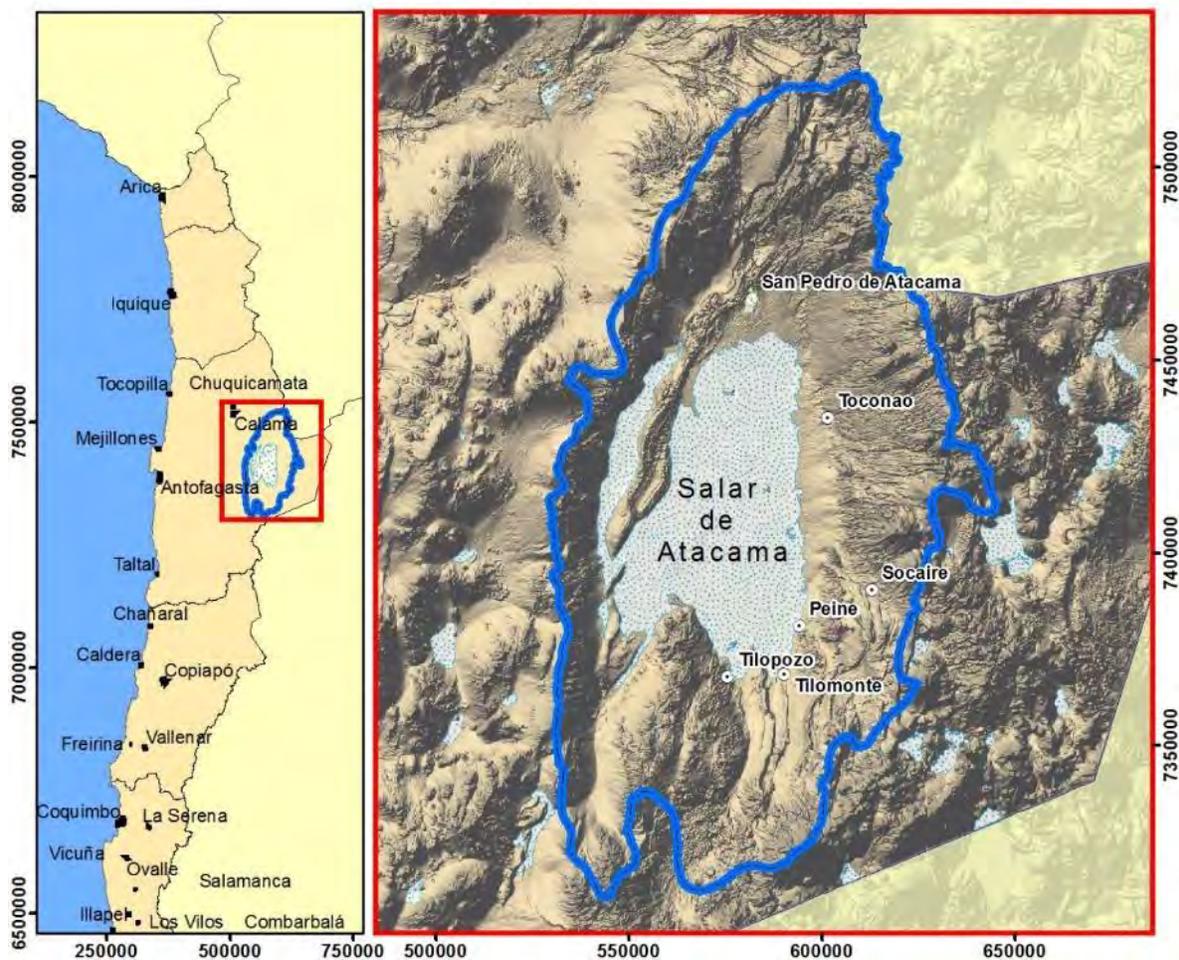


Figura 3-1 Ubicación Salar de Atacama

Cabe destacar que en toda la comuna de San Pedro de Atacama existe una fuerte presencia de pueblos originarios, entre los cuales se encuentran 8 comunidades con terrenos en el sector del Salar de Atacama. Además, existen reservas naturales del Servicio Nacional Áreas Silvestres (CONAF) y sitios Ramsar. La ubicación de estos y de los accesos principales se presenta en la Figura 3-2.

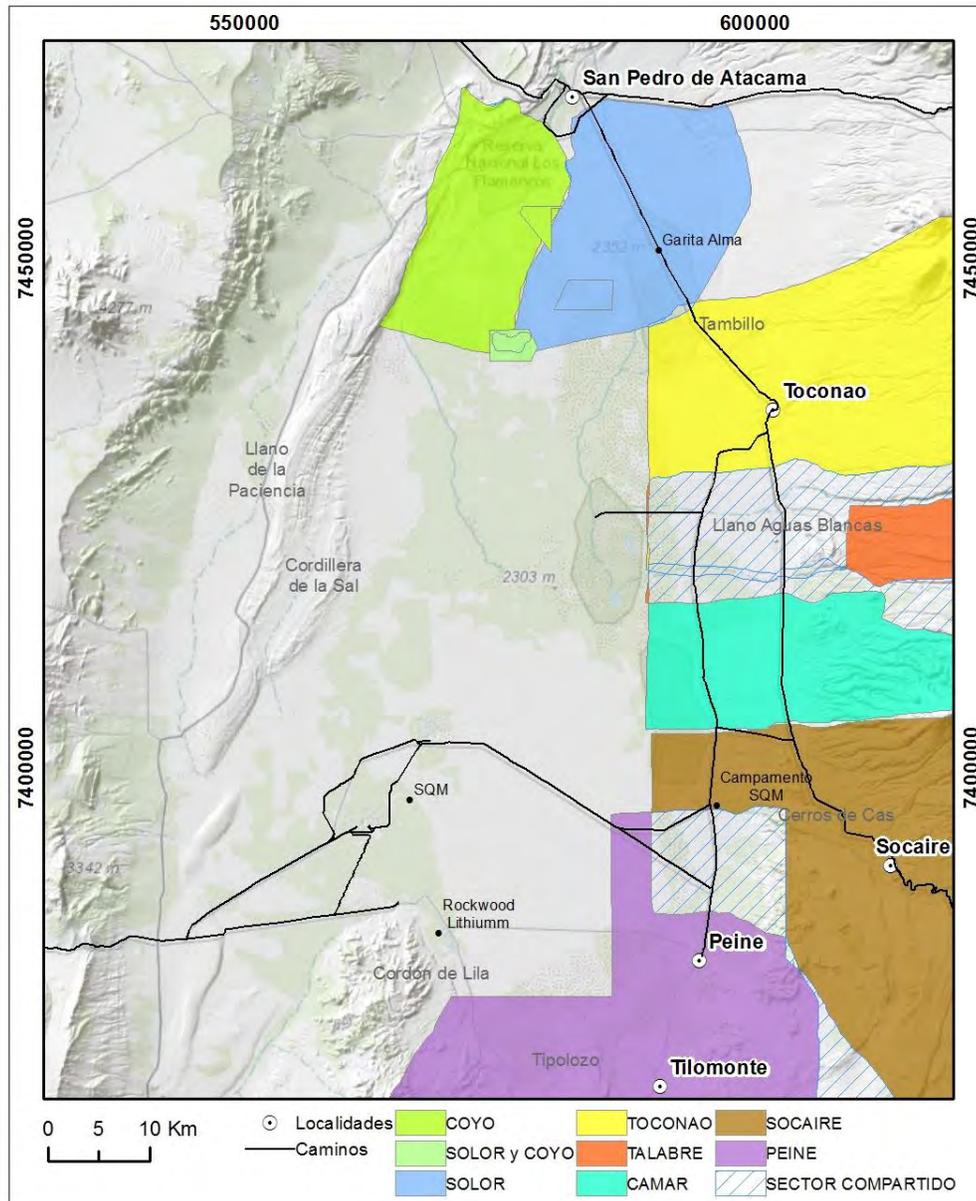


Figura 3-2 Pueblos originarios

4. Recopilación y revisión de antecedentes

La recopilación de antecedentes incluyó tanto antecedentes publicados en revistas científicas, antecedentes correspondientes a evaluaciones de impacto ambiental publicados en el catálogo bibliográfico de la Dirección General de Aguas, así como antecedentes solicitados a las empresas mineras del área. Por otro lado se solicitó, por medio de la DGA, a compañías mineras (SQM, Minera Escondida, Rockwoodlithium) que colaboraran al estudio facilitando información digitalizada de los planes de seguimiento ambiental hidrogeológico y otro material relevante. Finalmente, para el proyecto, se revisaron doce estudios y artículos sugeridos en las bases, donde además se incluyeron once estudios y publicaciones científicas relevantes para el proyecto. Para cada uno de los antecedentes se confeccionó una ficha donde se destaca la relevancia y se realiza un análisis crítico de la información presentada. En el Anexo 1 se presentan las fichas asociadas a cada uno de los antecedentes anteriormente mencionados.

Harza Engineering Company International 1978, Desarrollo de los recursos de agua en el norte grande Chile. Proyecto CHI-69/535 CORFO-D.G.A-CCC-P.N.U.D. para las Naciones Unidas ONU, 146 pp.

El estudio busca determinar las fuentes de agua sustentable en el Norte grande. Realiza en primer lugar una descripción de la geología, geomorfología, unidades en subsuperficie y tectónica de la cuenca del Salar de Atacama. Con lo anterior se proporciona un modelo conceptual de la recarga y descarga del Salar, con énfasis en las zonas de recarga provenientes de la Cordillera de Los Andes y del norte del Salar por aguas que se infiltran del río San Pedro. El trabajo incluye la perforación de pozos en el margen este del salar.

Grilli, A. y Vidal, F., 1986, Evaporación desde salares: Metodología para evaluar los recursos hídricos renovables. Aplicación a las regiones I y II. Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, Vol. 1, Año 1, No 2, 20 p.

El estudio analiza conceptualmente las ecuaciones y los fenómenos físico-químicos que controlan la evaporación. Compila experiencias de estimación de evaporación en Chile donde se destaca la estimación de efluentes del Salar vía evaporación. Se incluyen tanques de evaporación tipo A por la DGA, lisímetros en Pampa del Tamarugal, Toro (1967) y Salar de Atacama, Mardones (1986), fraccionamiento isotópico: Grilli y Aravena (1985) Pampa

del Tamarugal, estimación de afluentes al Salar y por medio de balance hídrico de las cuencas aportantes. Además entrega dos curvas de evaporación para el Salar de Atacama según profundidad, diferenciando según costra de cloruros y sulfatos y limos.

Rio Chilex, 1999. Evaluación hidrogeológica acuífero sector norte Salar de Atacama informe realizado por Exploración y Desarrollo de Recursos de Agua, Santiago, Chile.

Realiza un estudio de la evaporación en el sector norte del Salar, entre San Pedro y Toconao. Clasifica la superficie en nueve distintos tipos de suelo donde se estima la evaporación. La tasa de evaporación las determina a partir de otros estudios (CORFO MINSAL-DGA).

DGA 1999, Evaluación de la Disponibilidad de Recursos Hídricos para constituir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al Salar de Atacama, II región, Minuta 60, 27p.

La minuta presenta los resultados de la investigación que tiene como objetivo determinar la disponibilidad de recursos hídricos para constituir derechos de agua en el Salar de Atacama. Se realiza un balance hídrico en la cuenca del Salar para régimen natural, separando la cuenca en seis zonas. El balance hídrico considera la precipitación menos la evaporación potencial igual a la escorrentía más el flujo subterráneo. Se trata de un balance simplificado, no considera la evaporación desde las aguas subterráneas u otros. A partir de esto desprende que después del proceso evaporativo sobre las cuencas aportantes quedan solamente 3,94 m³/s de las precipitaciones para aportar a la recarga del Salar que constituye el caudal renovable del sistema. Indica que el sector de Tilopozo-Negrillar y Monturaqui es el único sector donde existe una sobreexplotación de las aguas. Concluye que la descarga por evaporación del Salar corresponde a 5,32 m³/s. Por otro lado, considera que para el escenario de la fecha de estudio, hay un caudal de escorrentía afluente al Salar de 2,54 m³/s, y no de 3,94 m³/s, como en el régimen "natural".

Risacher, F., Alonso, H. y Salazar, C. 1999. Geoquímica de aguas en cuencas cerradas, I, II, III Regiones, Chile. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Reporte Técnico S.I.T. N° 51, Santiago, Chile

El estudio define y describe los tipos y funcionamiento de los salares de la I, II y III región de Chile (nomenclatura previa al año 2007), poniendo énfasis en la evolución hidroquímica de las aguas por evaporación. Este estudio no incluye información nueva del Salar de Atacama sino que cita el estudio de los mismos autores realizados el año 1996. El capítulo correspondiente al Salar de Atacama presenta las composiciones hidroquímicas de los afluentes más importantes, donde se describe que todas las aguas siguen las vías sulfatadas. El aporte más concentrado sigue la vía cálcica, pero que podría estar contaminado por la cuña salina. Las vías sulfatadas son coherentes con la geología volcánica de la parte oriental de la cuenca y también con la composición sulfatada de las salmueras de la mitad oriental del núcleo. Al contrario, discrepan con la composición cálcica de las salmueras del sector occidental del núcleo. Esta composición cálcica refleja la litología, en gran parte sedimentaria, de la Cordillera de Domeyko.

Igsa Consultores/SQM, 2004. Evaluación de Impacto Ambiental, Cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama, Santiago, Chile.

El estudio corresponde a la Evaluación de Impacto Ambiental de SQM, "Cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama". Se destaca en el Capítulo 5: "Caracterización del área de influencia" los subcapítulos 5.6: "Hidrología, hidrogeología y comportamiento hidráulico de las lagunas marginales del salar" y 5.7: "Comportamiento físico y químico de las lagunas". En estos, se busca caracterizar la hidrología e hidrogeología enfocada en establecer el funcionamiento hidráulico del sistema lacustre existente en el margen oriental del núcleo del Salar de Atacama. Se estudia específicamente los sistemas lagunares del margen este como lo son el sistema Soncor compuesto por Burro Muerto, Puillar, Chaxas y Barros Negros; el sistema aguas de Quelana y el sistema Peine compuesto por las lagunas Salada, Interna y Saladita. Provee un balance hídrico para las lagunas Barros Negros y Aguas de Quelana. Se destaca que el estudio presenta una curva de evaporación según profundidad para el sistema Aguas de Quelana. Por otro lado, no presenta un modelo conceptual del sistema Peine.

CADE-IDEPE, 2004. Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de agua según calidad, Cuenca del Salar de Atacama, Santiago: Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, 84 p.

Recopila información al respecto de las características geológicas del suelo, flora y fauna, y usos de suelo. Luego, analiza los afluentes río San Pedro, río Vilama, Quebrada Jerez,

Quebrada Talabre, Quebrada Camar y Quebrada Peine. Realiza una revisión de la tendencia de parámetros de calidad de agua (conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, pH, RAS, cloruro, sulfato, boro, cobre, hierro, manganeso, molibdeno, aluminio y arsénico), en donde propone un programa de monitoreo.

CPH Consultores / NX1 Peine, 2008. Evaluación de impacto ambiental. Planta de producción de sales de potasio. Santiago, Chile.

Corresponde al estudio de evaluación de impacto ambiental para la instalación de la planta de producción de sales de potasio ubicada en el margen oeste del Salar de Atacama. En la Adenda III: Antecedentes hidrogeológicos, establece un modelo numérico que destaca la existencia de una zona de baja conductividad hidráulica que ha sido representado en dos modelos de simulación hidrogeológica desarrollados por diferentes proyectos. Utiliza las medidas de evaporación de Mardones.

DICTUC 2008. Levantamiento Hidrogeológico para el Desarrollo de Nuevas Fuentes de Agua en Áreas Prioritarias de la Zona Norte de Chile, Regiones XV, I, II y III. Informe Final. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, Chile.

Corresponde a un estudio de levantamiento hidrogeológico para la zona norte, donde no se incluye el Salar de Atacama. El estudio cuenta con distintos volúmenes donde se destaca el Informe VII: Medición de la Evaporación mediante el Método del "Domo". En este capítulo se realiza una comparación distintas técnicas de medición de evaporación. Incluye lisímetro de carga variable, lisímetro de carga constante y domo.

DGA/GCF Ingenieros, 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, 277pp.

Este estudio tiene como objetivo la reevaluación de la información básica generada en la Minuta N°60, utilizando la información hidrológica más reciente. Además de esto, busca delimitar zonas con sistemas ambientalmente sensibles en el Salar de Atacama. Los resultados incluyen la delimitación de subcuencas de la cuenca del Salar de Atacama a partir de métodos SIG, con el cual modifica las subcuencas presentadas en la Minuta 60 de la DGA. Identifica las zonas ambientales sensibles (vegas, bofedales y cultivos). Además se realiza un estudio hidrológico donde genera relaciones de la precipitación, la evaporación

y la temperatura versus la altura sobre el nivel del mar a nivel mensual, las que constituyen la base para la aplicación de los balances hídricos a nivel de cuenca y de subcuencas. En el análisis de la evaporación, modifica la zonación superficial del salar propuesta por Mardones, cambiando la superficie de las vegas. No realiza descripción de la costra. Inspecciona las diferencias de nivel freático en las zonas de medición de Mardones, contrastándola con los resultados obtenidos por Mardones en 1983-1984. De acuerdo a los valores entregados el nivel varía aproximadamente entre 0,2 y 1 m. A partir de lo anterior estima una descarga por evaporación del salar de 5,84 m³/s, pero dada la incertidumbre de la cifra propone utilizar el promedio entre esta y la propuesta por Mardones, quedando así la descarga por evaporación en 5,6 m³/s.

DGA 2013, Análisis Preliminar de Planes de Alerta Temprana con Condicionamiento de Derechos, Dirección General de Aguas, Santiago, Chile, 54 p.

El objetivo del estudio es recopilar información disponible de los Planes de Alerta Temprana (PAT) que condicionan derechos de agua para realizar un análisis y diagnóstico preliminar del estado actual de ellos. El estudio inspecciona los seis PAT aprobados por la DGA que condicionan los derechos de aprovechamiento otorgados (PATs asociados a derecho). Estos se ubican en la Región de Antofagasta: Pampa Puno, Elvira, Los Morros, Salar de Ollagüe, Monturaqui- Negrillar-Tilopozo y Calama. El PAT de interés corresponde al del acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo, ubicado al sur este del Salar de Atacama. Se presentan las variables de monitoreo, que incluyen: nivel de agua, extracciones de agua (bombeo), calidad química de aguas superficiales y subterráneas, cuña salina, conos de depresión, nivel de lagunas y humedales y área de lagunas y vegas. No se entregan registros de los datos de monitoreo.

DGA 2013, Análisis de la Oferta Hídrica del Salar de Atacama, Dirección General de Aguas, Santiago, Chile, 40 p.

El informe corresponde a una recopilación de antecedentes y un análisis crítico de las metodologías empleadas para el cálculo de la descarga del Salar de Atacama. El estudio actualiza el balance hídrico del salar y presenta un mapa de zonas de evaporación modificado de Mardones, estimando la evaporación a partir de estas nuevas zonas. El modelo conceptual no considera las estaciones meteorológicas presentes en los planes de seguimiento ambiental (ej: Estación Chaxa y Estación Salar del PSAH SOM), que podrían

contribuir a mejorar la estimación de precipitación. Estima un valor de la evaporación neta de 5,178 m³/s. a partir del caudal pasante al Salar.

Mardones, L. 1986, Características geológicas e Hidrogeológicas del Salar de Atacama. El litio, un nuevo recurso para Chile: Editorial Universitaria, 1986, pp. 181-216.

El estudio realizado por Mardones 1986, presenta los resultados de la campaña de medición de la evaporación en el Salar de Atacama durante los años 1983 a 1984. La evaporación es medida en siete ubicaciones en distintas áreas del Salar a través de lisímetros. En alguno de estos puntos realiza hasta cinco mediciones en distintas épocas del año y/o con distinto nivel freático. A partir de estos puntos de medición Mardones define 15 áreas de evaporación que dependen del tipo de costra superficial, evaporación medida y nivel freático. Asigna a cada una de estas áreas una tasa de evaporación. La ubicación exacta de estos puntos no se presenta. Mardones concluye que la evaporación depende de cuatro factores: la densidad del agua, la profundidad del nivel freático, tipo de sedimento y tipo costra superficial. Concluye que la evaporación ocurre principalmente en la zona marginal y especialmente en la interface entre el agua proveniente del este de la cuenca y la del Salar en la cuña salina.

Bevacqua, P. 1991. Geomorfología del Salar de Atacama y estratigrafía de su núcleo y delta, Segunda Región de Antofagasta, Chile. Memoria de Título (Inédito), Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, 284 p. Antofagasta.

Realiza una descripción geológica de las costras superficiales del salar de Atacama. Las descripciones realizadas son acabadas y detallistas las que son presentadas en un mapa. Además compara las definiciones del estudio con los estudios anteriores. No realiza análisis hidroquímicos ni geoquímicos.

Aravena R.; Susuki O.; Peña H.; Pollastri A.; Fuenzalida H.; Grilli, A. 1999. Isotopic composition and origin of the precipitation in Northern Chile. Applied Geochemistry 14: 411-422

El artículo presenta los resultados de un estudio de la composición isotópica oxígeno y deuterio de la precipitación en la I y II región. Concluye que los valores empobrecidos en

O18 en las zonas de mayor altitud del altiplano se relacionan con procesos que afectan las masas de aire originadas en el océano Atlántico, al otro lado de la cuenca Amazonas, donde ascienden debido a la cordillera de los Andes y precipitan en el altiplano. Además se postula una segunda fuente de humedad asociada a masas de aire provenientes del Pacífico que contribuyen con precipitaciones enriquecidas en O18 para las zonas de menor altitud. Entrega una curva meteórica para el norte de Chile.

Bobst, A.L., Lowenstein, T.K., Jordan, T.E., Godfrey, L.V., Hein, M.C., Ku, T.-L., Luo, S., 2001. A 106 ka paleoclimate record from drill core of the Salar de Atacama, northern Chile. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 173, 21–42.

El estudio consta de la realización de dataciones radiométricas en un pozo ubicado en el núcleo del Salar de Atacama. Determina una edad de 106 ka para evaporitas ubicadas a 100 m de profundidad. A partir de lo anterior, calcula tasas de depositación e identifica períodos más húmedos los que son correlacionados con distintos estudios paleoclimáticos. Como parte de la metodología empleada, el estudio describe distintos tipos de costras y depósitos superficiales. Provee un mapa modificado de Bevacqua 1991 con la zonación superficial de los depósitos. Es importante destacar que el trabajo considera un solo pozo ubicado al oeste de la falla del Salar. Trabajos posteriores realizan una correlación en pozos profundos al lado este y oeste de la falla para comparar las tasas de depositación (Lowenstein 2003).

Tejeda, I., Cienfuegos, R., Muñoz, J. y Durán, M. 2003. Numerical modeling of saline intrusion in Salar de Atacama. *Journal of Hydrologic Engineering*, Jan/Feb, 25-34.

Presenta los resultados de modelaciones numéricas de aguas subterráneas que incluyen el transporte de solutos en el Salar de Atacama. La modelación es realizada en dos dimensiones y considera densidad variable. La evaporación es considerada en función de la profundidad del nivel freático, donde presenta tres distintas ecuaciones que dependen del tipo de costra superficial. Concluye que el estudio deja en evidencia que la evaporación en cuencas endorreicas tiene un efecto considerable en el flujo de agua subterráneo así como en la distribución de los sólidos disueltos del acuífero.

Muñoz J. F. y Ortiz C.A., 2004. Funcionamiento hidrogeológico del acuífero del núcleo del Salar de Atacama, Chile. Ingeniería hidráulica en México, XIX (3), 69-81.

El presente artículo estudia el comportamiento hidrogeológico del núcleo del Salar de Atacama realizando un modelo numérico realizado en Modflow. Concluye que las principales zonas de descarga por evaporación se encuentran en la zona marginal del Salar. Observa además que la evaporación de las zonas marginales del núcleo "amortigua" las variaciones naturales de la recarga por flujo lateral subterráneo, estableciéndose una recarga neta relativamente constante. Proporciona valores de recarga y descarga al núcleo del Salar dividido en 10 cuencas aportantes. Destaca que en la zona norte, el flujo subterráneo y superficial no recarga el núcleo del Salar ya que es completamente consumido por la evaporación. Por otro lado, el margen este aporta a la recarga del núcleo.

Kampf SK, Tyler SW, Ortiz C, Muñoz JF, Adkins P, 2005. Evaporation and land surface energy budget at the Salar de Atacama, Northern Chile. Journal of Hydrology 310, pp. 236-252.

Estima la evaporación utilizando balances de energía en distintos tipos de costras o superficies en el Salar de Atacama. Realiza mediciones con el método Eddy covariance. Los resultados muestran que no detecta evaporación en el núcleo de halita en zonas donde el nivel freático se encuentra a más de 1 m de la superficie.

Kampf S., Tyler S., 2006. Spatial characterization of evaporation and land surface energy fluxes at the Salar de Atacama, Northern Chile using ASTER image classification. Advances in Water Resources 29, pp 336-354.

El estudio se basa en la utilización de imágenes ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer) para estimar la distribución espacial del flujo de energía y evaporación en el Salar de Atacama. Entrega una estimación de la descarga por evaporación. Concluye que a partir de imágenes ASTER es posible obtener buenos resultados para identificar la distribución espacial de los flujos de energía superficiales, pero no es suficiente como para predecir el flujo latente de calor, por lo que no es preciso para estimar la evaporación. Presenta la imagen con distribución de evaporación con una

resolución acorde a la imagen satelital, lo que provee más detalle con respecto a otros estudios.

Salas, J, Aravena, R., Guzmán, E., Cornellà, O., Guimerà, J., Tore, C., von Igel, W., Fock, A., Henríquez, A. 2009. Modelo de evaporación hidroquímica e isotópica del Salar de Atacama: Soncor y Aguas de Quelana. XII Congreso Geológico Chileno, Santiago, 22-26 Noviembre, 4p.

Propone un modelo conceptual para el sistema Soncor compuesto por el Canal del Burro Muerto, las lagunas Puillar, Chaxa y Barros Negros y para el sistema Aguas de Quelana. Concluye que durante la época invernal, el caudal de descarga en la zona de la cuña aumenta. Este incremento de la tasa de flujo lleva asociado la inundación de grandes extensiones al oeste de la posición de la cuña (alimentando la laguna Puillar). Estas aguas se equilibran con las condiciones ambientales de presión y temperatura, experimentando procesos evaporativos. A partir de estas zonas de inundación estacionales, las aguas desbordadas y evaporadas siguen diferentes vías advectivas, según el dominio hidrológico particular de cada sector. Alimentando superficial y subsuperficialmente las lagunas permanentes del sistema Soncor (Canal del Burro Muerto, Lagunas Chaxa y Barros Negros). Por otro lado, el estudio provee de un modelo conceptual basado en una caracterización hidroquímica de las aguas. No provee una estimación cuantitativa de la recarga y descarga.

Cornellà, O., Salas, J, Aravena, R., Guzmán, E., Guimerà, J., Tore, C., Von Igel, W., Henríquez, A., Fock, A., 2009. Hidrogeología Del Los Sistemas Lagunares Del Margen E Del Salar De Atacama. Santiago, Actas XII Congreso Geológico Chileno.

Realiza una breve descripción de la geología del Salar de Atacama. Enfatiza que los factores que más influyen en la recarga del sistema acuífero del Salar son pluviometría, fluvimetría y evaporación. Propone un modelo conceptual para el origen y tipos de lagunas del margen este del Salar, las describe a partir de cómo se forman. Chaxa y Barros Negros, son lagunas de carácter permanente y gran extensión (varias hectáreas), alimentadas por el canal Burro Muerto. Por otro lado, Puillar, Aguas de Quelana, Peine y Tilopozo son cuerpos lacustres de menor extensión, originados por la presencia de afloramientos de agua subterránea ligados a la dinámica de una cuña salina. Esta cuña salina responde a la inmiscibilidad de dos soluciones con densidades contrastadas. Las aguas de recarga procedentes del margen este se caracterizan por densidades del orden de 1.00 gr/cm³, mientras que las salmueras del núcleo salino presentan densidades del orden de 1.23 g/cm³. Como consecuencia, se

genera un cordón lagunar a lo largo del margen este. En esta zona, el nivel de agua subterránea es prácticamente coincidente con la cota topográfica, aflorando en ocasiones. Este hecho es la causa de que a lo largo del margen E se concentre la mayor tasa de evaporación superficial y freática de todo el Salar (0.7 mm/d). Como consecuencia, las aguas de recarga aumentan su salinidad y densidad, infiltrándose y mezclándose con las salmueras del núcleo salino.

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 ISSN: 0366-0176

El estudio propone un modelo conceptual hidrogeológico del sistema lagunar del margen oriental del Salar de Atacama (Chile), integrando datos climáticos, geológicos y geomorfológicos, piezométricos, químicos e isotópicos. Interpreta que la presencia y mantenimiento de humedales en las zonas de descarga es debido a la presencia de niveles de baja permeabilidad en el subsuelo.

5. Geología

5.1 Trabajos Anteriores

Los primeros trabajos formales en las proximidades del área de estudio corresponden a los realizados por Brügger (1942) y (1950), en donde se hicieron las primeras descripciones de las formaciones reconocidas en el área. Posteriormente Dingman elaboró la cartografía geológica básica de los cuadrángulos de Tulo (Dingman, Cuadrángulo Tulo, Provincia de Antofagasta, Escala 1:50.000, 1963) y San Pedro de Atacama (Dingman, Cuadrángulo San Pedro de Atacama, Provincia de Antofagasta, Escala 1:50.000, 1965) en colaboración con el Instituto de Investigaciones Geológicas (IIG), la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) y el Servicio Geológico Estadounidense (USGS, por sus siglas en inglés). En los trabajos de este último autor se sistematizó la descripción de las unidades descritas previamente por Brügger y se definieron las principales formaciones reconocidas en el sector. Hollingworth & Rutland (1968) publicaron los estudios realizados en el sector de San Bartolo donde reconoce a grandes paquetes de ignimbritas como el Grupo San Bartolo. A finales de la década de los 60 se inicia la exploración del campo geotérmico del Tatio (Lahsen (1969) y Sánchez (1970)).

En el año 1976, el IIG en conjunto con la Secretaría Regional de Planificación y Coordinación (SERPLAC) de la II Región de Antofagasta inició un proyecto con el objetivo de reconocer la geología y recursos minerales de la Región, que generó un informe preliminar en el que se identifican los sectores que necesitan un estudio de mayor detalle (Marinovic, Díaz, Rámirez, & Travisany, 1976). Posteriormente Rámirez (1979) y Travisany (1978) realizaron en el sector sus memorias de título de geólogo, en las que describe la geología a una escala 1:50.000. Posteriormente, la información recopilada en las diversas campañas de terreno fue incluida en la Hoja Calama (Marinovic & Lahsen, Hoja Calama : Region de Antofagasta, escala 1:250.000, 1984).

A fines de la década de los 70 CORFO junto con la Sociedad Minera Salar de Atacama Limitada (MINSAL), realizó una campaña de caracterización del núcleo del Salar de Atacama, que incluyó la perforación de sondajes diamantinos, realización de ensayos de bombeo y estudios de porosidad drenable para caracterizar los parámetros hidráulicos del núcleo del Salar de Atacama, que fueron sintetizados por Bevacqua (1992)

A partir de la década de 1980, los principales trabajos apuntaron a afinar la estratigrafía local y las edades de las principales formaciones (Naranjo & Paskoff (1982), Naranjo, et al. (1994), y May, et al. (2005)), explicar el origen de la cuenca del Salar de Atacama y entender el funcionamiento de las principales estructuras (Flint, et al., (1993), Muñoz, et al., (2002), Pananont, et al., (2004), Mpodozis, et al., (2005), Arriagada, et al., (2006), Jordan, et al., (2002) y (2007), González, et al., (2009)).

5.2 Unidades Morfoestructurales

La hoya hidrográfica del Salar de Atacama está delimitada por morfoestructuras de orientación principal norte-sur, las cuales de oeste a este se disponen en el siguiente orden: Cordillera de Domeyko, Llanos de la Paciencia, Cordillera de la Sal, Salar de Atacama, Cordillera Occidental de los Andes, donde se ubica el arco volcánico actual, y por el sur el Cordón de Lila (Figura 5-1). A continuación se presenta una descripción general de estas unidades.

5.2.1 Cordillera de Domeyko

La Cordillera de Domeyko, es un cordón montañoso que en su límite oriental presenta un **rasgo geomorfológico denominado "Escarpe El Bordo"**. En el **eskarpe** aflora el basamento paleozoico, el cual es cubierto en discordancia por una secuencia de rocas mesozoicas y cenozoicas.

El basamento del Paleozoico está compuesto por complejos magmáticos de composición variable (Formación Estratos El Bordo), intercalaciones lacustres (Grupo Peine), y extensos afloramientos de riolitas y centros plutónicos de granitoides (Formaciones Cas y Tuina) (Ramírez & Gardeweg (1982), Marinovic & Lahsen (1984), Arriagada, et al., (2006)).

Las unidades mesozoicas están conformadas por rocas sedimentarias del grupo Purilactis (de acuerdo a la definición de Arriagada, et al. (2006), que incluye a las formaciones Tonel; Purilactis y Barros Arana, asignadas al Cretácico, y las formaciones Cerro Totola, Naranja y Loma Amarilla, asignadas al Paleógeno.

5.2.2 Llano de la Paciencia

Corresponde a una cuenca intermontana ubicada entre la Cordillera de Domeyko y la Cordillera de la Sal. Está conformada por una secuencia Neógena de gravas, arenas y limos, no consolidados asociados a flujos de barro y detritos provenientes de la Cordillera de Domeyko. En algunos sectores del Llano de la Paciencia se pueden encontrar depósitos evaporíticos intercalados con las secuencias más finas de sedimentos.

5.2.3 Cordillera de la Sal

Corresponde a un cordón montañoso que se desarrolla dentro de la cuenca del Salar de Atacama, de rumbo aproximado NNE y que se eleva hasta 200 m sobre el Salar de Atacama. Dentro de la Cordillera de la Sal se exponen sucesiones de areniscas finas y gruesas, arcillas, limos, yeso y sal, consolidados y compactados, agrupados en la Formación San Pedro, que se le asigna una edad Oligoceno a Mioceno Superior (Naranjo, Ramírez, & Paskoff, *Morphostratigraphic evolution of the northwestern margin of the Salar de Atacama basin (23°S-68°W)*, 1994).

La formación San Pedro está fuertemente plegada y fallada, lo que da forma a una estructura anticlinal característica en el límite occidental del núcleo del Salar de Atacama. En la parte norte de la cuenca, las rocas de la Formación San Pedro y de la Formación Tambores se encuentran cubiertas por flujos ignimbríticos neógenos del Grupo San Bartolo, asignado al Mioceno Superior – Plioceno (Marinovic & Lahsen (1984), Arriagada, et al., (2006)).

5.2.4 Salar de Atacama

El Salar de Atacama es el depocentro actual de una cuenca endorreica, donde se reconocen una serie de sedimentos clásticos, volcánicos y evaporíticos que se han depositado desde el Cretácico Superior hasta la actualidad (Moraga, Chong, Fortt, & Henriquez, 1974). Ramírez & Gardeweg (1982) y Bevacqua (1992) describen que los depósitos evaporíticos actuales muestran una zonación asimétrica bien definida que sigue una secuencia de precipitación evaporítica clásica, condicionada por los aportes hídricos de la cuenca. Desde la zona marginal hacia el núcleo del salar se reconocen: Depósitos Aluviales; Costras Detrítico Evaporitas, Costras de Carbonatos, Costra de Sulfatos, Costra de Cloruros.

Hacia el este de la cuenca, en las partes topográficamente más elevadas, se encuentran los depósitos más gruesos, gravas y arenas gruesas principalmente, con mala selección y clastos angulosos. A medida que se baja en altura y alejándose de las salidas de las quebradas, se observa cómo va disminuyendo el tamaño de grano, mejorando la selección de los clastos y la esfericidad. En la parte más baja de la cuenca se observa un predominio de arenas finas, limos y arcillas que engranan con los depósitos evaporíticos. Se puede observar que los limos y arcillas se encuentran cementados por carbonatos, yeso y halita principalmente. En algunos sectores se pueden reconocer polígonos de desecación, que con **el tiempo tienden a formar morfologías que fueron descritas como "costras" por Moraga, et al. (1974) y Bevacqua (1992).**

El basamento del Salar de Atacama se encuentra formado por lavas, ignimbritas y sedimentos rojos paleozoicos pertenecientes a la Formación Peine y Cas. Éstos se encuentran suavemente plegados y fuertemente fallados. Las secuencias del basamento paleozoico se encuentran cubiertas en discordancia de erosión por los depósitos de ignimbritas neógenas. Tanto el basamento como las ignimbritas neógenas afloran sobre la actual superficie de erosión, por lo que se encuentran disectadas por profundas quebradas y cubiertas por los depósitos aluviales del piedemonte andino.

5.2.5 Cordillera Occidental de los Andes

En el borde oriental de la cuenca del Salar de Atacama se desarrolla la Cordillera Occidental de los Andes, en la que se ubica el arco volcánico actual. Presenta una topografía fuertemente irregular, su ancho oscila entre los 50 – 100 km y su altura entre los 3.800 a 4.700 m s.n.m., aunque es coronada por estratovolcanes de edad miocena – holocena, de alturas entre los 5.000 – 6.890 m s.n.m. La vertiente occidental de los Andes se encuentra cubierta por ignimbritas miocenas y pliocenas, inclinadas suavemente hacia el oeste y que en sus partes más bajas se observan cubiertas por depósitos de abanicos aluviales. En el límite con el Salar de Atacama, afloran rocas paleozoicas pertenecientes a las formaciones Peine y Cas. Hacia el este de esta unidad se ubica el Altiplano, donde grandes áreas se encuentran cubiertas por las ignimbritas neógenas y centros volcánicos andesíticos que conforman el arco volcánico activo.

5.2.6 Cordón de Lila

Corresponde a un bloque tectónicamente alzado, de altura promedio 3200 m s.n.m., que hacia el norte desciende en altura hasta desaparecer en el Salar de Atacama. En él afloran extensas superficies de rocas ígneas y sedimentarias pertenecientes a todo el Paleozoico, así como también diversas unidades volcánicas y plutónicas del Mesozoico y Cenozoico. Las principales unidades de roca corresponden al Complejo Ígneo y Sedimentario del Cordón de Lila (CISL) y las formaciones Quebrada Grande, Quebrada Ancha y Formación Lila, todas de edad paleozoica.

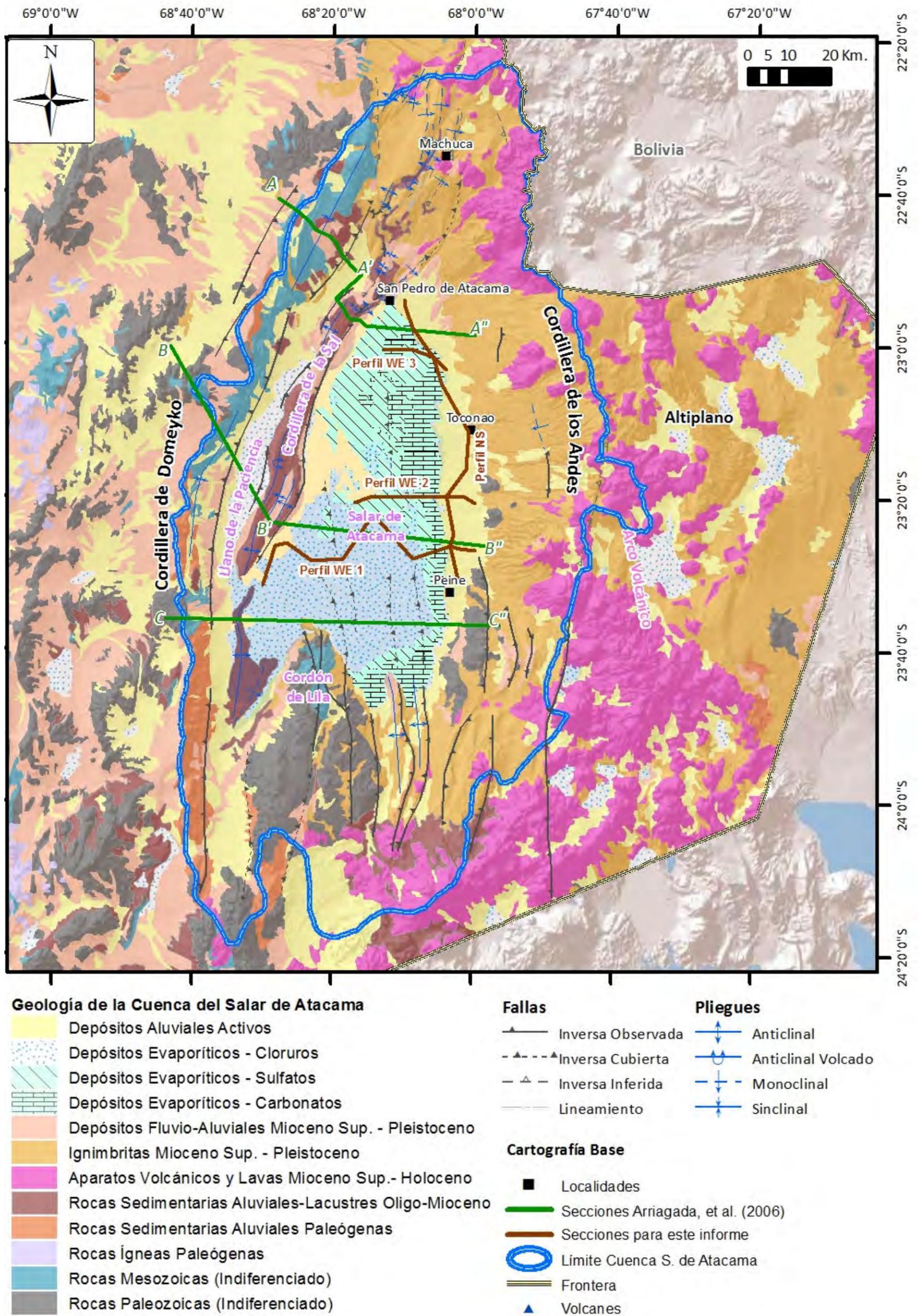


Figura 5-1 Principales morfoestructuras y unidades geológicas de la cuenca del Salar de Atacama.

Fuente: Modificado de Bevacqua (1992), SERNAGEOMIN (2003), Aron, et al., (2008), Arriagada, et al., (2006).

5.3 Geología en Superficie

A continuación se presentan las principales formaciones y unidades de roca reconocidas a partir de la recopilación bibliográfica.

5.3.1 Basamento Mesozoico y Paleozoico

El basamento aflora en el flanco oriental de la Cordillera de Domeyko, en el Cordón de Lila y en borde oeste de la Cordillera Occidental. Está compuesto por rocas volcánicas y sedimentarias continentales y marinas, y por granitoides que van desde el Ordovícico hasta el Cretácico Superior (Marinovic & Lahsen (1984), Mpodozis, et al. (2005), Niemeyer (2007)).

5.3.1.1 Complejo Ígneo y Sedimentario Cordón de Lila [Cámbrico? - Ordovícico Inferior?]

Conforma parte el Cordón de Lila. Su parte inferior corresponde a 3.000 m de lavas basálticas intercaladas con turbiditas, y su tercio superior a flujos riolíticos y riolacitos intercalados marginalmente con rocas sedimentarias de grano fino. Se dispone en inconformidad por debajo de la Formación Quebrada Grande (González, Niemeyer, Benedetto, & Brussa, 2007)

5.3.1.2 Formación Quebrada Grande [Ordovícico Inferior – Medio]

Se observa en el Cordón de Lila, y corresponde a una sucesión marina de 1.600 m de espesor, compuesta de conglomerados, areniscas y limos. Esta formación es intruida por el pórfido Quebrada Ancha (González, Niemeyer, Benedetto, & Brussa, 2007).

5.3.1.3 Formación Quebrada Ancha [Silúrico Inferior]

Aflora en el Cordón de Lila, y está constituida por cuarzo arenitas y areniscas calcáreas. Tanto esta formación como la anterior son intruidas por grandes volúmenes de roca granítica del Ordovícico – Silúrico Inferior (González, Niemeyer, Benedetto, & Brussa, 2007).

5.3.1.4 Formación Lila [Devónico]

Pertenece al sector oriental del Cordón de Lila, y corresponde a cuarzo arenitas marinas y conglomerados.

5.3.1.5 Formación Tuina [Pérmico]

La Formación Tuina se reconoce en la Cordillera de Domeyko, y corresponde a una sucesión constituida por dos miembros de lavas andesíticas y riolíticas, brechas volcánicas y tobas, entre los cuales se intercala un miembro medio de areniscas, lutitas y conglomerados de origen continental. (Marinovic & Lahsen, Hoja Calama : Region de Antofagasta, escala 1:250.000, 1984)

Se dispone en discordancia angular, bajo la Formación Purilactis (Dingman, 1965), asignada al Cretácico, al sur de la Pampa Chilcara y en los cerros de Aiquina. Su base no aflora. Marinovic & Lahsen (1984), en base a dataciones radiométricas en pórfidos que la intruyen le asignan una edad pre-triásica.

5.3.1.6 Formaciones Peine y Cas [Pérmico tardío]

Se observan al oriente del Salar de Atacama, en las partes bajas de la Cordillera Occidental. Corresponden a una sucesión volcanoclástica de 2 km de espesor, de productos andesíticos a riolíticos, en cuyo segmento medio se intercala una unidad menor de rocas sedimentarias de facies lacustres y fluviales (Breitkreuz, 1995).

5.3.1.7 Pórfidos Aiquina [Triásico Inferior]

La unidad intrusiva Pórfidos de Aiquina aflora la Cordillera de Domeyko. Está unidad intruye a la Formación Tuina con contactos nítidos y produciendo escaso metamorfismo de contacto. Dataciones radiométricas de K-Ar en biotita que arrojó un valor de 223 ± 7 Ma, asignándole una edad mínima de Triásica Inferior (Marinovic & Lahsen, Hoja Calama : Region de Antofagasta, escala 1:250.000, 1984).

5.3.1.8 Grupo Purilactis [Aptiano ?– Paleoceno Inferior]

El Grupo Purilactis, según la definición presentada por Mpodozis, et al., (2005) y Arriagada, et al., (2006), incluye de base a techo las formaciones Tonel, Purilactis, Barros Arana y Totola. Dentro del Grupo Purilactis además se incluye de manera informal la Formación Lomas Negras, que aflora en el sector norte del salar, en las proximidades de El Tatio. Su base corresponde a la Formación Tonel, que cubre en discordancia de erosión y angular al basamento Paleozoico, mientras que su techo corresponde a la Formación Cerro Totola. El Grupo Purilactis se encuentra separado de las formaciones sedimentarias continentales del Paleógeno Superior por una fuerte discordancia de erosión.

Formación Tonel: La formación Tonel involucra más de 1000 m de arenas rojas y evaporitas continentales, que comenzaron a acumularse como estratos de crecimiento sintectónicos durante las primeras etapas del alzamiento de la Cordillera de Domeyko (Mpodozis, et al., (2005), Arriagada, et al., (2006)). La Formación Tonel está levemente discordante sobre rocas lacustres triásicas y volcánicas e intrusivas del Paleozoico Superior de la Cordillera de Domeyko, y es cubierto por la Formación Purilactis.

Formación Purilactis: Corresponde a más de 3000 m de areniscas pardo-rojizas con intercalaciones de conglomerados y de capas de yeso, que afloran a lo largo del flanco oriental de la Cordillera de Domeyko. De acuerdo a Arriagada, et al., (2006), la proveniencia de sedimentos es desde el oeste, lo que representaría la respuesta sedimentaria a nuevos pulsos de alzamiento tectónico de la Cordillera de Domeyko. El ambiente de depositación de esta formación es interpretado como un sistema de abanicos aluviales, fluviales y juntos con un aporte menor eólico y lacustre. En base a dataciones radiométricas realizadas en formaciones que la cubren y paleomagnetismo se le asigna una edad Aptiano – Maastrichtiano.

Formación Lomas Negras: Aproximadamente 500 m areniscas y conglomerados de origen continental, en parte marino, y rocas volcánicas que aflora al lado oeste de la cuenca de El Tatio, a lo largo del cañón del Río Salado.

Formación Cerro Totola: Corresponde a lavas alcalinas e ignimbritas, y algunos niveles sedimentarios del Maastrichtiano. A partir de edades radiométricas se le asigna una edad Cretácico Tardío – Paleoceno (Mpodozis, y otros, 2005).

5.3.2 Formaciones Sedimentarias del Eoceno - Mioceno

Las principales unidades sedimentarias reconocidas del Oligoceno – Mioceno corresponden a grandes paquetes de sedimentos continentales, esto es, conglomerados, areniscas, limolitas y depósitos evaporíticos que han sido descritos tanto en afloramientos o a través de la interpretación de líneas sísmicas (Dingman (1963), Hollingworth & Rutland (1968), Travisany (1978), Ramírez (1979), Marinovic & Lahsen (1984), Mpodozis, et al. (2005), y Arriagada, et al. (2006)).

Las unidades sedimentarias corresponden, de más viejo a más joven a las formaciones Naranja, Loma Amarilla, San Pedro y Tambores, que se describen a continuación:

5.3.2.1 Formaciones Naranja y Loma Amarilla [Eoceno (?) – Oligoceno (?)]

En el sector sur del Escarpe El Bordo, en la Cordillera de Domeyco, se reconocen las Formaciones Naranja y Loma Amarilla descritas por Mpodozis, et al., (2005) y Arriagada, et al., (2006). La Formación Naranja consiste en 900 metros de conglomerados, que pasan a areniscas y evaporitas. Sobre ellas se disponen un nivel de tobas y hasta 1000 metros de gruesos conglomerados de la Formación Loma Amarilla. La toba de la base de la Formación Loma Amarilla entregó edades del Eoceno Superior (K/Ar en plagioclasa) que varían entre los 44 y 39 Ma. La parte superior de la secuencia, de edad pobremente acotada, se acumuló probablemente en el Oligoceno temprano (Mpodozis et al., 2005) y correspondería a facies proximales de la Formación San Pedro.

5.3.2.2 Formación San Pedro [Oligoceno-Mioceno Inferior]

Corresponde a más de 3.000 m de areniscas finas, limolitas y lutitas continentales de color pardo rojizo, con intercalaciones de conglomerados y evaporitas, además de algunos niveles intercalados de tobas y cenizas, cuyos afloramientos se reconocen a lo largo de la Cordillera de la Sal.

La Formación San Pedro se encuentra fuertemente plegada y fallada, reconociéndose pliegues en abanico, como los descritos por Ramírez (1979), pliegues por propagación y/o flexión de falla, pliegues volcados y además, repeticiones de secuencia asociada a las fallas reconocidas.

La Formación San Pedro sobreyace en discordancia de erosión sobre las rocas volcánicas y sedimentarias del Cretácico asignadas a la Formación Lomas Negras y al Grupo Purilactis (Marinovic & Lahsen, 1984). De acuerdo a Marinovic & Lahsen (1984), la Formación San Pedro engranaría lateralmente con la Formación Tambores, pero Naranjo et al. (1994), sugieren que la formación San Pedro está cubierta en paraconcordancia por la Formación Tambores, en la Quebrada Tambores. Estas paraconcordancias pueden ser locales y asociadas al ambiente de depositación de ambas formaciones, representando la Formación San Pedro las facies sedimentarias distales y la Formación Tambores las facies sedimentarias proximales.

5.3.2.3 Formación Tambores [Oligoceno-Mioceno Inferior]

Dingman (1963) la definió como una secuencia de areniscas y conglomerados mal consolidados, en partes cementados con calcita, que afloran en la quebrada homónima. El espesor de la formación aumenta de norte a sur, variando entre 280 y 500 m. Se dispone en discordancia angular sobre las formaciones Tuina y Purilactis, en la vertiente occidental de la Cordillera de Domeyko. Engrana con la Formación San Pedro (Oligoceno-Mioceno Inferior) y subyace en discordancia angular a las Ignimbritas Miocénicas en Quebrada Los Cóndores, al oeste de Llano de la Paciencia y al sur de Pampa Vizcachita.

La existencia de engranes, paraconcordancias y discordancias locales con la Formación San Pedro descrita previamente permiten asignarles una edad oligoceno-mioceno inferior asociada a facies proximales de la fuente de sedimentos.

5.3.2.4 Estratos del Quepe [Eoceno (?) – Mioceno (?)]

Definidos por Ramírez y Gardeweg (1982), corresponde a areniscas y conglomerados grises, areniscas y limolitas pardo-rojizas continentales de 1000 a 1500 m de potencia, de edad desconocida. Aflora en la ladera oeste de la Cordillera Occidental, al sur de Socaire, y se correlacionaría o con la parte alta del Grupo Purilactis o la Formación San Pedro. Su base no aflora y estaría cubierta discordantemente por la Ignimbrita Tucúcaro (Kuhn, 2002).

5.3.3 Volcanes Miocenos - Holocenos

5.3.3.1 Volcanes del Mioceno Inferior-Superior

Corresponde a la unidad Conjunto de Volcanes I definida por Marinovic & Lahsen (1984). Está compuesta por estratovolcanes erosionados, coladas de lava y depósitos piroclásticos asociados, que se disponen, discordantemente, sobre rocas sedimentarias de la Formación San Pedro y sobre las Ignimbritas Río Salado e infrayacen, en discordancia de erosión, a las Ignimbritas Sifón y Puripícar.

Los estrato-volcanes de esta unidad se encuentran fuertemente erosionados y disectados por quebradas profundas que, en algunos casos, dejan al descubierto un núcleo con alteración hidrotermal. En estos volcanes, los flujos de lavas son difícilmente individualizables (Marinovic & Lahsen, 1984). Dentro se pueden identificar:

- Dacitas de Machuca, datado en 17 ± 2 Ma (Ramirez, 1979).
- Andesitas de Jorquencal, datada en $8,8 \pm 0,1$ (Marinovic & Lahsen, Hoja Calama : Region de Antofagasta, escala 1:250.000, 1984).
- Riolita Copacoya, datada en $7,35 \pm 0,3$ (Rutland, Guest, & Grasty, 1965)
- Andesitas Falda Grande
- Aparatos volcánicos fuertemente erosionados, como el cerro Pabellón, Pajonal y los Mellizos de Incahuasi.

La edad mínima de este conjunto volcánico está acotada por la Ignimbrita Puripícar, de edad radiométrica de 4,2 Ma. La edad máxima conocida corresponde al volcán Cerro Machuca, datado radiométricamente en 17 ± 2 Ma (Ramirez, 1979), lo que permite asignarle de manera general una edad Miocena.

5.3.3.2 Volcanes del Plioceno - Holoceno

Esta unidad corresponde a edificios volcánicos poco erosionados desarrollados, en parte, con posterioridad a la última glaciación (Pleistoceno Superior-Holoceno). Se agrupan volcanes y coladas de lava distribuidos en la zona oriental. Sobreyacen a las Ignimbritas Tatio y Cajón y están cubiertos exclusivamente, por depósitos no consolidados, aluviales, coluvio, piroclásticos y morrénicos (Marinovic & Lahsen, 1984).

Dentro de este grupo volcánico se incluyen:

- Domo La Torta (Plelt) < 1,0 Ma (Ramirez, 1979).
- Grupo Volcánico Tocorpuri
- Grupo Volcánico Tatio (Rutland, Guest, & Grasty, 1965)
- Arco volcánico actual

5.3.4 Ignimbritas Miocenas – Pleistocenas

5.3.4.1 Ignimbritas del Mioceno Superior

En el área de estudio se reconocen grandes paquetes ignimbríticos, de composición principalmente andesítica y dacítica. En general las ignimbritas se disponen formando extensas mesetas con una inclinación de 3-5° hacia el suroeste, pero en las proximidades a las estructuras presentan inclinaciones mayores, probablemente asociadas a pliegues por flexión o propagación de falla.

Las ignimbritas acá descritas se basan en las descripciones realizadas por Hollingworth y Rutland (1968), Ramírez (1979), Marinovic & Lahsen (1984), y están generalmente compuestas por varios flujos piroclásticos separados por depósitos de lluvias de ceniza o arenas y gravas.

Ignimbrita Artola [Mioceno Superior]: **Ignimbrita inferior del “Grupo San Bartolo”,** que aflora al sur de San Bartolo (Mina Artola). Dispuesta en discordancia angular, sobre la Formación San Pedro y está cubierta, en discordancia de erosión, por la Ignimbrita Sifón (Ramirez, 1979). Su potencia varía entre los 23 m en el río Salado y 12 m en el camino a San Bartolo. Datada radiométricamente en K-Ar en biotita con $10,0 \pm 0,4$ Ma, lo que permite asignarla al Mioceno Superior (Rutland, Guest, & Grasty, 1965).

Serie Río Salado [Mioceno Superior]: Corresponde a un paquete de volcanitas e ignimbritas que afloran al oeste de la cuenca del Tatio, a lo largo de la serranía de Tucle y a ambos costados en las nacientes del Río Salado. Fueron descritas informalmente por Lahsen (1969) y Youngman (1984) como una sola unidad (Serie Río Salado). Sin embargo, en el trabajo de Marinovic y Lahsen (1984) la unidad informal es dividida en dos: la subunidad superior de tobas soldadas, que se designa como Ignimbrita Río Salado y la subunidad inferior, predominantemente de lavas y otros cuerpos volcánicos, asignada a la Unidad Volcanes 1. De acuerdo a la División propuesta por Lahsen (1969) y Youngman (1984), la base de la Serie Volcánica Río Salado está compuesta por brechas, brechas tobáceas, andesitas brechosas y lavas, con espesores de hasta 70 m, cubiertas por la Ignimbrita Río

Salado (Mrs). Está Ignimbrita corresponde a casi 80 m de tobas intensamente soldadas en su localidad tipo, alcanzando hasta 170 m en las cercanías del río Toconce. La Ignimbrita Río Salado es cubierta por la Ignimbrita Sifón y ha sido datada en $9,3 \pm 0,6$ Ma (Marinovic & Lahsen, 1984).

Ignimbrita Sifón [Mioceno Superior]: Guest (1969) denominó de esta forma a los flujos ignimbríticos que se extienden desde los ríos Toconce y Salado hasta unos 10 km al norte de San Pedro; su lugar tipo se encuentra en el Sifón de Aiquina. En discordancia angular y erosiva sobre las formaciones Tuina y Purilactis y bajo la Formación Toconce. En el sector de Río Salado se dispone sobre la Ignimbrita Artola y bajo la Ignimbrita Yerba Buena. Al oeste del Tatio, sobreyace a la Ignimbrita Río Salado e infrayace a la Formación Toconce. Los espesores reportados varían entre 69 y 120 m (Marinovic & Lahsen, 1984). Las dataciones radiométricas disponibles en K/Ar en biotita entregan edades de $8,5 \pm 0,5$ y $7,8 \pm 0,3$ Ma (Baker, 1977); $9,0 \pm 1,2$ Ma (Marinovic & Lahsen, 1984); $8,3 \pm 0,4$ y $8,4 \pm 0,4$ (Naranjo, Ramírez, & Paskoff, 1994).

Ignimbrita Yerba Buena [Mioceno Superior]: Es una toba soldada de color blanco, pobre en biotita y con abundantes fragmentos líticos, que se expone típicamente al este de Pampa Vizcachita. En discordancia de erosión, sobre la Ignimbrita Sifón e infrayace, en discordancia de erosión a la Ignimbrita Pelón. Ramírez (1979) reporta un espesor de 21 m en su localidad tipo.

Ignimbrita Pelón [Mioceno Superior]: Son depósitos de tobas que se interpretan como resultado de un flujo ignimbrítico que se ubica estratigráficamente bajo la Ignimbrita Puripícar (Plioceno). La Ignimbrita Pelón se dispone sobre las Ignimbritas Sifón y Yerba Buena, subyace en discordancia de erosión, a las ignimbritas Puripícar y Chaxas, del Plioceno-Pleistoceno y está cubierta, en parte, por la Formación Vilama del Pleistoceno. Ramírez (1979), reporta espesores variables entre 13 y 24 m. Datada radiométricamente en K-Ar en biotita con $7,0 \pm 1,0$ Ma (Ramírez, 1979).

Formación Toconce [Mioceno Superior]: Secuencia de ignimbritas, principalmente brechosas y sedimentos clásticos. La base está constituida por tobas, de color gris claro a rosado, de hasta 100 m de potencia, mientras que su parte media constituida por conglomerados, areniscas y limolita (hasta 50 m de potencia). El techo de esta unidad está constituida por tobas de cristales escasamente soldadas (hasta 27 m de potencia). Esta

formación se dispone concordantemente sobre la Ignimbrita Sifón e infrayace en aparente concordancia a la Ignimbrita Puripícar. Edades radiométricas entregan un rango de edades entre los $6,8 \pm 0,3$ Ma (Lahsen & Munizaga, 1979) y $6,2 \pm 0,3$ Ma (Baker, 1977), lo que permite asignar a la parte alta del Mioceno Superior.

5.3.4.2 Ignimbritas del Plioceno - Pleistoceno

Ignimbrita Puripícar [Plioceno Superior]: Es una secuencia de tobas que se extiende, en sentido norte-sur desde el río Salado hasta la quebrada de Turipite, y en sentido oeste-este, desde Caspana-Río Junquillar hasta el campo geotermal de El Tatio, donde ha sido localizada por sondajes. Sus afloramientos más orientales se ubican al pie del cerro Colorado. De espesor medio de 20 m, alcanza un espesor máximo 250 m en la zona de El Tatio. Datada Radiométricamente en K-Ar, en biotita por $4,24 \pm 0,05$ (Rutland, Guest, & Grasty, 1965), y en $4,27 \pm 0,05$, $4,5 \pm 0,2$ Ma (Marinovic & Lahsen, 1984).

Ignimbrita Chaxas [Plioceno Superior-Pleistoceno Inferior]: Secuencia de ignimbritas asociadas al domo volcánico de Chaxas, al noreste de San Pedro de Atacama. Presenta una potencia aproximada de 50 m en el sector del domo Chaxas, más al oeste mediría 70 m (Ramirez, 1979). Los flujos piroclásticos que constituyen a ésta ignimbrita fueron emitidos a partir de una caldera elíptica, orientada norte-sur. Se dispone sobre la Ignimbrita Puripícar, del Plioceno Inferior, y bajo la Ignimbrita Cajón (Pleistoceno).

Ignimbrita Cajón [Pleistoceno]: Son depósitos piroclásticos que forman una ignimbrita constituida por varias unidades de flujos inferiores (Guest, 1968). Constituye la superficie de la Precordillera, inclinada hacia el oeste entre Chaxas y Toconao (Dingman, 1965). Sobreyace a la Ignimbrita Chaxas y al Conjunto de Volcanes II, e infrayace al Conjunto de Volcanes III (Marinovic & Lahsen, 1984). Se distribuye radialmente, a partir del Complejo Volcánico de Purico, desde donde se considera fue emitida, con una potencia máxima estimada de 250 m, acunándose hacia el oeste (Marinovic & Lahsen, 1984). Dataciones radiométricas de K-Ar en biotita en $0,8 \pm 0,1$ y $1,0 \pm 0,2$ Ma (Marinovic & Lahsen, 1984).

Ignimbrita Tatio [Pleistoceno Superior]: Es una toba soldada que aflora en el sector del valle de El Tatio. Ésta dispone, discordantemente, sobre la Ignimbrita Puripícar, se intercala entre las lavas del Conjunto de Volcanes II e infrayace al Conjunto de Volcanes III. Su espesor varía entre 40 y 60 m, en el sector del cerro Piedras Grandes, hasta aproximadamente 14 m (Ramirez, 1979). Se acunaría rápidamente hacia el oeste

(Marinovic & Lahsen, 1984). Ha sido datada radiométricamente en K-Ar en biotita en menos de 1 Ma (Lahsen & Munizaga, 1979). Además, la unidad sobreyace a Conjunto del Volcanes II, datada en $0,8 \pm 0,1$ Ma (Lahsen & Munizaga, 1979).

5.3.5 Formaciones Sedimentarias Mioceno Superior - Pleistocenas

5.3.5.1 Grupo El Loa [Mioceno Superior-Plioceno Inferior?]

Aflora en depósitos adosados a la Cordillera de Domeyko, y reconocidos principalmente en la cuenca de Calama. Originalmente fue definido como una sola formación por Fuenzalida (en Hoffstetter, et al. (1957)), y posteriormente Naranjo & Paskoff (1982) separan de ella la secuencia superior de limos, arcillas y diatomitas asignándolas a la Formación Chiu-Chiu (que no aflora en el área de estudio). Posteriormente, May, et al. (2005), redefine la Formación El Loa como un grupo compuesto por formaciones sedimentarias que representan diversas facies. Estas formaciones son: Jalquinche, Lasana, Opache y Chiquinaputo.

Las Formaciones Jalquinche y Lasana corresponden a las formaciones miocenas bajo la Ignimbrita Artola y Sifón. La formación Jalquinche corresponde a las facies más distales, reconocidas en las proximidades de Calama y está compuesta por areniscas finas rojas y limolitas con intercalaciones de evaporitas, asignadas al Mioceno Temprano a Superior por May, et al. (2005). La Formación Lasana corresponde a las facies proximales, compuesta por conglomerados y arenas gruesas y es cubierta por la Ignimbrita Artola y Sifón, lo que permite restringir su edad a Mioceno Temprano a Superior (May, et al. (2005)).

Las formaciones superiores del grupo corresponden a las Formaciones Opache y Chiquinaputo. La Formación Opache corresponde a conglomerados y areniscas cementadas con carbonatos en sus partes proximales y en las partes distales principalmente a calizas (May, et al. (2005)). La Formación Chiquinaputo corresponde a conglomerados, areniscas y limolitas que sobreyacen a la Ignimbrita Sifón y son cubiertos por la Ignimbrita Carcote data en $5,68 \pm 0,4$ Ma en Conchi, lo que sugiere una edad Mioceno Superior – Plioceno (?)(May, et al. (2005)).

5.3.5.2 Formación Vilama [Plio - Pleistoceno]

Definida por Moraga, et al., (1974) como una secuencia de areniscas y limolitas, con intercalaciones de tobas de cristales, ceniza, diatomitas y conglomerados no consolidados, que afloran típicamente en Vilama al norte de San Pedro de Atacama. Se dispone en discordancia angular, sobre las Ignimbritas Miocenas y la Formación San Pedro, descansa, en discordancia de erosión, sobre la Ignimbrita Chaxas y está cubierta por depósitos aluviales recientes (Marinovic & Lahsen, 1984).

Blanco, et al. (2000), en la columna definida fuera del área de estudio en el sector Cerro Mármol define 3 miembros para la Formación Vilama:

Miembro I (Inferior): Sucesión de 35 m de espesor de color blanquecino y cementada por carbonato de calcio, dispuesta en contacto erosional sobre la Ignimbrita Pelón. Está formada por areniscas tobáceas gruesas, con estratificación en artesa, derivada de la erosión de la Ignimbrita Pelón, areniscas gruesas guijarrosas y paraconglomerado fino con clastos de andesitas, tobas ignimbríticas, dacitas y riolitas, con indicadores de paleoflujo hacia el WNW.

Miembro II (Medio): Secuencia clástica de color café rojizo, de aproximadamente 30 m de potencia, formada por la dominancia de limolitas y fangolitas rojas, estratificadas en capas planas y delgadas, con frecuente deformación sinsedimentaria a escala centimétrica a decimétrica, y restos óseos de mamíferos y aves y coprolitos.

Miembro III (Superior): Sucesión clástica gruesa de color gris oscuro a gris rojizo, expuesta con un espesor mínimo de 13 m. Se deposita en contacto concordante y transicional sobre las areniscas y fangolitas del Miembro II y está cubierto, en discordancia angular y de erosión, o disecado por depósitos aluviales cuaternarios que cubren a la Ignimbrita Cajón. Está formado por ortoconglomerados medios, con estratificación masiva o cruzada en artesa, de base erosiva, en niveles de 30-50 cm de espesor.

Blanco, et al., (2000) y Mpodozis, et al. (2000), presentan una edad de 3.7 ± 1.0 Ma cerca de la base de la formación al oeste de San Pedro de Atacama, mientras que Naranjo, et al. (1994) presenta una edad K/Ar de 2.0 ± 0.9 Ma en depósitos de ceniza intercalados dentro de la formación.

De acuerdo a Blanco, et al., (2000), las relaciones de contacto observadas en la zona norte de la Cordillera de la Sal indican que la Formación Vilama se apoya discordante sobre las Ignimbritas Artola (~ 10 Ma) y Sifón (~8 Ma), mientras que a lo largo del Llano de la Paciencia y el Cordón Bayo sobreyace en discordancia de erosión a la Ignimbrita Pelón (~7 Ma, Figura 5-2 A, B y C).

La Formación Vilama cubre en discordancia de erosión a la Ignimbrita Chaxas, de edad pliocena superior-pleistocena inferior, y cubierta por depósitos aluviales no consolidados (Unidad Gravas Negras), por lo que se le asigna a la Formación Vilama una edad Plioceno - Pleistocena. Correlacionable con la Formación Chiu-Chiu (Naranjo & Paskoff, 1982).

5.3.5.3 Depósitos Lacustres de Machuca [Pleistoceno Superior]

Definidos por Ramírez (1979), corresponde a una secuencia estratigráfica constituida principalmente por tobas de lapilli y ceniza, diatomitas, arenas gruesas y gravas, y evaporitas menores que afloran en la depresión de Machuca, al sur del poblado y al este del cerro Alto Machuca.

La matriz de estos depósitos está constituida principalmente por pómez de tamaño lapilli y ceniza. Además se reconoce una laminación fina y estratificación cruzada que sugiere la depositación de material piroclástico en un ambiente lacustre. Ramírez (1979) le asigna una edad Pleistoceno Superior.

5.3.6 Depósitos No Consolidados o Parcialmente Consolidados

5.3.6.1 Depósitos Fluvio - Aluviales

Depósitos Fluviales Antiguos: Principalmente gravas y arenas ubicadas próxima a los causes principales. Se observan en las terrazas superiores de los valles ya inactivos. En el mapa se observan en los valles activos hacia el suroeste.

Depósitos Aluviales Antiguos: Son antiguos abanicos aluviales y otros depósitos a fin ya inactivos y erodados por los procesos cuaternarios. Ubicados principalmente hacia el norte del área de estudio, al este y oeste de las Gravas Negras y de la Ignimbrita Sifón.

Depósitos Aluviales de Valle: Corresponden a gravas finas, arenas gruesas y finas, limos y arcillas, redondeados y mal seleccionados que se depositan a la salida de los principales

ríos y quebradas, conformando las facies clásticas del Salar de Atacama. Se les asigna una edad Pleistoceno Superior – Holoceno.

Depósitos Aluviales Activos: Corresponden a depósitos que se forman cuando las quebradas por donde bajan los flujos torrenciales se abren hacia llanuras de inundación o hacia terrazas fluvio-aluviales de cauces mayores. Al perder su energía por la menor pendiente, los flujos torrenciales, de barro o de detritos, depositan su carga sólida con bloques y gravas en el ápice de los abanicos y disminuyendo la granulometría hacia las zonas distales. Estos depósitos están compuestos por sedimentos de granulometría variable, generalmente con clastos angulosos a sub-angulosos inmersos en una matriz limo-arcillosa que los soporta.

Depósitos Fluviales Activos: Corresponde a los depósitos no consolidados ubicados en los cauces de ríos principales, incluye también las terrazas fluviales bajas que muestran evidencias de ser inundados durante eventos extremos. Estos cauces han sido formados por procesos principalmente fluviales y eventualmente aluviales, los que han disectado las formas preexistentes y contribuido a modelar los valles actuales. Estos depósitos están constituidos principalmente por bolones, gravas con clastos redondeados a sub-redondeados y de buena selección, clasto-soportante, con una matriz arenosa.

5.3.6.2 Depósitos Lacustres y de vegas [Holoceno]

Están constituidos por tobas, gravas, arenas gruesas con estratificación cruzada y delgadas capas de diatomitas y limos con ostrácodos. Depositados en cuencas intermontanas, con un marcado control estructural.

5.3.6.3 Depósitos Coluviales [Holoceno]

Los depósitos coluviales, que son producto principalmente de procesos gravitacionales, están formados por una mezcla entre materiales que forman un regolito, producido por la meteorización de la roca subyacente durante los períodos húmedos, y materiales que se han deslizado y caído por gravedad desde laderas empinadas y cornisas, probablemente debido a los movimientos sísmicos frecuentes en la región. Estos depósitos están compuestos por sedimentos con clastos angulosos, textura caótica y mala selección, con granulometría variada desde bloques y gravas hasta partículas finas del tipo limo-arcilla. En general, presentan formas cónicas con una suave concavidad y pendientes uniformes pero ligeramente onduladas.

5.3.6.4 Depósitos de Remoción en Masa [Pleistoceno Superior (?) – Holoceno]

Se ubican en las paredes de los valles, generalmente asociado a eventos gravitacionales de distinta envergadura. Son comúnmente producidos por eventos telúricos y colapsos estructurales de tanto los macizos rocosos como de los sedimentos no consolidados.

5.3.6.5 Depósitos de Avalancha Volcánica

Ubicados al norte del área de estudios, en el sector oriental, en la Cordillera de los Andes, sobre los 4.3000 m.s.n.m., en el flanco sureste del volcán El Tatio, sobreyaciendo la Ignimbrita El Tatio. Son depósitos aluviales no consolidados volcanoclásticos, con un incipiente desarrollo piroclástico.

5.3.6.6 Depósitos Evaporíticos

Corresponden a limos y arcillas de color generalmente pardo, de delgadas y escasas intercalaciones de diatomitas; tienen un alto contenido de yeso y/o cloruro de sodio. Estos limos salinos se depositaron en pequeñas cuencas endorreicas, ubicadas a una altura variable entre 2.370 y 2.470 m.s.n.m. El depósito más importante se ubica extensamente en el Salar de Atacama.

En las partes más elevadas del salar se encuentran los depósitos más gruesos, gravas y arenas gruesas principalmente, con mala selección y clastos angulosos. A medida que se baja en altura y alejándose de las salidas de las quebradas, se observa cómo va disminuyendo el tamaño de grano, mejorando la selección de los clastos y la esfericidad. En la parte más baja de la cuenca se observa un predominio de arenas finas, limos y arcillas que engranan con los depósitos evaporíticos. Se puede observar que los limos y arcillas se encuentran cementados por carbonatos, yeso y halita principalmente. En algunos sectores se pueden reconocer polígonos de desecación, que con el tiempo tienden a formar **morfologías que fueron descritas como "costras" por Moraga et al. (1974) y Bevacqua (1992).**

Las "costras" corresponden a polígonos de desecación deformados por la precipitación de sales dentro de las grietas. Esto se produce cuando el agua asciende por capilaridad, se evapora hasta el punto de saturación de una sal dada lo que provoca la precipitación del mineral. Como el espacio es limitado, los cristales solo pueden crecer hacia arriba,

generando una presión que levanta y deforma los polígonos de desecación, generando el aspecto de "costra".

Las evaporitas reconocidas en la parte baja de la cuenca siguen la siguiente secuencia de saturación y precipitación: primero, se concentran los carbonatos precipitando calcita, luego los sulfatos, precipitando yeso y anhidrita, y finalmente los cloruros, que precipitan principalmente halita. A continuación se presenta una descripción de las unidades evaporíticas, basado en Bevacqua (1992), Salas et al. (2009) y Cornella et al. (2009):

Costras de carbonatos y sulfatos: Corresponden a las facies evaporíticas más marginales, asociadas en general a aguas poco evaporadas, que se encuentran en engrane lateral con los depósitos aluviales. Se reconocen carbonatos con texturas oolíticas y travertínicas, sulfatos en menor cantidad y materia orgánica (principalmente algas y diatomeas). Se encuentran rodeando las distintas lagunas e intercaladas entre la costra detrítico-evaporítica y la de sulfatos.

Costra de sulfatos: se compone de yeso y anhidrita y en menor proporción, cloruros. Corresponde a una facie intermedia entre los carbonatos y los cloruros.

Costra de cloruros: está formada principalmente por halita y corresponde a las facies más evaporadas. La zona donde esta costra es más pura en halita (llegando hasta el 90% en cloruro sódico) se llama núcleo salino (Moraga, Chong, Fortt, & Henríquez, 1974).

5.4 Estructuras

El Salar de Atacama corresponde a una cuenca tectónica compresiva, delimitada por fallas inversas que afectan las rocas desde el basamento paleozoico hasta la cobertura actual (Kuhn (2002), Mpodozis, et al. (2005), Arriagada, et al. (2006), Jordan, et al. (2002) y (2007)). El espacio generado en los movimientos de estas fallas ha controlado desde el Mesozoico la depositación de las distintas formaciones reconocidas en el área, así como la morfología actual de la cuenca (Mpodozis, et al. (2005), Arriagada, et al. (2006)).

El principal estilo estructural reconocido en la cuenca del Salar de Atacama corresponde a fallas inversas de vergencia este, de rumbo aproximado NS a NNE (Flint, et al., (1993), Pananont, et al., (2004), Arriagada, et al. (2006), Cembrano, et al. (2007), Aron, et al.

(2008), González, et al. (2009)). Las estructuras del sector son, desde oeste hacia el este, las siguientes (Figura 5-1 y Figura 5-2):

5.4.1 Fallas y pliegues de la Cordillera de Domeyko

El borde oriental de la Cordillera de Domeyko corresponde a un escarpe, de unos 900 m de alto (Escarpe del Bordo), que expone rocas que cubren desde el Paleozoico hasta el Neógeno, alzado por fallas inversas. Hacia el norte, el Escarpe el Bordo es reemplazado por el Alto Barros Arana, conformado por sedimentos rojos del grupo Purilactis y de la Formación San Pedro, plegados en forma sinclinal (Flint, et al., (1993), Pananont, et al., (2004), Arriagada, et al., (2006), Cembrano, et al. (2007), González, et al., (2009)).

5.4.2 Fallas y pliegues de la Cordillera de la Sal

Corresponde a estructura tipo faja plegada de orientación SSW-NNE, de 5-10 km de ancho, en la que se exponen las secuencias continentales rojas del Oligoceno-Mioceno. Estas series están afectadas por un sistema de pliegues NNE-SSW de ejes buzantes hacia el norte en arreglos en échelon, sistemas complejos de fallas verticales de pequeña escala, y fallas inversas de bajo ángulo de orientación NNE-SSW (Flint, et al., (1993), Arriagada, et al., (2006), Cembrano, et al. (2007)).

5.4.3 Sistema de Falla del Salar de Atacama

Aflora principalmente en el borde oriental del Cordón de Lila, generando una pequeña faja plegada y corrida de vergencia este que se expone en los cordones de Tilopozo y Tilomonte. Al norte del Cordón de Lila, este sistema de falla se ha reconocido a través de una serie de perfiles sísmicos realizados por ENAP y estudiados posteriormente por Muñoz, et al. (2002), Arriagada (2003), Arriagada, et al., (2006), Jordan, et al. (2002) y (2007). De acuerdo a estos autores, el sistema de falla del Salar de Atacama, corresponde a fallas inversas subverticales de vergencia este, que alzan el Cordón de Lila, morfoestructura que actúa como pistón, lo que genera la faja plegada y corrida de Tilopozo. Este sistema afecta tanto a los depósitos salinos del salar como a las ignimbritas neógenas reconocidas en superficie.

5.4.4 Sistema de Falla Miscanti

Se desarrolla en el límite oriental de la cuenca del Salar de Atacama, y corresponde a fallas inversas de vergencia este que afectan a las ignimbritas neógenas, y que generan pequeñas

depresiones donde esta ingnimbrita se emplaza. Un ejemplo de lo anterior corresponde a la laguna Miscanti (Kuhn (2002), Aron, et al., (2008), González, et al., (2009).

En la Figura 5-2, se presentan las secciones geológicas oeste-este presentadas por Arriagada, et al., (2006). En el eje izquierdo se presenta la escala en metros, en el eje derecho se presenta la escala en segundos TWT (two way travel time). Ubicación de las secciones en planta se presenta en la Figura 5-1.

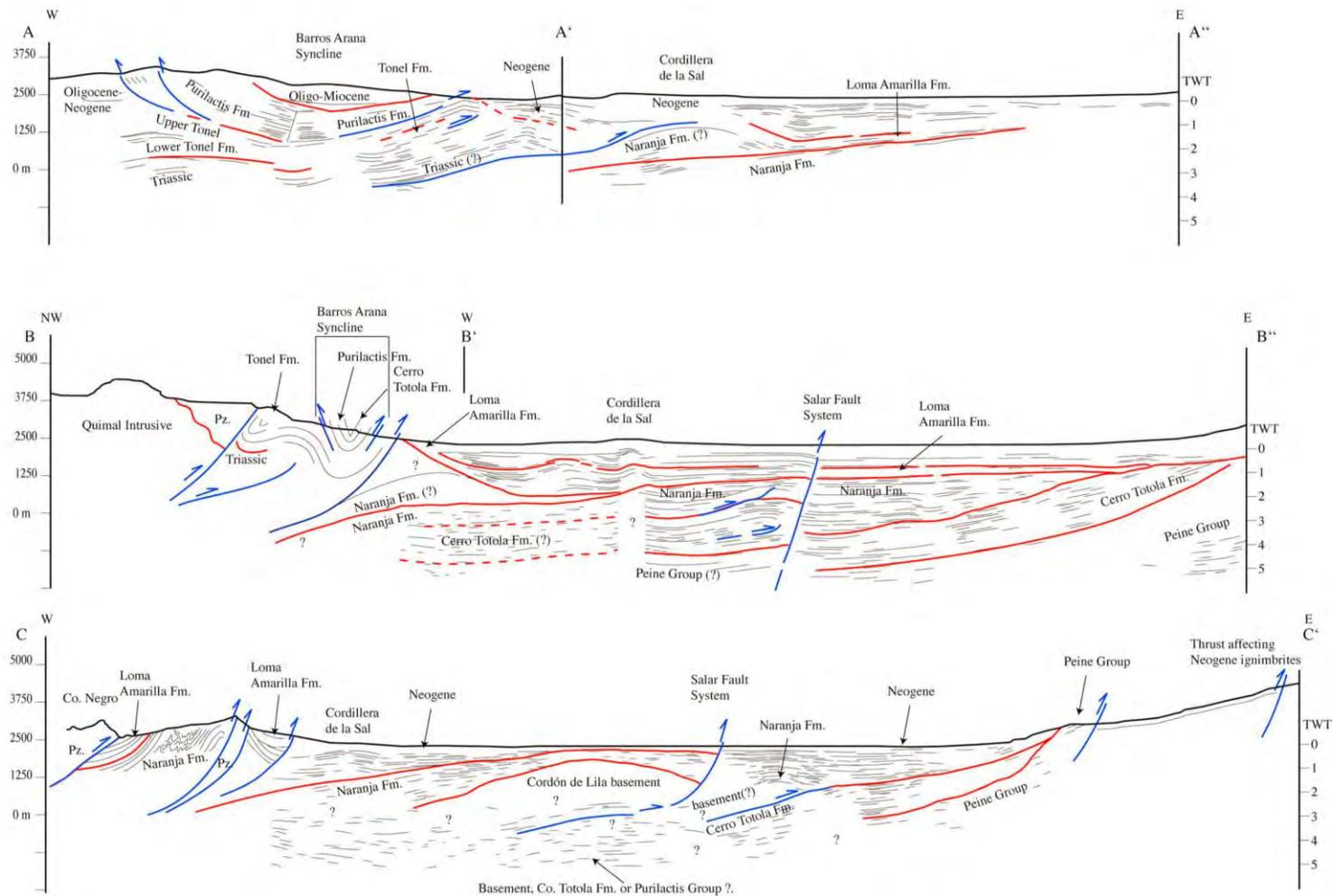


Figura 5-2 Secciones geológicas oeste-este presentadas por Arriagada, et al., (2006). Se presenta ubicación de las secciones en Figura 5-1. Fuente: Arriagada, et al. (2006)

5.5 Geología en Subsuperficie

5.5.1 Información disponible a partir de sondajes

La geología en Subsuperficie ha sido descrita a través de varios sondeos verticales y la construcción de perfiles geológicos por Díaz del Río (1972), Dalannais (1979), EDRA (1997), SQM (2005), NX UNO PEINE (2008). Cornellá et al. (2009), y Salas et al. (2009), cuya ubicación se presenta en la Figura 5-3. Díaz del Río (1972) y Dalannais (1979) mapearon los desechos recuperados durante la perforación de los pozos de exploración del **margen oriental del Salar de Atacama en la década de los 60's y 70's por el proyecto CHI-535** del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y la CORFO.

EDRA (1997) realizó una campaña de sondeos verticales para la compañía minera Riochilex, en el sector norte del Salar de Atacama. Por otro lado, SQM (2005) y NX UNO de Peine presentan sondajes verticales tanto en el núcleo del Salar de Atacama como en sus zonas marginales.

A grandes rasgos, en subsuperficie se reconocen las mismas unidades reconocidas en superficie, pero con fuertes variaciones laterales de facies y engranes laterales entre las distintas unidades (ver Figura 5-4), los que se encuentran asociados a cambios en el volumen de agua disponible en la cuenca. De manera general, mientras mayor sea el contenido de agua disponible, los depósitos aluviales y facies marginales de carbonatos avanzarán más hacia el núcleo del Salar. En cambio, en períodos secos, el área que cubre el núcleo de halita será mayor.

Por otro lado, en los perfiles elaborados por Díaz del Río, et al. (1972) (Figura 5-5 y Figura 5-6, se observa la continuidad norte sur en las unidades reconocidas en subsuperficie en el borde este del Salar, reconociéndose al menos una gran unidad aluvial emplazada sobre una Ignimbrita y arcilla. Bajo esta unidad se reconocen nuevamente depósitos aluviales, que engranan hacia el oeste con los depósitos evaporíticos del salar (Figura 5-4 y Figura 5-7).

Por último, en el presente estudio se realizó una recopilación de las estratigrafías provenientes de los estudios anteriores con lo que se elaboraron cuatro secciones geológicas. La ubicación en planta de estas secciones se presenta en la Figura 5-1. En la Figura 5-8, se presenta una sección de orientación N-S. Esta sección se ubica sobre el

margen aluvial del Salar de Atacama. Es posible identificar dos unidades principales. La primera corresponde a depósitos aluviales gruesos, bajo esta unidad se dispone localmente y en forma discontinua en el margen una unidad arcilla-ceniza. En la Figura 5-9 se presenta una sección W-E, que se dispone sobre el núcleo del Salar hasta el margen este. Es posible observar una interdigitación entre las unidades de halita, sulfatos, carbonatos y los depósitos aluviales de oeste a este respectivamente. Es importante destacar que pozo Socaire-2 llega al basamento en los últimos metros de sondaje. En la Figura 5-10 se muestra un perfil oeste-este. Se observa la misma disposición de las unidades de halita, sulfatos, carbonatos y depósitos aluviales interdigitados de oeste-este descritos en la figura anterior. Por último en la Figura 5-11 se presenta un perfil oeste a este ubicado en la zona norte del salar. Es posible observar que predomina un ambiente aluvial donde se observan unidades de arcilla-ceniza interdigitadas localmente.

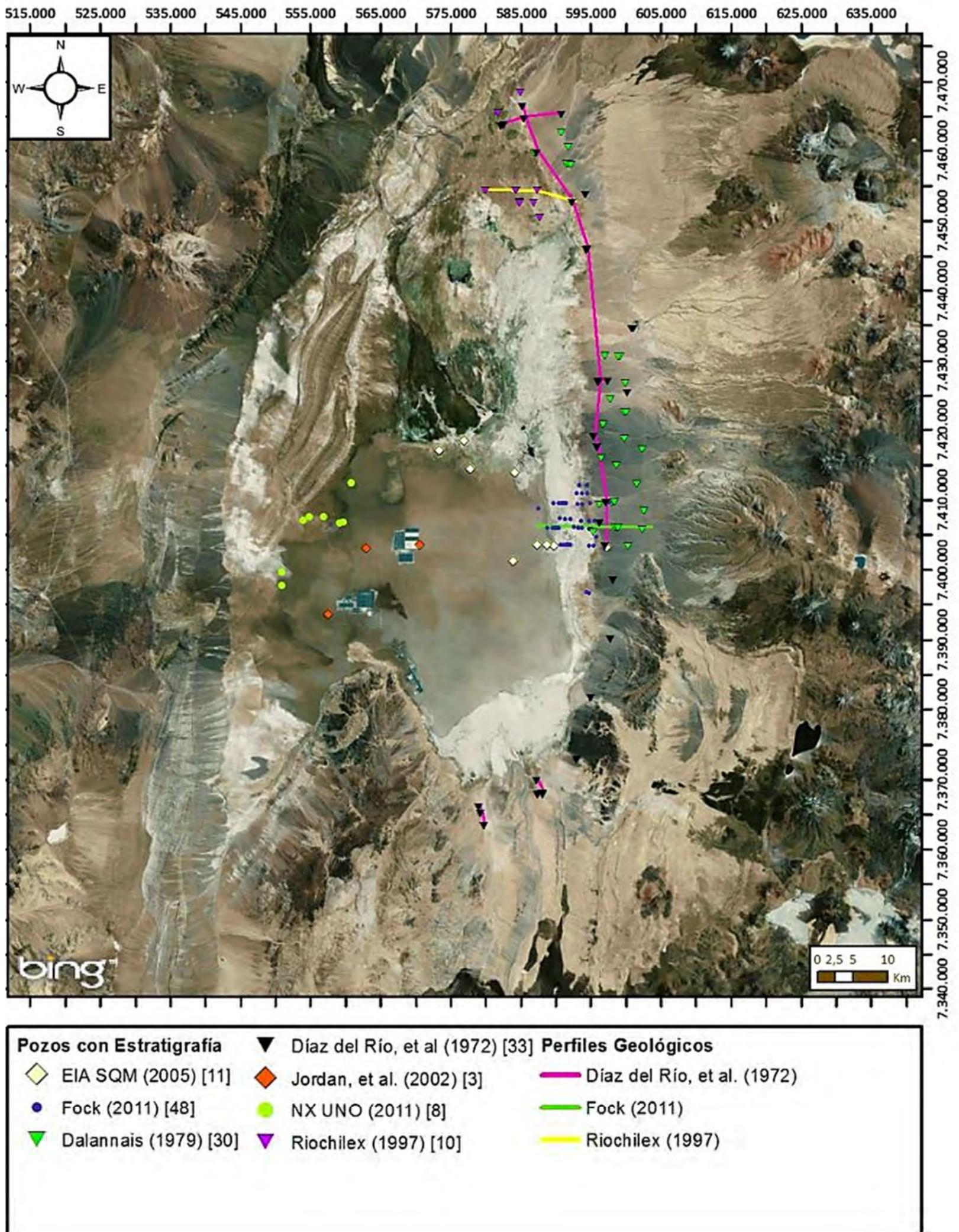


Figura 5-3 Ubicación de Sondajes con estratigrafía y ubicación de perfiles geológicos

Fuente: Elaboración Propia

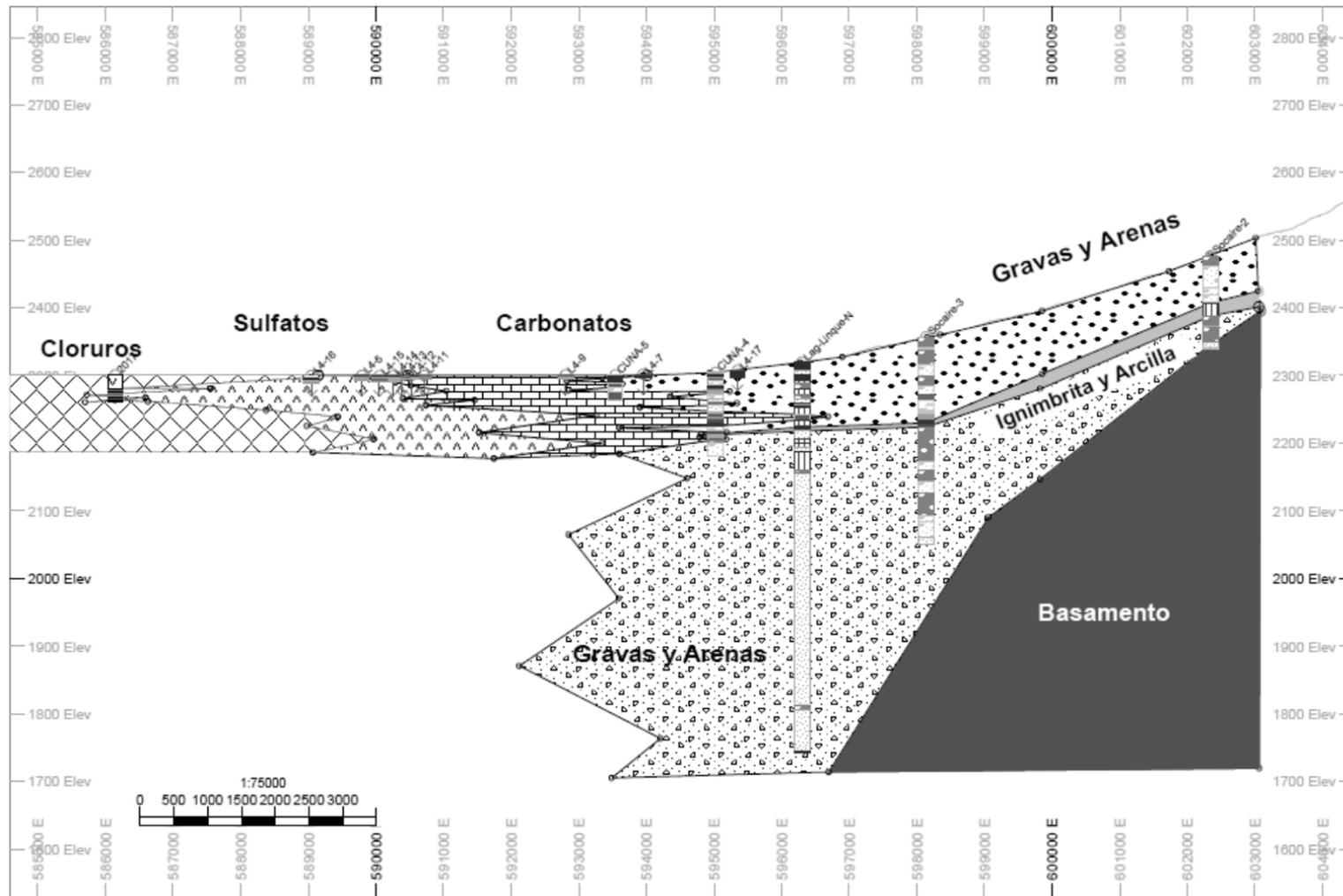


Figura 5-4 Perfil W-E en elaborado por Fock 2011. Fuente: Fock (2011).

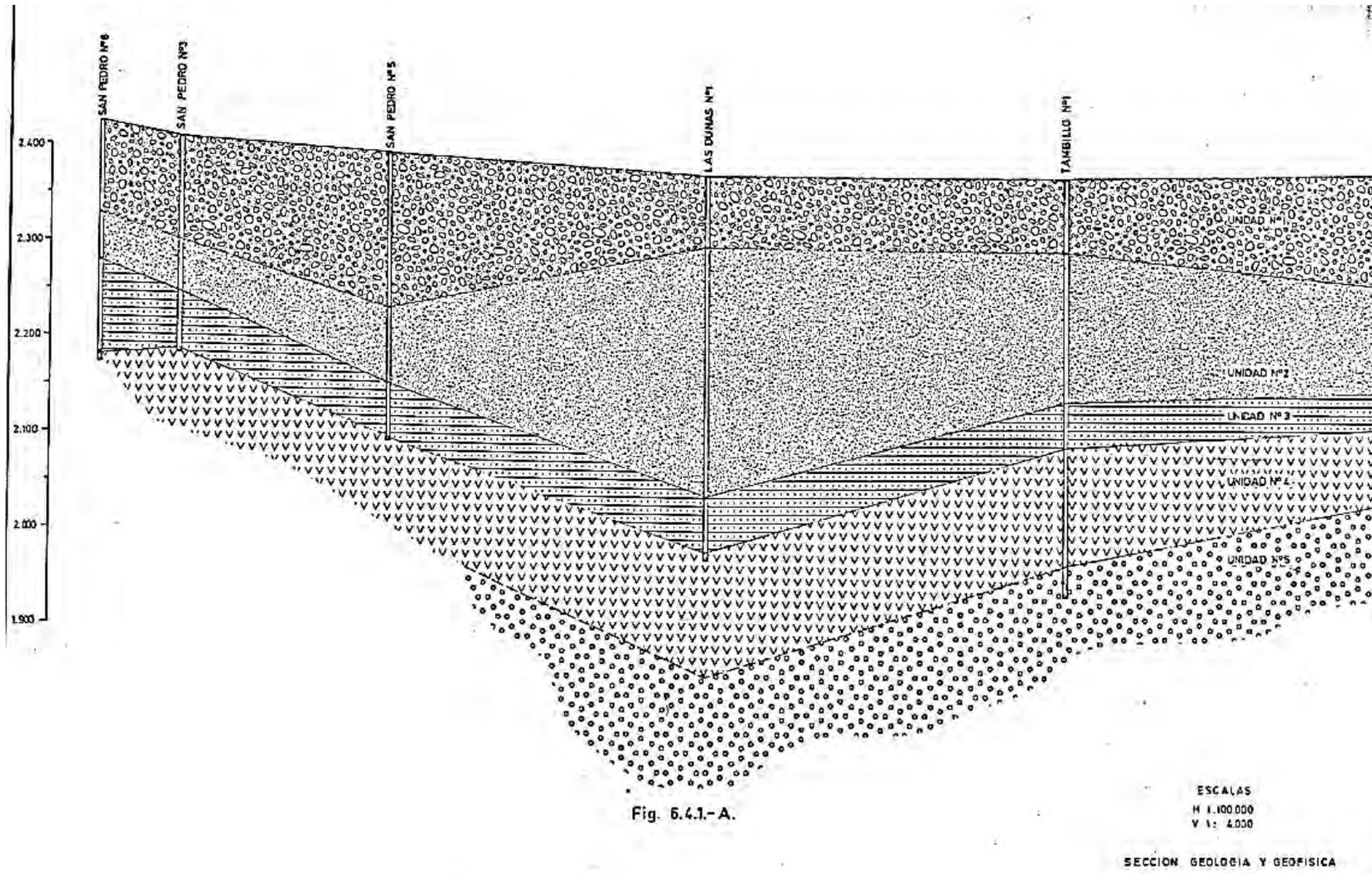


Figura 5-5 Sección Geológica N-S elaborada por Díaz del Río, et al. (1972)

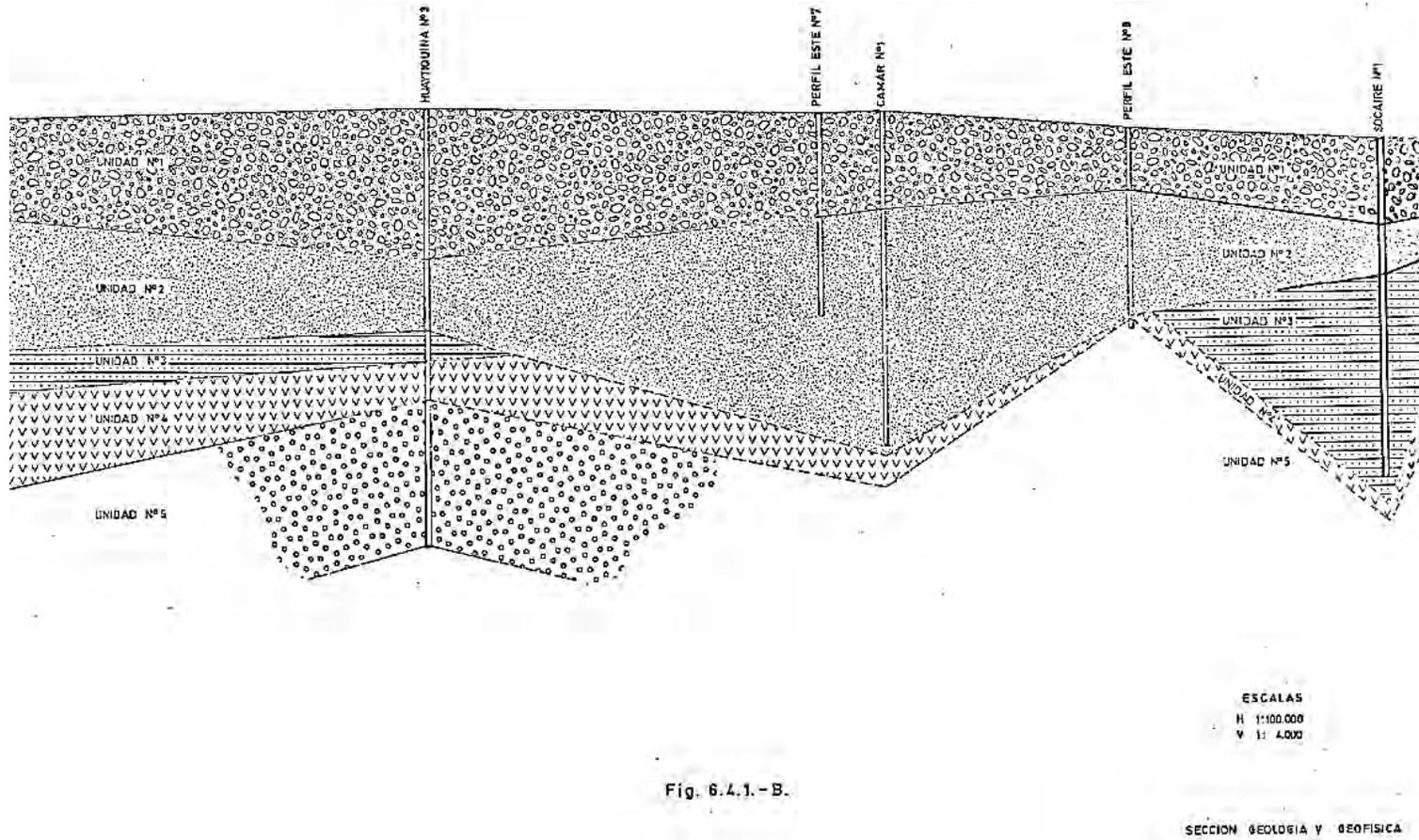


Fig. 6.4.1.-B.

Figura 5-6 Sección Geológica N-S elaborada por Díaz del Río, et al. (1972). Continuación.

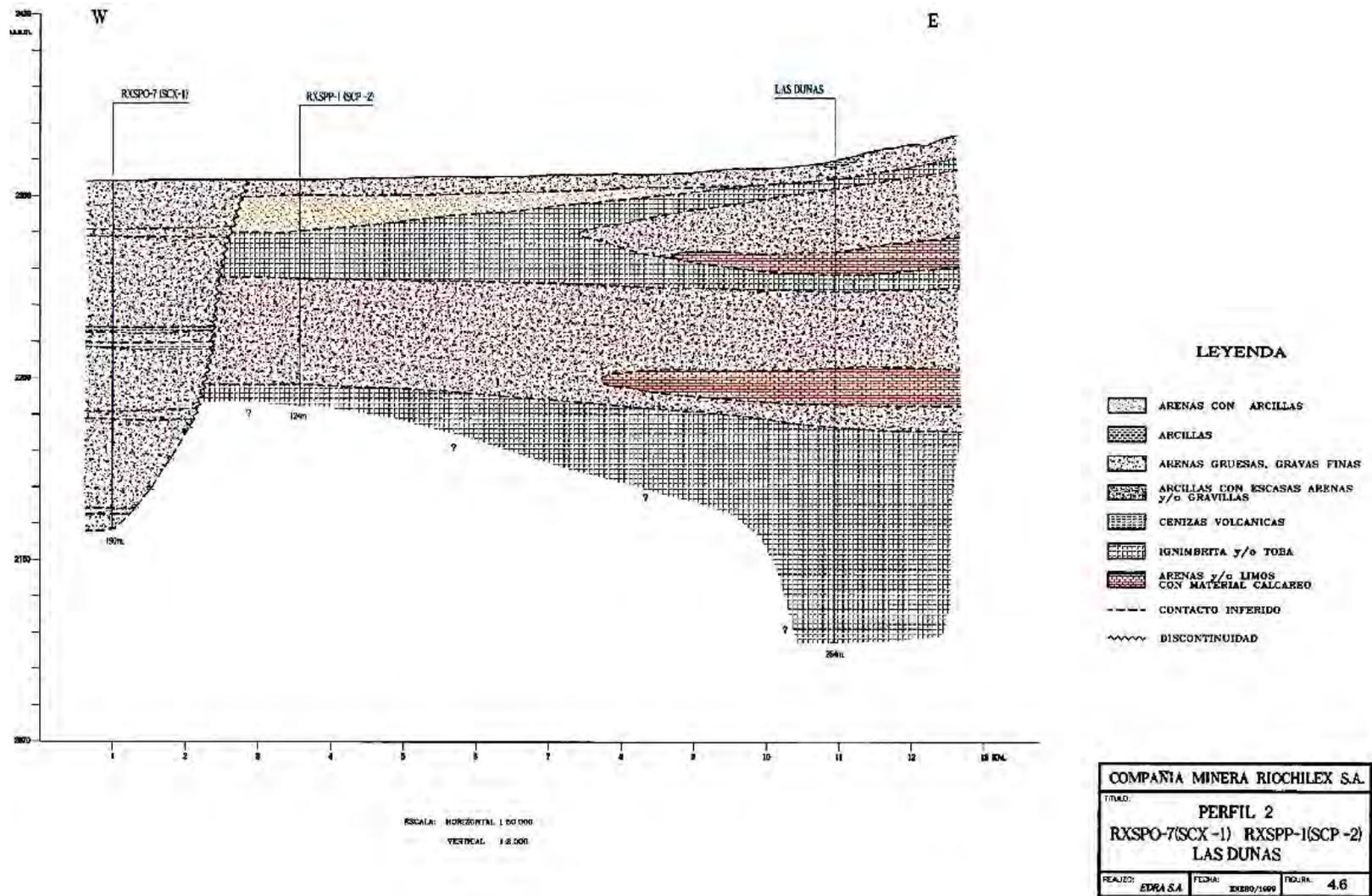


Figura 5-7 Perfil W-E en el norte del Salar elaborado por EDRA (1997)

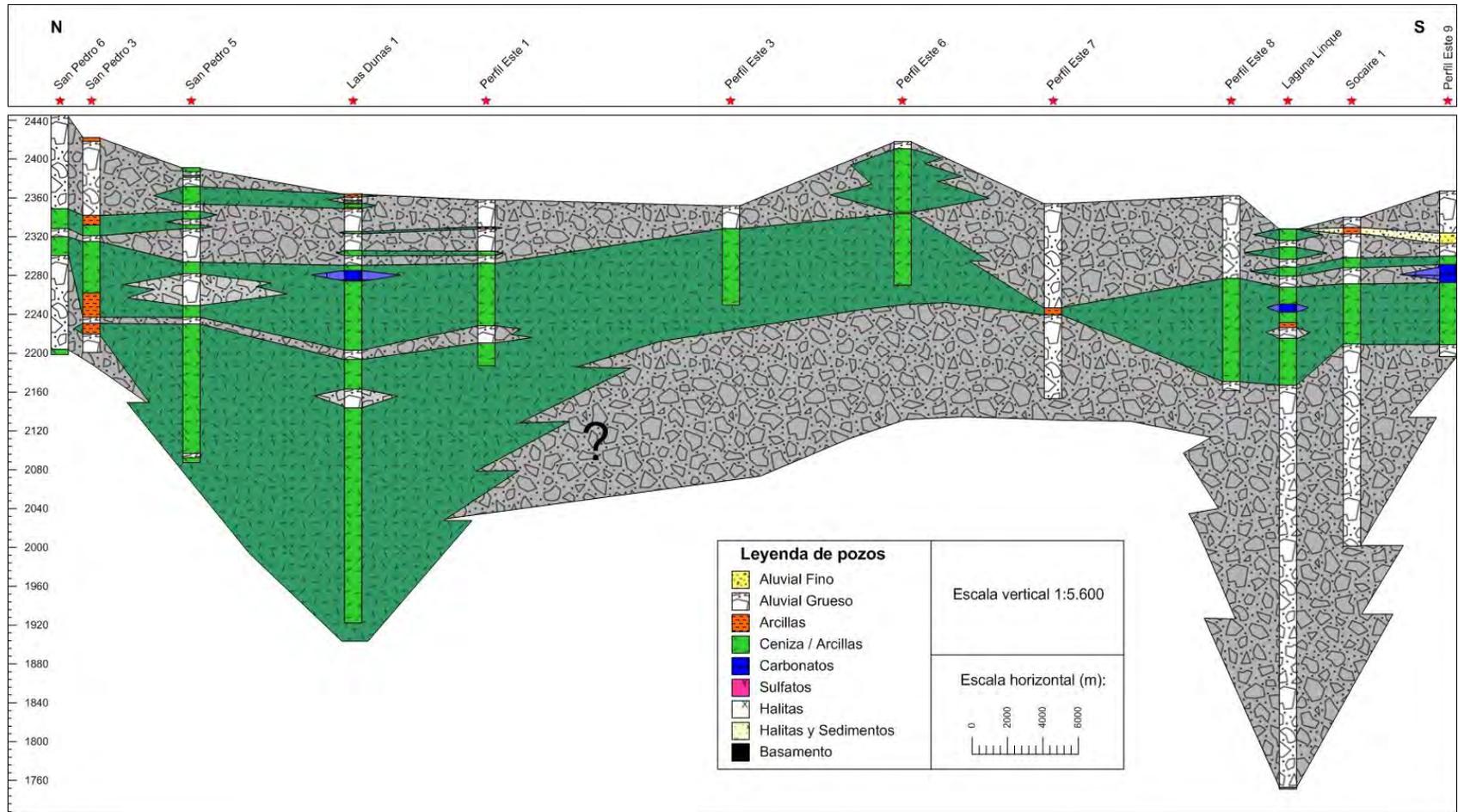


Figura 5-8 Perfil geológico N-S

(Elaboración propia)

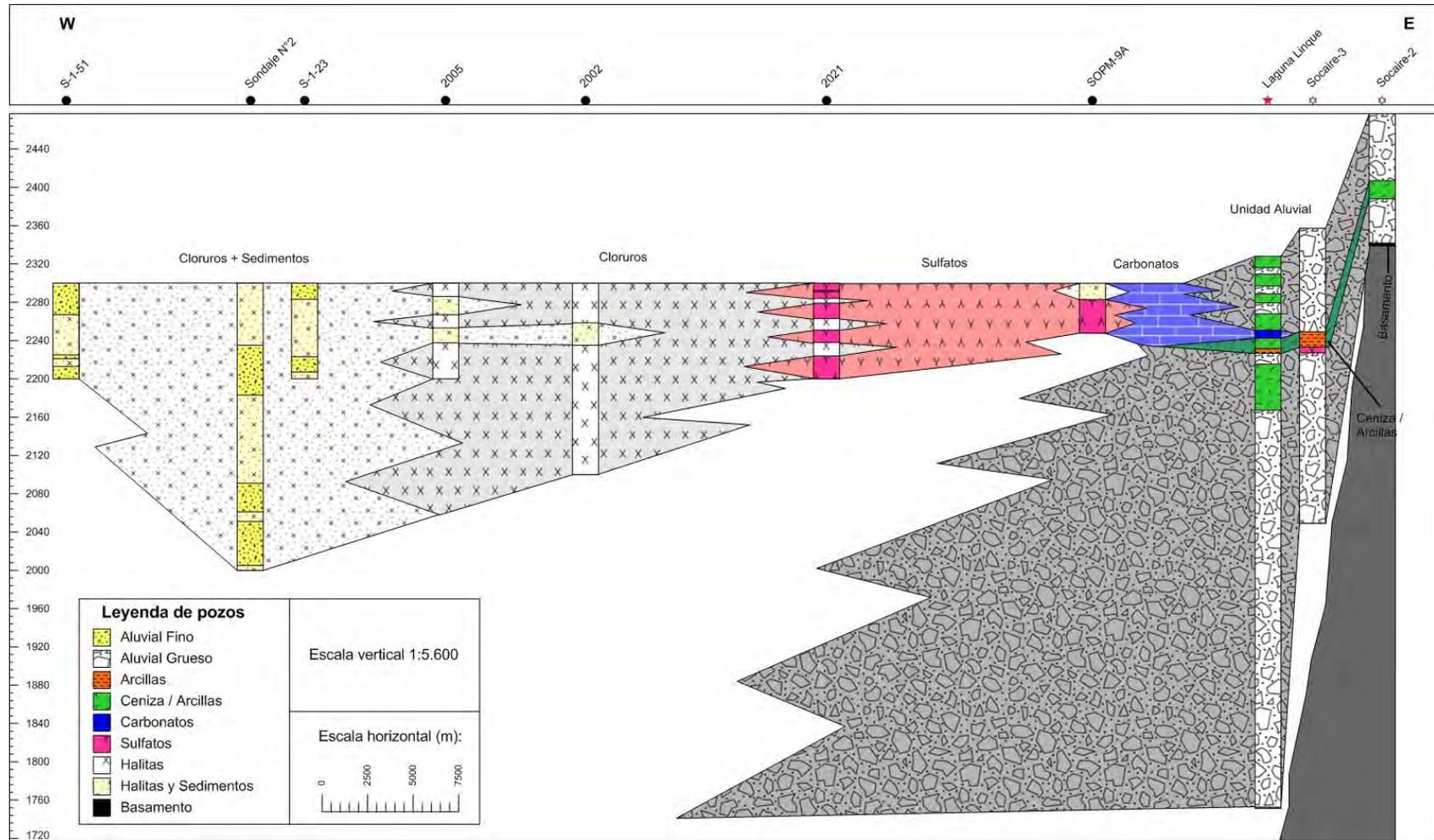


Figura 5-9 Perfil geológico WE1

(Elaboración propia)

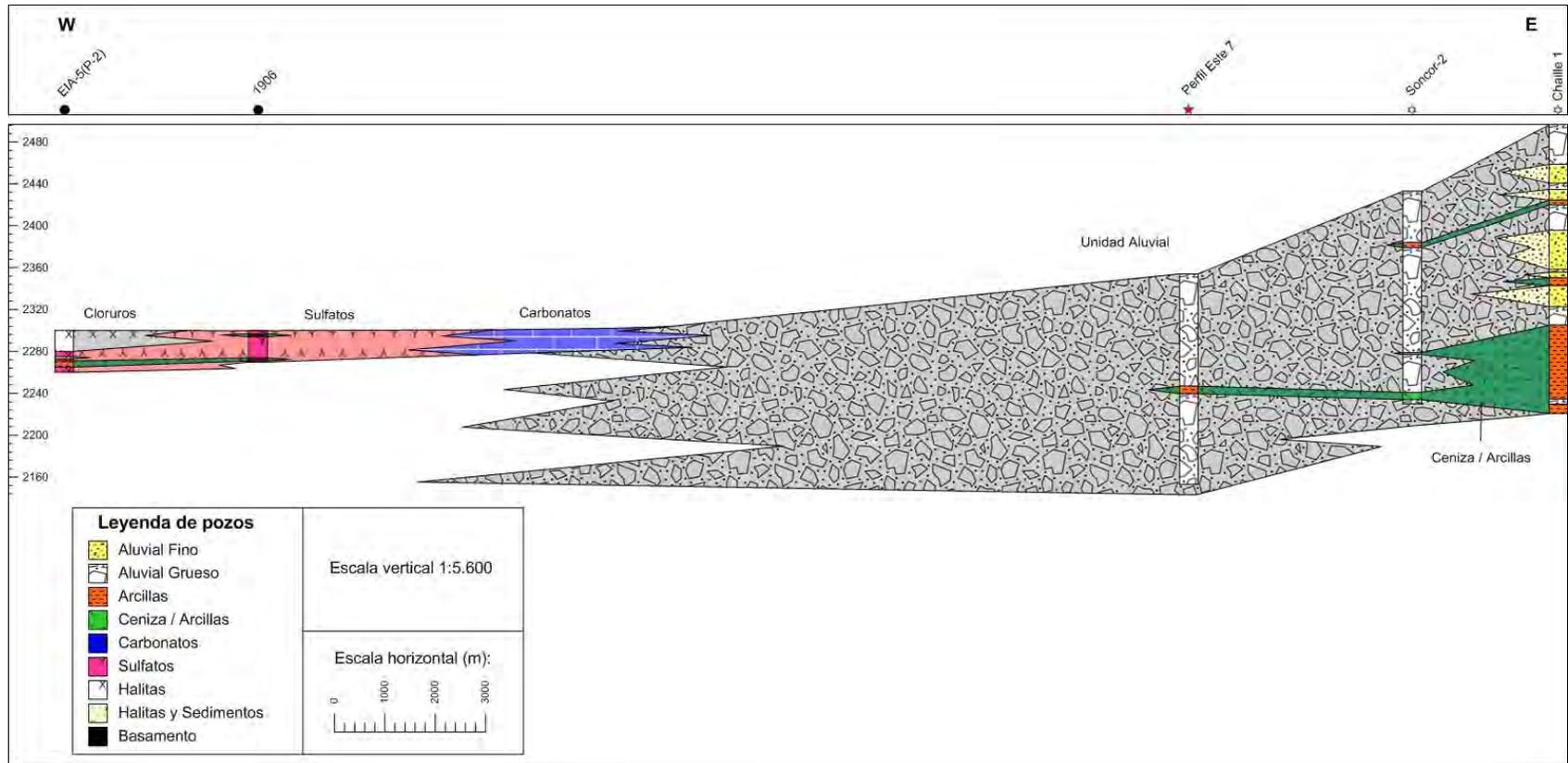


Figura 5-10 Perfil geológico WE2

(Elaboración propia)

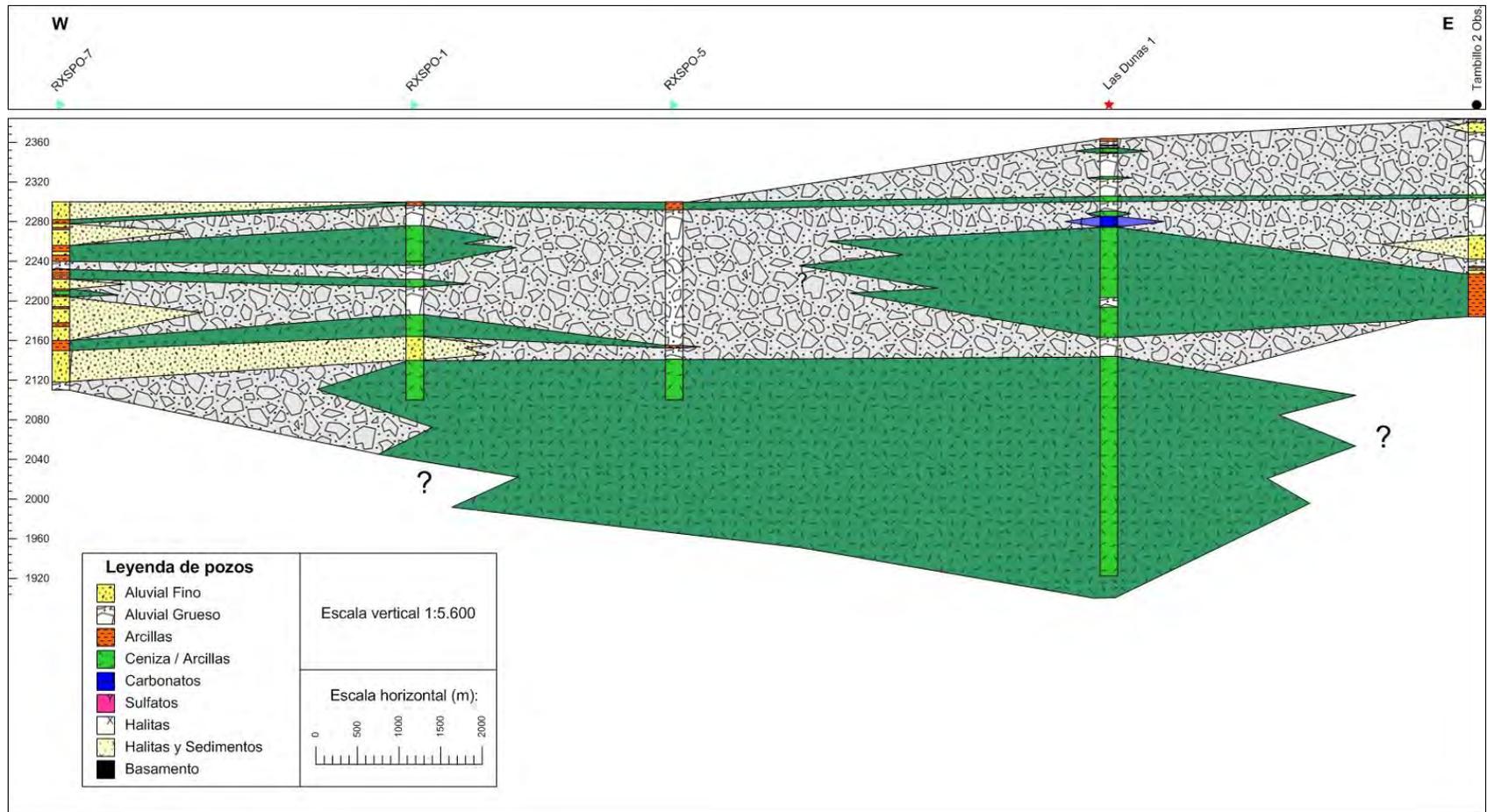


Figura 5-11 Perfil geológico WE3

(Elaboración propa)

5.5.2 Información disponible a partir de campañas geofísicas

5.5.2.1 Sísmica de refracción

En el área de estudio se encuentran disponibles perfiles sísmicos de refracción elaborados por la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP) y posteriormente estudiados por Jordan et al., (2002 y 2007), Muñoz et al. (2002), y Arriagada et al. (2006).

En la Figura 5-12 se presenta el perfil 1g022, en el núcleo del Salar de Atacama, donde se ven las principales fallas inversas que controlan la depositación de las secuencias evaporíticas y continentales del Salar de Atacama, la profundidad del basamento, el plegamiento que afecta a la cordillera de la Sal y el engrane lateral entre la secuencia evaporítica superior y las facies aluviales.

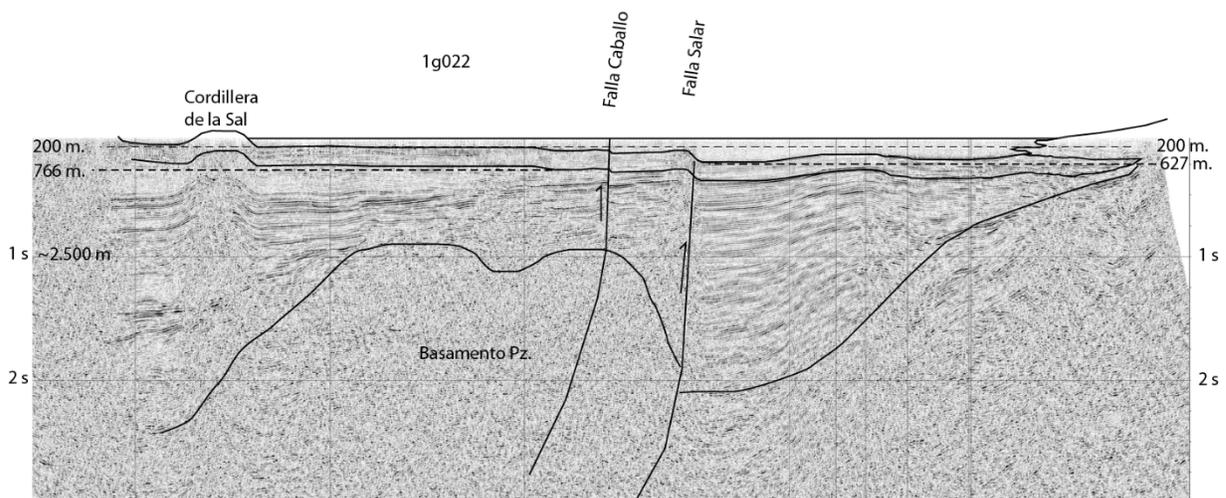


Figura 5-12 Perfil de refracción sísmico 1g022. Fuente: Arriagada et al. (2006)

5.5.2.2 Perfiles de Transiente Electromagnético (TEM)

Dentro del área de estudio se han elaborado una serie de perfiles de transiente electromagnético (TEM), ubicados en la zona marginal del Salar de Atacama. Estos estudios buscan en general caracterizar la estratigrafía, la geometría del acuífero y por lo tanto contribuyen a delimitar las unidades hidrogeológicas, descritas más adelante en el presente informe. Además posible utilizar esta técnica es de medición es útil para identificar la interfaz de la cuña salina.

Evaluación Hidrogeológica Acuífero Sector Norte Salar de Atacama. EDRA para Compañía Minera Riochilex (1997). Corresponde a 139 estaciones TEM y 17 perfiles realizados en el sector norte del Salar de Atacama (Figura 5-13).

Estudio Geofísico Transiente Electromagnético (TEM). Margen Oriental Salar de Atacama. Antofagasta, II Región de Chile. COMINOR Ingeniería y Proyectos S.A. Este estudio geofísico se desarrolló entre las localidades de Toconao y Peine y consistió en un conjunto de 32 perfiles geofísicos con un total de 191 sondeos de Transiente Electromagnético (TEM), (Figura 5-13).

Estudio Geofísico Transiente Electromagnético (TEM) Sector Borde Oeste Salar de Atacama. Recopilación años 2004 – 2006 – 2007. COMINOR S.A. Este estudio contiene los resultados de los estudios geofísicos de Transiente Electromagnético (TEM) realizados por GEODATOS en el borde oeste del Salar de Atacama entre los años 2004 a 2007 (Figura 5-13).

Estudio Geofísico Transiente Electromagnético TEM y Nano TEM Sector Soncor. SLM NX Uno de Peine. Este estudio tuvo como objetivo determinar las características geoelectricas de subsuperficie, que permiten conocer la estratigrafía y espesor del acuífero que se desarrolla en el sector de Soncor. Consistió en la medición de 55 estaciones Nano TEM formando 14 perfiles geofísicos, ubicados en forma perpendicular a las lagunas. En 4 de las estaciones se realizó una medida de TEM (Figura 5-13).

Estudio hidrogeológico de la zona marginal del salar de atacama sectores Quelana y Borde Norte. Durante la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental (2005), DICTUC S.A. solicitó a Geodatos Ltda. la elaboración de una serie de perfiles TEM en las zonas marginales del Salar de Atacama. Destaca el perfil realizado en el sector Aguas de Quelana, que corresponde a la interacción entre el núcleo del Salar de Atacama y los depósitos aluviales del borde Este (Figura 5-13).

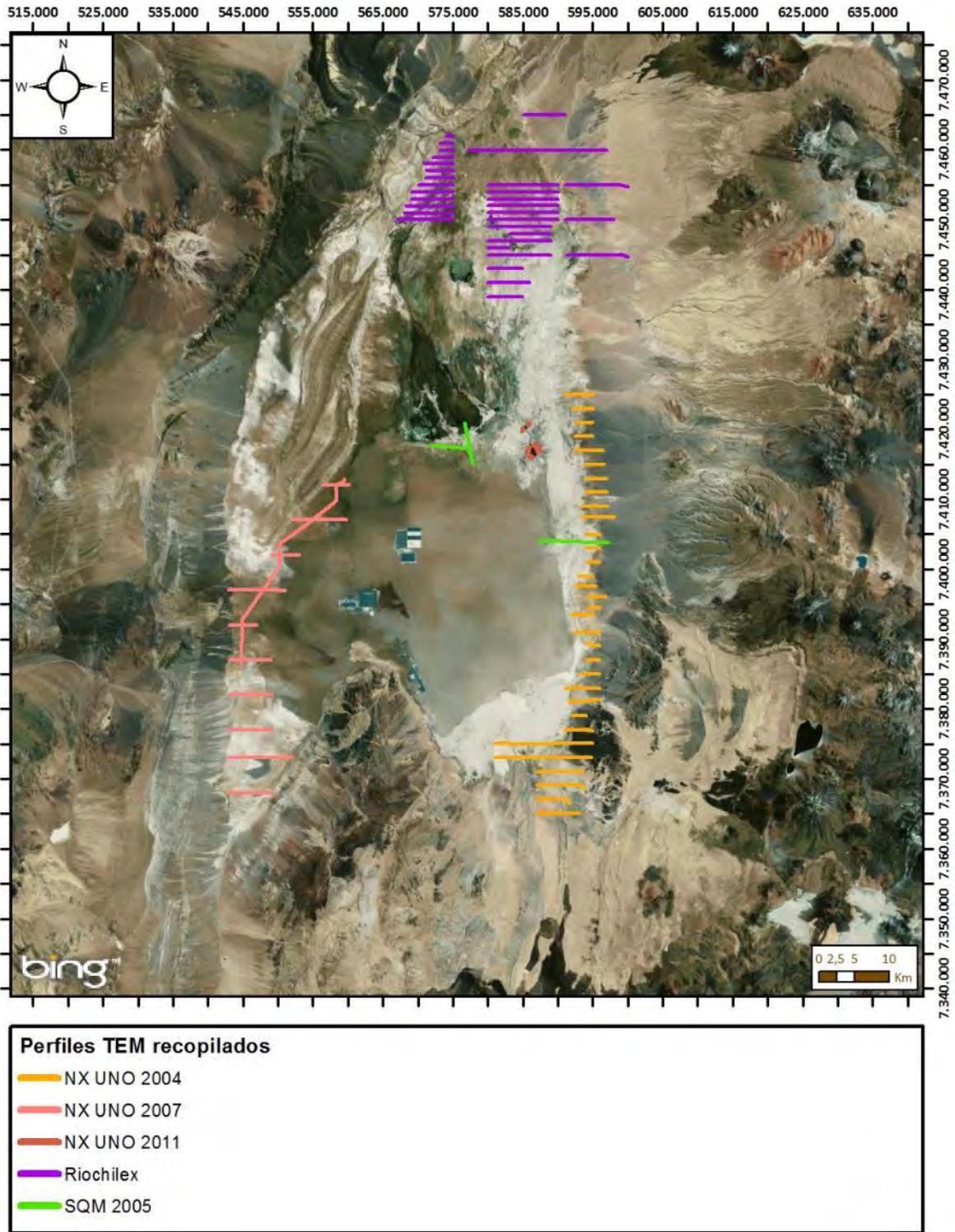


Figura 5-13 Trazado en superficie de los perfiles TEM realizados en el Salar

5.5.2.3 Perfiles de Transiente Electromagnético (TEM) y Magnetotelúrica (MT)

Como parte de este estudio se realizó una campaña consistente en 5 secciones de transiente electromagnético (TEM) y Magnetotelúrica (MT). Estas secciones buscaban explorar el borde este del salar en profundidad, con el objetivo de identificar si es que existe recarga subterránea desde alguna cuenca ubicada hacia el oeste. La disposición general de estas secciones fue una sección principal de orientación norte-sur, atravesada por 4 secciones en dirección este-oeste (ver Anexo 3 – Informe geofísico). La ubicación de las secciones geofísicas se presenta en la Figura 5-14.

En las secciones TEM se muestra un nivel superior de alta resistividad, cuya base se encuentra entre las cotas 2.200 y 2.250 m.s.n.m., y que representaría a las rocas asociadas a los edificios volcánicos actuales. Bajo esta primera unidad se identifica un nivel de baja resistividad que se acuña hacia el este y que desaparece en el extremo sur de la sección principal. A continuación se reconoce una nueva unidad de alta resistividad (menor que la primera) que en la mayor parte de la sección no alcanza su base. Finalmente, hay una zona de muy baja resistividad en la parte central y sur de la zona levantada.

Las secciones MT representan la zona ubicada bajo las secciones TEM, ya que la resolución de la metodología no permite ver las zonas ubicadas más cerca de la superficie. Bajo las unidades reconocidas en las secciones TEM se identifica una de alta resistividad, que es posible que coincida con la tercera unidad identificada por el TEM. Esta unidad tiene un espesor máximo de aproximadamente 700 m, y no alcanza los extremos norte ni sur de la sección principal, quedando cortada en la estación 2 por el norte y 18 por el sur.

A continuación hay una unidad que presenta importantes variaciones en su espesor y resistividad. El espesor máximo de esta unidad es aproximadamente 3.000 m, y al norte de la estación 14 desaparece para volver a aparecer entre las estaciones 17 y 18. Este último corte tiene una pendiente muy bien marcada, de aproximadamente 45°, y es probable que corresponda a una falla de Back Thrust con orientación NW asociada al fallamiento inverso resultante del régimen compresivo que domina en la zona, y que estaría levantando a las rocas de edad paleozoica que afloran al norte de Camar. Finalmente, hay una gran unidad de baja resistividad, de la cual no se identifica la base.

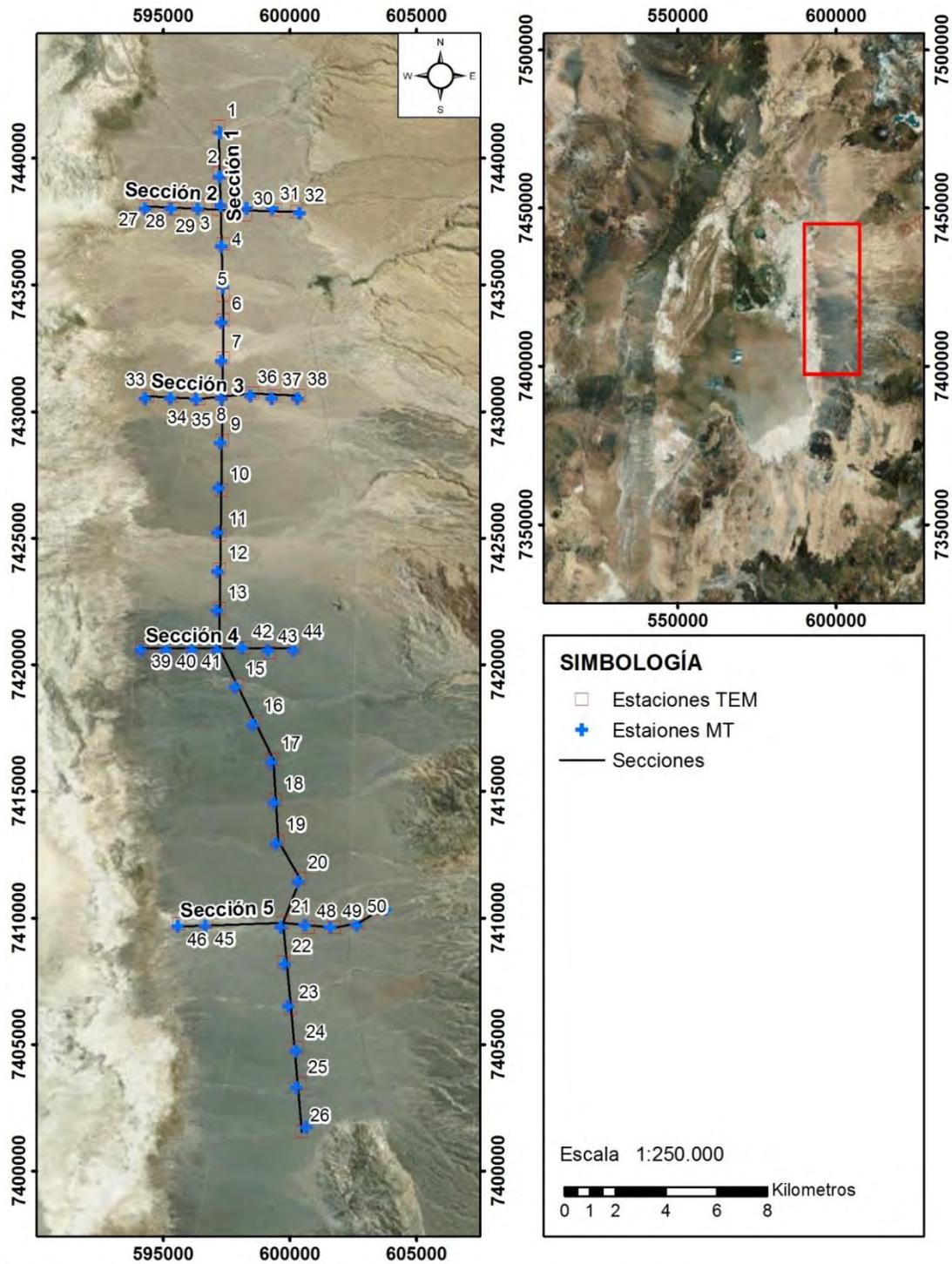


Figura 5-14 Trazado en superficie de los perfiles TEM y MT realizados en el borde este Salar

6. Hidrología superficial

6.1 Clima

La cuenca del Salar de Atacama se encuentra a una latitud en que, para los meses entre abril y noviembre, las precipitaciones son prácticamente nulas por la presencia del Anticiclón del Pacífico, cinturón de altas presiones de gran estabilidad climática. En los meses de verano el Anticiclón se desplaza hacia latitudes mayores permitiendo la penetración del Frente Ecuatorial de bajas presiones, lo que genera inestabilidad atmosférica en el altiplano con corrientes ascendentes de aire y formación de nubes. Este fenómeno se reconoce como el invierno altiplánico y se caracteriza por presentar importantes precipitaciones.

De acuerdo a la clasificación climática de Köppen, dentro de la cuenca del Salar se distinguen 2 tipos de zonas climáticas. En la parte baja de la cuenca se observa un clima seco-árido frío (BWk), con una temperatura media anual inferior a los 18°C y humedades que bordean el 45%. En el sector alto se observa un clima frío de tundra (ETH) debido a las grandes alturas con precipitaciones estivales producto del invierno boliviano, temperaturas del orden de los 11°C y humedad relativa del 45% (Figura 6-2).

En la Figura 6-1 y Figura 6-3 se indican las precipitaciones y temperaturas mensuales respectivamente. En el primer caso se observa que los eventos de mayor magnitud ocurren en la época estival, concentrados entre Enero y Marzo, y presentando algunas precipitaciones menores durante el invierno. También se destaca que la estación Socaire, a pesar de estar ubicada a solo 20 [km] de la estación Peine, por encontrarse a mayor altitud registra precipitaciones considerablemente mayores. En el caso de la temperatura se aprecia que esta oscila entre 11,0°C y 20,5°C en invierno y verano respectivamente. Por otro lado la oscilación térmica a nivel diario es cercana a los 21°C.

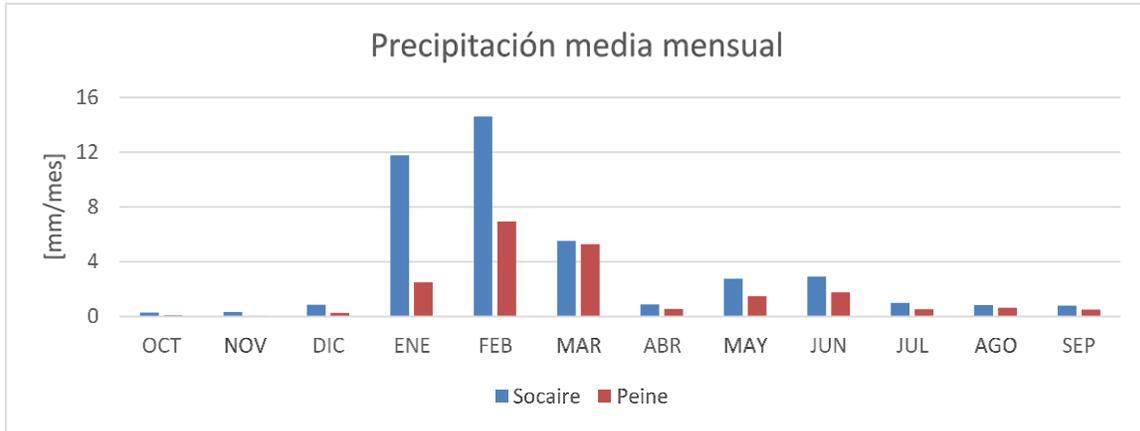


Figura 6-1: Precipitaciones medias mensuales cuenca del Salar de Atacama.

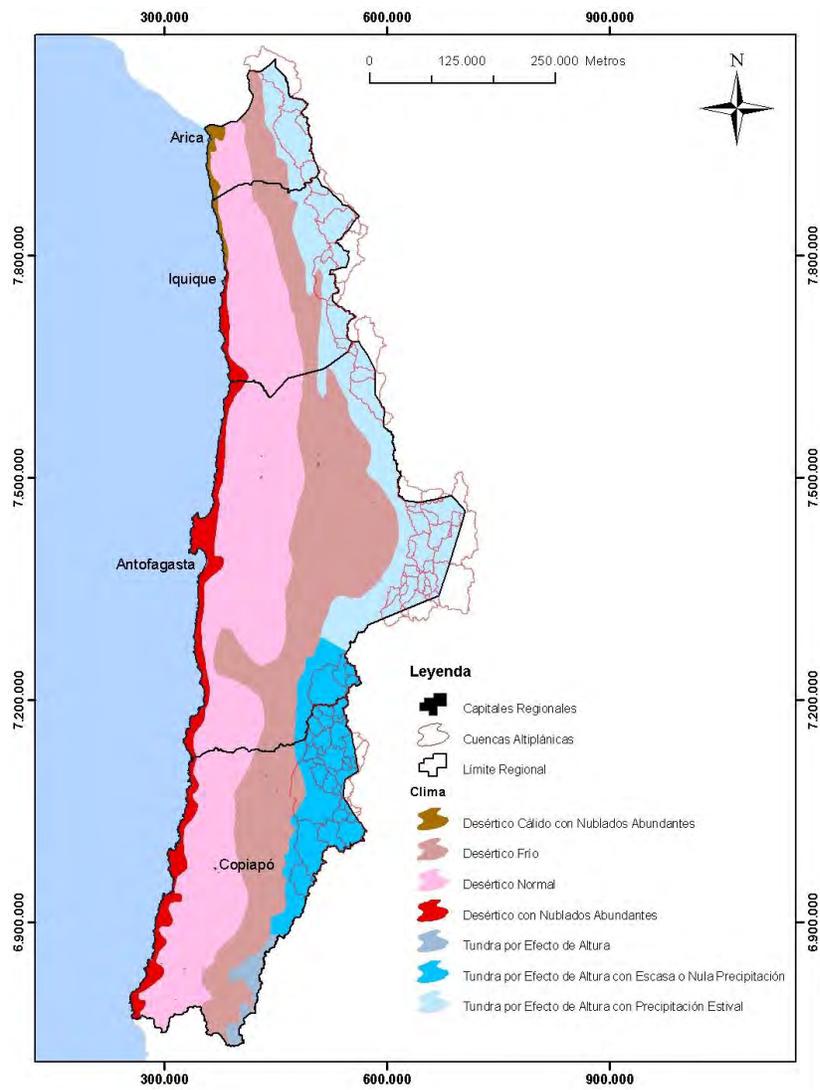


Figura 6-2: Clima de las regiones XV, I, II y III de Chile. Fuente DGA/DICTUC 2008.

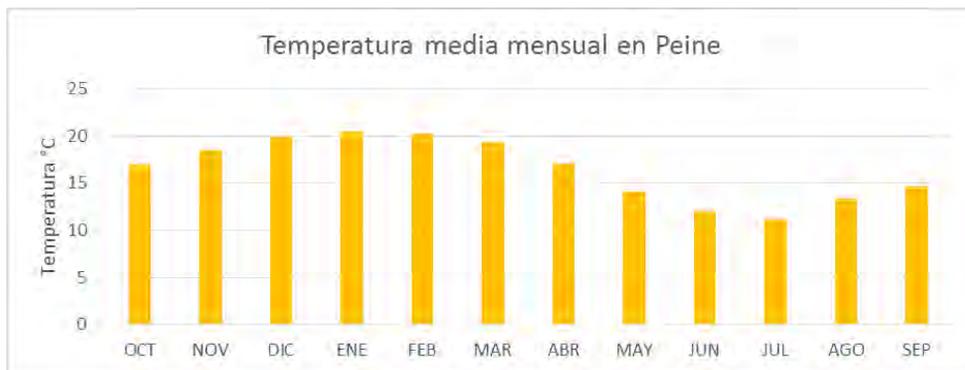


Figura 6-3: Temperaturas medias mensuales en Peine.

6.2 Hidrografía

La red hidrográfica de la cuenca del Salar de Atacama se conforma principalmente por una serie de cauces en el sector norte y oriente de la cuenca.

En el sector norte destacan el río San Pedro, formado por la confluencia de los ríos Grande y Salado, y el río Vilama, ambos con sentido de escurrimiento de norte a sur en su tramo inicial. Aguas abajo de San Pedro de Atacama el río San Pedro se desvía hacia el poniente bordeando el Salar de Atacama para luego desviarse nuevamente hacia el oriente formando un gran abanico de deposición en su tramo final.

La hidrografía del sector oriente se conforma por una serie de quebradas con sentido de escurrimiento de este a oeste, pequeña longitud y caudales esporádicos y de baja magnitud (Figura 6-4).

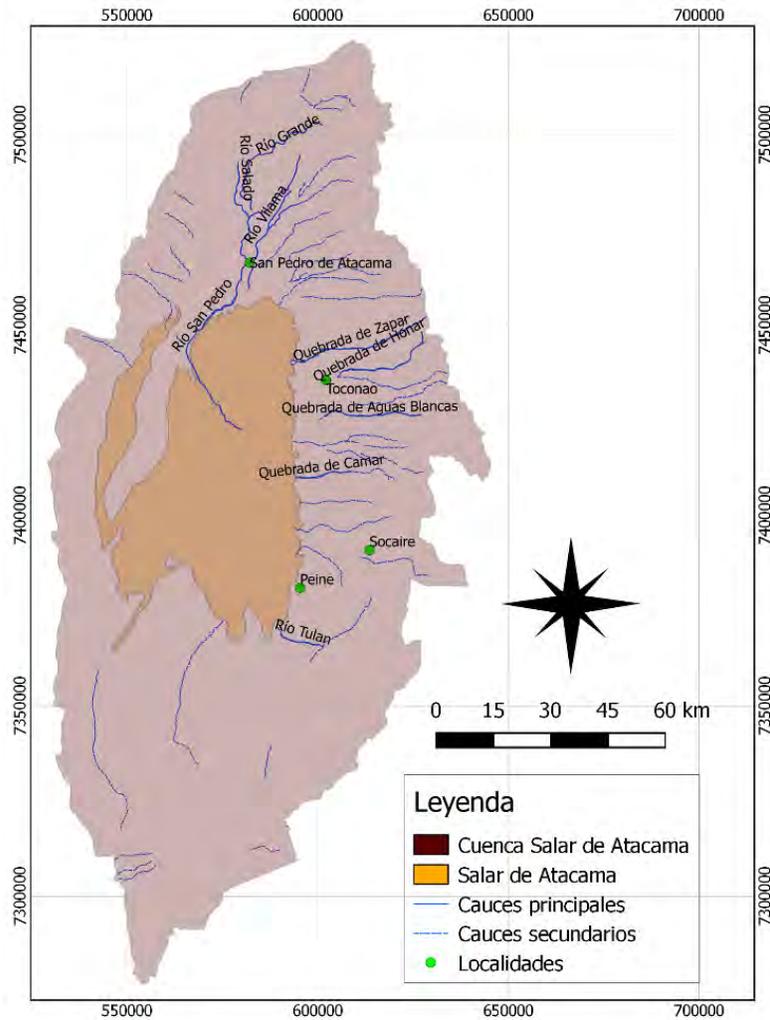


Figura 6-4: Hidrografía cuenca del Salar de Atacama.

6.3 Delimitación de subcuencas

La delimitación de los sectores hidrológicos se ha realizado en diversos estudios que han tenido por objetivo cuantificar la disponibilidad de recursos hídricos desde la cuenca del Salar de Atacama. Para ello se han utilizado distintos criterios de tipo geológico, hidrológico o aquellos sectores más solicitados desde el punto de vista de las extracciones subterráneas.

Las principales sectorizaciones realizadas corresponden en primer lugar al estudio "Informe Hidrogeológico: Evaluación de la disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas,

cuenca del Salar de Atacama, II región. DG, 1997”, el cual define 6 subcuencas con un área total de 14.800 [km²]. Esta sectorización se utilizó posteriormente en la Minuta Técnica N°60 para la constitución de derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al Salar de Atacama.

Luego en el estudio DGA/GCF de 2010 se realizó una nueva sectorización de las subcuencas utilizando información de la red hidrográfica, cuerpos de agua, modelo digital de elevación, curvas de nivel y herramientas de sombreado. Como resultado se obtuvieron 13 subcuencas con una superficie total de 17.257 [km²] (Figura 6-5). En este trabajo se realizó un completo análisis cartográfico de la información disponible, en el cual se combinaron distintas herramientas de análisis para resolver casos de conflicto en la delimitación de los sectores hidrográficos. Por este motivo se considera la sectorización de DGA/GCF es la más acabada con que se cuenta.

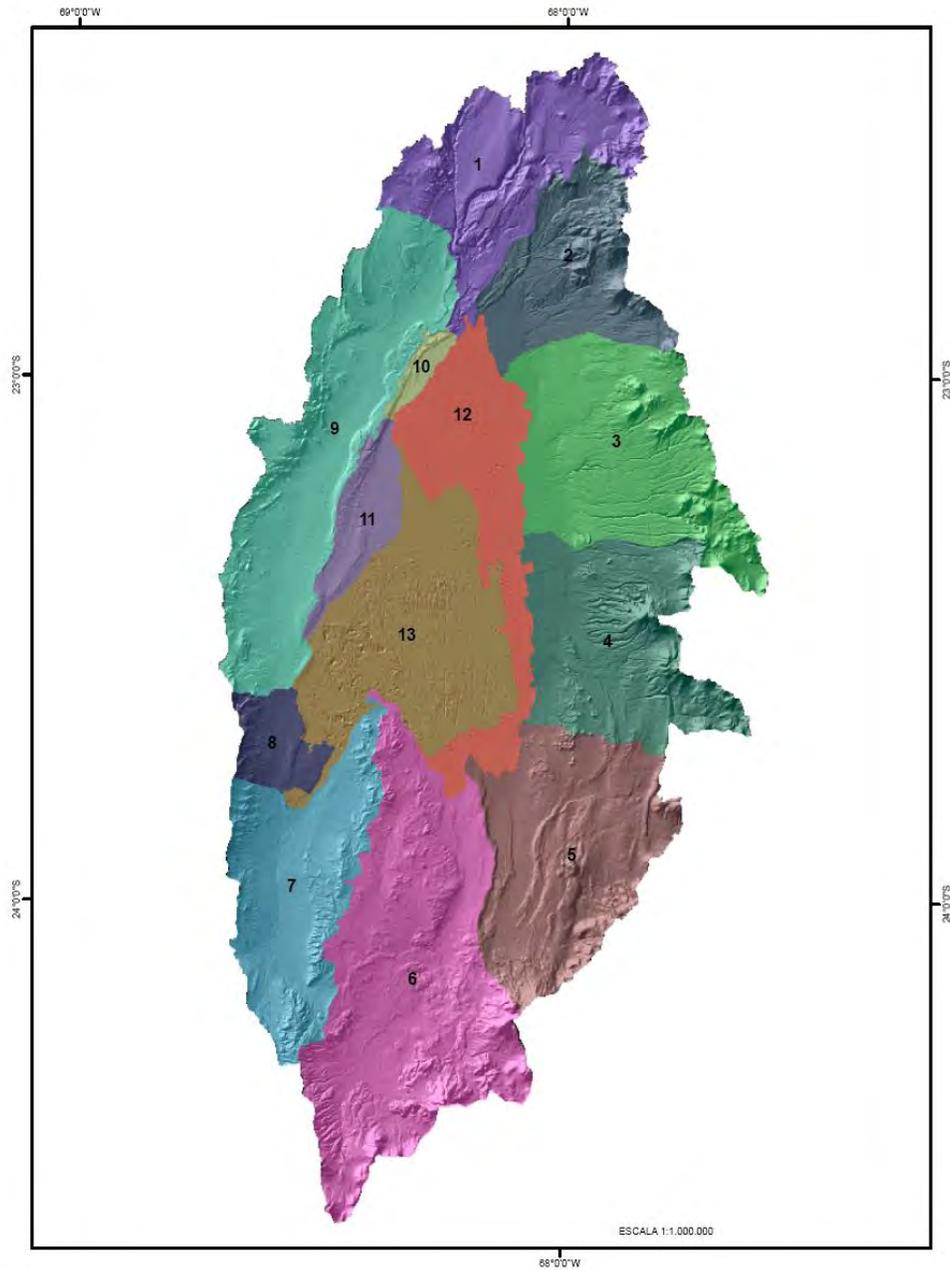


Figura 6-5: Subcuencas cuenca del Salar de Atacama. Fuente: DGA/GCF 2010.

6.4 Cobertura red Hidrométrica DGA

6.4.1 Información disponible

La red hidrométrica de la DGA cuenta con 34 estaciones fluviométricas y 52 estaciones pluviométricas en la región de Antofagasta, algunas de ellas con información de temperaturas. De ellas 7 estaciones fluviométricas y 10 estaciones pluviométricas se encuentran en la cuenca del Salar de Atacama.

En la Figura 6-6 se presenta un mapa con la ubicación de las estaciones de la red hidrométrica de la DGA en la región de Antofagasta. En la Tabla 6-1 y la Tabla 6-2 se presenta la información de las estaciones presentes en la cuenca del Salar de Atacama y en la Figura 6-7 y Figura 6-8 se muestra la disponibilidad de información de cada una.

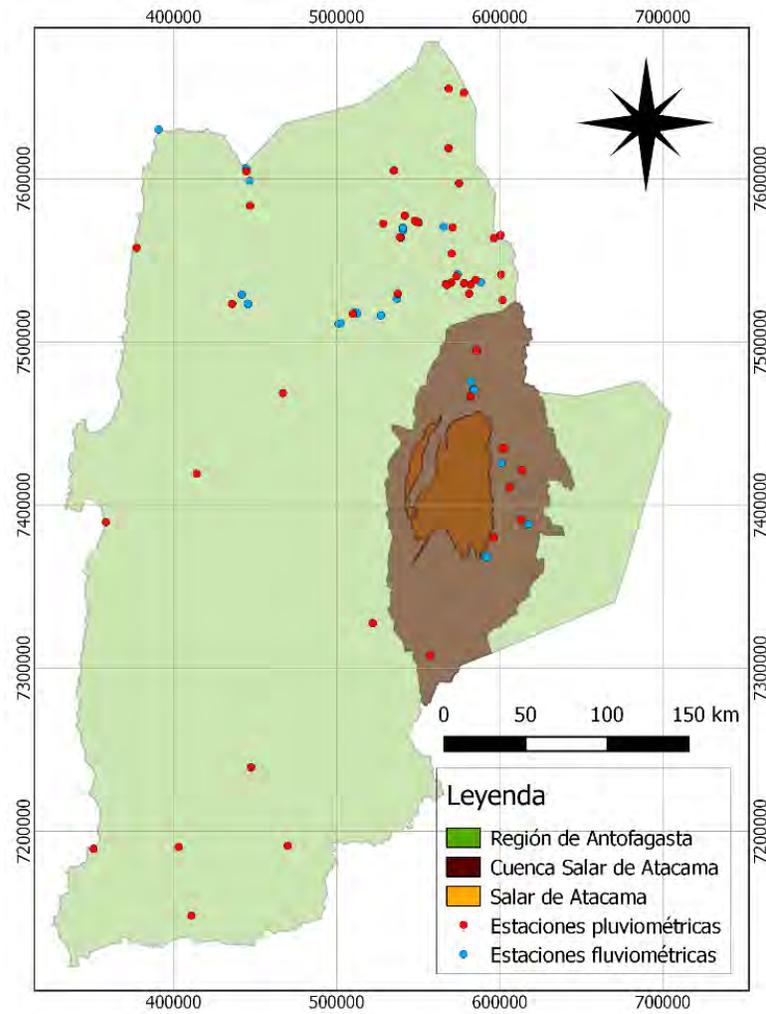


Figura 6-6: Red hidrométrica de la DGA.

Tabla 6-1: Estaciones fluviométricas región de Antofagasta.

Nombre	Código BNA	UTM N (WGS 84)	UTM E (WGS 84)	Altitud [m.s.n.m.]
Río San Pedro en Cuchabrachi	02510001-8	7475873	582268	2585
Canal Tulan en Tilomonte	02500003-K	7368734	590873	2450
Río Vilama en Vilama	02500001-3	7470975	583780	2550
Canal aguas blancas	02500002-1	7425937	600918	2415
Canal Vilama en Vilama	02500004-8	7470634	584206	2550
Canal Cuno en Socaire	02500005-6	7388227	617637	3600
Canal Tilomonte antes represa	02500006-4	7367957	592170	4000

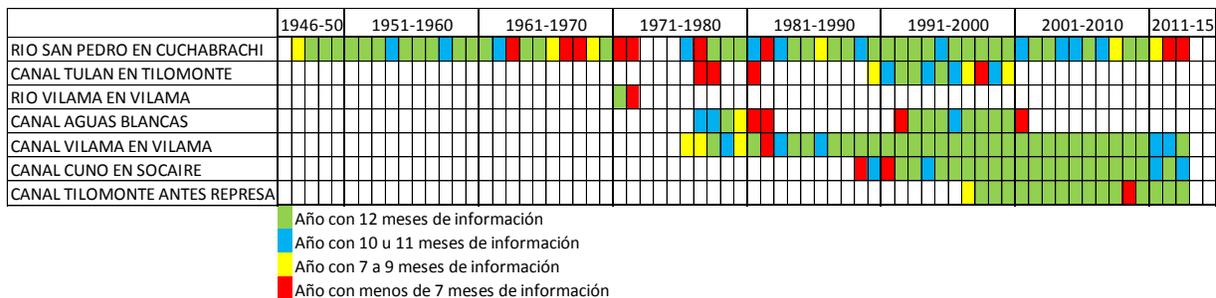


Figura 6-7: Datos disponibles de caudales mensuales.

Con respecto a la información fluviométrica se observa que el único registro importante corresponde a la estación Río San Pedro en Cuchabrachi, mientras la estación Río Vilama en Vilama cuenta con menos de dos años de registro.

Tabla 6-2 Estaciones pluviométricas región Antofagasta

Nombre	Código BNA	UTM N (WGS 84)	UTM E (WGS 84)	Elevación [m.s.n.m.]
Peine	02500020-K	7380388	596045	2460
Río Grande	02510007-7	7494705	585709	3250
Talabre	02500021-8	7421415	613727	3300
Camar	02500017-K	7411015	605954	2700
Toconao reten	02500015-3	7434668	601376	2460
Monturaqui	02660001-4	7307823	557288	3430
San Pedro de Atacama	02510006-9	7466710	582019	2450
Socaire	02500019-6	7391031	613011	3251
Toconao experimental	02500016-1	7435183	602573	2500
Imilac	02640001-5	7327668	522066	3000

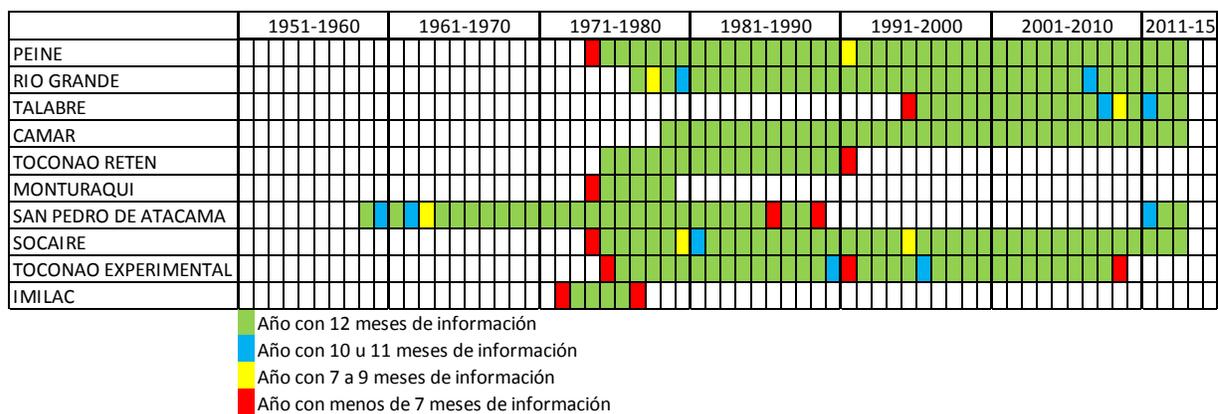


Figura 6-8: Datos disponibles de precipitaciones mensuales.

Como conclusión se puede mencionar que si bien se dispone de estaciones pluviométricas con un registro mayor a 30 años de información, la cobertura espacial en la cuenca del salar no es suficiente para caracterizar las precipitaciones de la cuenca, particularmente en las zonas altas de las subcuencas aportantes al núcleo (Figura 6-6), que son las que aportan con la mayor parte de la recarga, según se describe en el acápite 9.1.

6.4.2 Relleno y extensión de estadística

6.4.2.1 Precipitaciones

En lo que se refiere a las precipitaciones, en estudios anteriores se han realizado esfuerzos por ampliar y rellenar la estadística de la red de monitoreo, ya que como se observa en la Figura 6-8 y Figura 6-6, muchas de las estaciones tienen información incompleta y existen sectores en el Salar de Atacama con escasa cobertura espacial, como es el caso del sector sur y en las cabeceras de las cuencas aportantes. Junto con lo anterior, dadas las características convectivas de las precipitaciones, su representación se torna difícil a través de métodos tradicionales. Muchas veces no existen registros concurrentes entre estaciones, mientras en una estación se registra un evento de lluvia determinado, en otra estación cercana eso puede no ser así.

En ese sentido los trabajos más importantes han sido los realizados en el Balance Hídrico de Chile de 1987, el estudio DGA/DICTUC de 2008 y el reporte DGA/GCF de 2010.

En el caso del Balance Hídrico de Chile, para la II región de Antofagasta se utilizaron 25 estaciones con registro entre los años 1961 y 1980. De este trabajo se obtuvo como resultado un mapa de isoyetas de precipitación media anual a escala 1: 500.000 las cuales, en el caso del Salar de Atacama, representan de buena forma la variación espacial en términos relativos, no así en términos absolutos ya que sus valores se encuentran desactualizados.

El trabajo realizado por DGA/DICTUC en 2008 tuvo por objetivo realizar un levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua entre las regiones XV y III. La información pluviométrica utilizada incluyó 168 estaciones pertenecientes a la red de monitoreo de la DGA, Sistema Nacional de Información Hídrica de Argentina (SNIH), Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia (SENAMHI) y la National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) de los Estados Unidos.

El relleno y la extensión de los datos se realizó a través de un modelo de regresión lineal según la siguiente expresión,

$$Y_i^* = \alpha_i \cdot P1_i + \beta_i \cdot P2_i + \sqrt{1 - R^2} \cdot \varepsilon_i \cdot S_y \quad \mathbf{6-1}$$

donde Y_i^* es el dato de precipitación rellenado el mes i , $\alpha_i \cdot P1_i$ y $\beta_i \cdot P2_i$ son las precipitaciones en el mes i en 2 estaciones cercanas o con características hidrológicas similares ($P1_i$ y $P2_i$) ponderadas por un factor de ajuste (α_i y β_i) y el término ($\sqrt{1 - R^2} \cdot \varepsilon_i \cdot S_y$) se incluyó para evitar una distorsión de la varianza de la serie rellenada.

Adicionalmente con las series rellenadas se realizaron análisis sobre la variabilidad de la precipitación con la altura y con respecto a otras estaciones, comparando el coeficiente de correlación entre la precipitación media anual de 2 estaciones en función de la distancia entre ellas. En particular para la II región se observa que las precipitaciones siguen una tendencia lineal con respecto a la altura a partir de los 2.300 [m.s.n.m.] aproximadamente (Figura 6-9). El análisis de los coeficientes de correlación arroja que estos varían entre 0,2 y 1 incluso en las estaciones más cercanas entre sí, lo cual enfatiza lo comentado anteriormente respecto de las particularidades de las precipitaciones que se producen en esta zona (Figura 6-10).

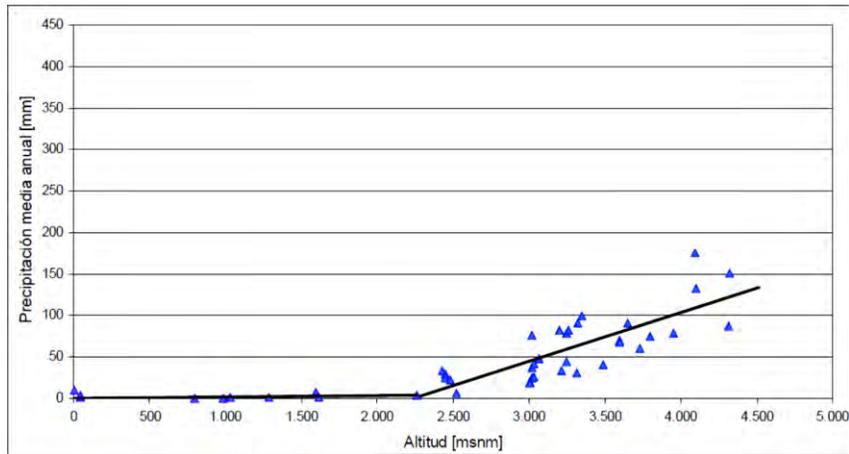


Figura 6-9: Relación Precipitación anual v/s altura. Fuente DGA/DICTUC 2008.

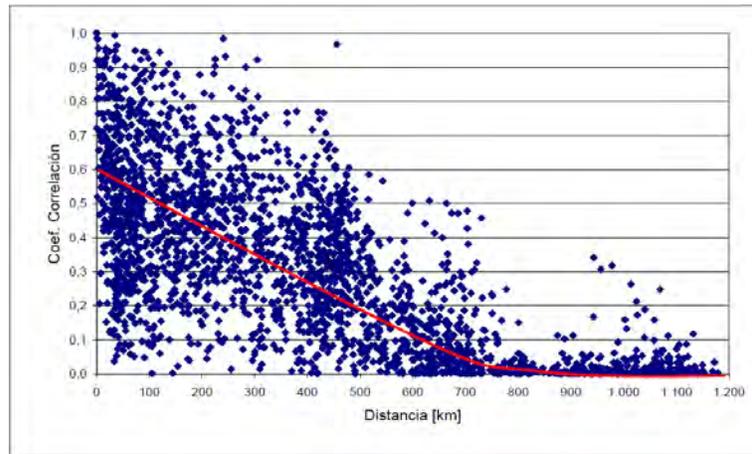


Figura 6-10: Relación coeficiente de correlación de la precipitación media anual entre 2 estaciones v/s la distancia entre ellas. Fuente DGA/DICTUC 2008.

Finalmente se generaron isoyetas de precipitación anual mediante el software Surfer, las cuales se corrigieron en base a la topografía y a los gradientes de precipitación con respecto a la altura.

Por su parte el estudio DGA/GCF de 2010 aplicó un modelo estocástico multivariado a nivel mensual para el relleno y extensión de la información. Para ello se utilizaron 25 estaciones ubicadas sobre la cota 2.000 [m.s.n.m.] ya que las inferiores a ese nivel presentan muchos valores nulos, lo cual perjudica la aplicación del modelo mencionado. Luego se generaron relaciones lineales de precipitación en función de la altura a partir de 6 estaciones (Río

Grande, El Tatio, Toconao Exp., Socaire, Peine y Camar), también a nivel mensual, para extrapolar los datos a lugares sin cobertura.

Finalmente se determinó la precipitación efectiva de la cuenca según la siguiente ecuación,

$$PP_{Efectiva}^{Subcuenca\ i} = \overline{PP}^{Subcuenca\ i} \times (1 - f^{Subcuenca\ i}) \quad \mathbf{6-2}$$

donde $PP_{Efectiva}^{Subcuenca\ i}$ es la precipitación efectiva sobre la subcuenca i , $\overline{PP}^{Subcuenca\ i}$ es la precipitación promedio en la subcuenca i y $f^{Subcuenca\ i}$ es un factor de ajuste para cada subcuenca i que varía entre 0 y 1. Este factor se ajustó de manera de obtener una recarga efectiva promedio por precipitaciones de 5,6 [m³/s], valor actualizado en dicho estudio para la evaporación desde el Salar de Atacama.

La metodología propuesta por DGA/GCF se considera robusta y abarca un periodo de observación extenso, entre 1970 y 2008, sin embargo no proveen una buena cobertura en la zona poniente de la cuenca. Esto se debe a que la extrapolación de los datos se realizó utilizando solo una relación de precipitación v/s altura, es decir, no se consideró el efecto de la pérdida de volumen precipitable de las masas de agua a medida que se mueven en sentido este a oeste.

6.4.2.2 Caudales

La cuenca del Salar de Atacama cuenta con 7 estaciones fluviométricas, de las cuales Canal Tulan en Tilomonte y Río Vilama en Vilama se encuentran suspendidas. De acuerdo a la revisión de antecedentes realizada, no se cuenta con extensiones y/o rellenos de la estadística fluviométrica para la cuenca del Salar de Atacama. Lo anterior ya que la escasez de estaciones y las características de los escurrimientos, en que la infiltración resulta ser significativa, no permite generar correlaciones apropiadas. En el trabajo DGA/GCF de 2010 se menciona que prácticamente la totalidad de los recursos superficiales se infiltran y alcanzan el Salar de Atacama de forma subterránea.

A pesar de lo anterior, el extenso registro de la estación río San Pedro en Cuchabrachi, ubicada a 9,5 [km] al norte de la localidad de San Pedro, permite observar el comportamiento de este cauce durante un período de tiempo considerable. Este se ha caracterizado por mantener un caudal medio anual cercano a los 0,9 [m³/s] presentando

períodos de crecidas de diversa intensidad que se muestran en la Figura 6-11. En esta figura se aprecia la serie de caudales medios diarios del río San Pedro en Cuchabrachi en dos escalas.

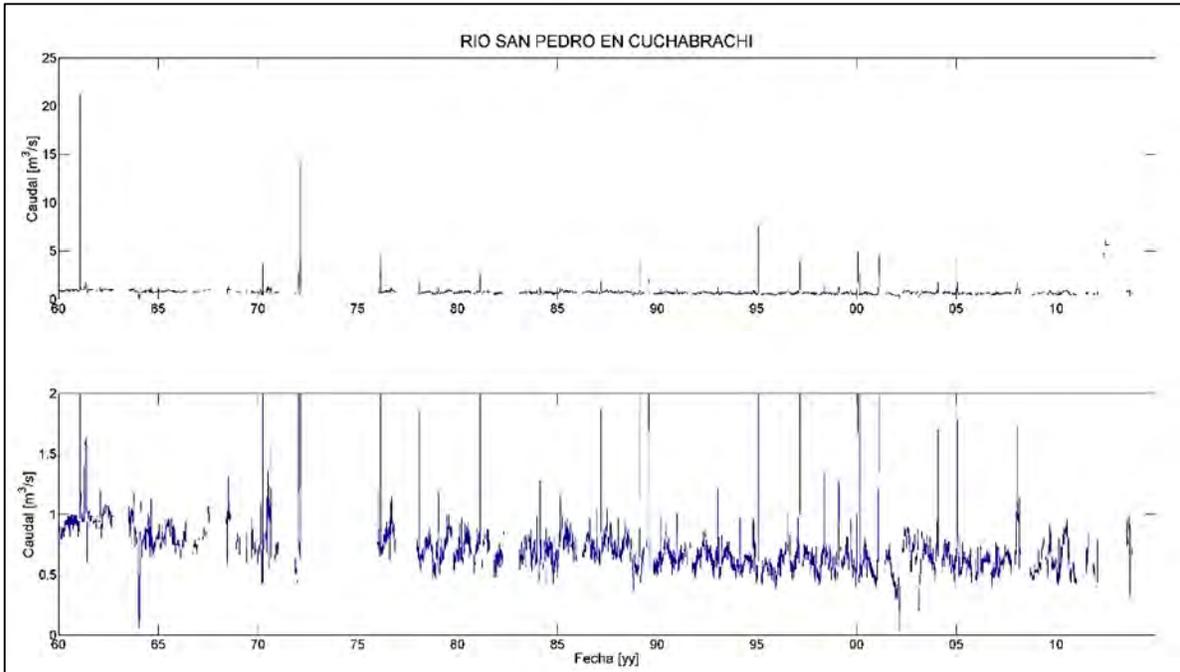


Figura 6-11: Serie de caudales medios diarios Río San Pedro en Cuchabrachi.

Junto con lo anterior, en el trabajo "Análisis de la oferta hídrica del Salar de Atacama" realizado por la DGA en 2013 se entregan valores de caudal para algunos de los principales cauces de la cuenca del Salar, los que fueron adoptados de CORFO, 1977. Los resultados se indican en la Tabla 6-3.

Tabla 6-3: Caudales medios

Sector	Cauce	Caudal [l/s]
Norte	Río San Pedro	1.021
	Río Vilama	218
	Total Sector Norte	1.239
Oriental	Río Zapar	7
	Río Honar	54
	Río Pocor	30
	Quebrada Aguas Blancas	150
	Río Soncor	6
	Quebrada Camar	3
	Quebrada Socaire	170
	Quebrada Peine	15
	Río Tulan	70
	Total Sector Oriental	505
	TOTAL	1.744

FUENTE: "Análisis de la oferta hídrica del Salar de Atacama" (DGA, 2013)

6.5 Evaporación

Los estudios más relevantes en el estudio de la evaporación para esta zona han sido los reseñados en el capítulo 4 de este informe. En ellos se analizan diferentes factores que inciden en la evaporación y se ha estimado la evaporación producida desde el Salar de Atacama.

De esta manera, por una parte se analiza la relación entre la altitud geográfica y los distintos parámetros que definen la evaporación.

Entre las conclusiones generales obtenidas en el Proyecto CHI-69/535 (CORFO, 1977), se indica que la evaporación depende mucho más de la radiación solar que de la temperatura y que sin duda el viento tiene su papel en la magnitud del fenómeno, aumentando el efecto relativo del viento con la altura. Respecto de la evaporación desde un nivel freático poco profundo el proyecto desarrolló en las vegas de Chiu Chiu, de Turi y Ojos de San Pedro una investigación midiendo el estado de humedad del suelo, que en el caso de San Pedro no tuvo resultados concretos. A partir de mediciones en Turi, se concluyó que la correlación con la profundidad del nivel freático no es obvia.

En el caso del trabajo realizado por Grilli, A. y Vidal, F.(1986), que compila una serie de experiencias de estimación de evaporación en Chile, se entrega dos curvas de evaporación para el Salar de Atacama según profundidad, diferenciando según costra de cloruros y

sulfatos y limos, lo que es utilizado para el cálculo de la descarga en el Salar de Atacama en el Balance Hidrológico Nacional II Región (Grilli D, Vidal F., 1986). En este último trabajo se calcula la evapotranspiración natural desde el área drenante hacia el salar a partir del método de Turc, con lo que finalmente se generaron isolíneas de evaporación de tanque y evapotranspiración real de superficies naturales que formaron parte del Balance Hídrico Nacional (1987) (Figura 6-12).

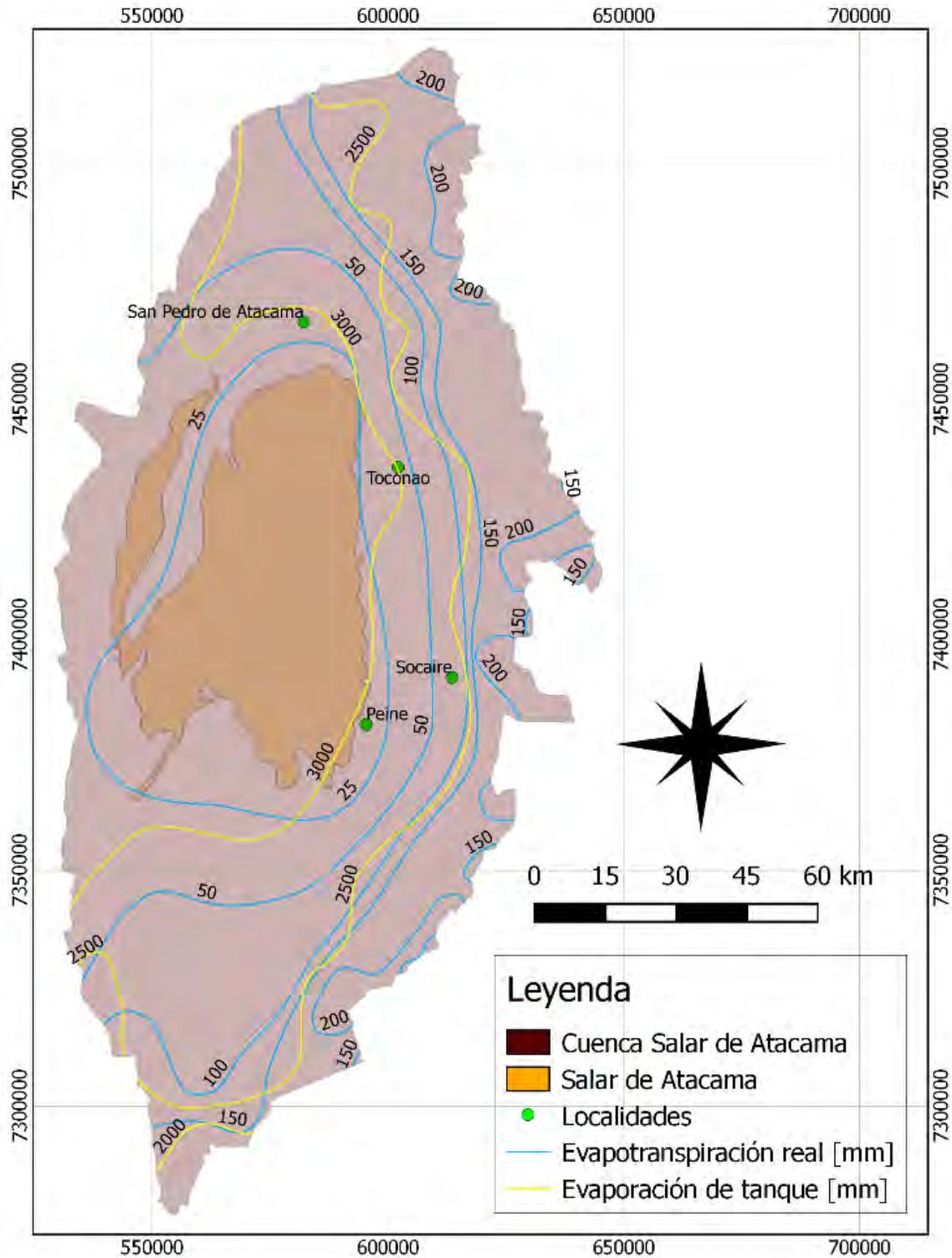


Figura 6-12: Isolíneas de evaporación. Fuente: Balance Hídrico Nacional, 1987.

Respecto de estudios que utilicen información estadística más actualizada, DGA/DICTUC (2012) aporta información sobre la variación de la precipitación la altura. En él se concluye que para altitudes menores a 1.100 [m.s.n.m.] la evaporación es proporcional a la altura, entre 1.101 [m.s.n.m.] y 3.000 [m.s.n.m.] se mantiene aproximadamente constante y para alturas mayores a los 3.001 [m.s.n.m.] la evaporación es inversamente proporcional con la altitud ().

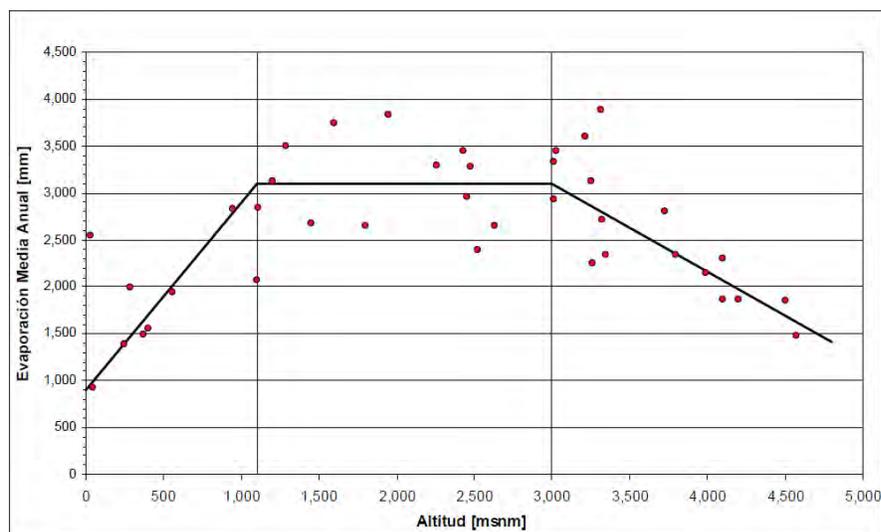


Figura 6-13: Gradiente evaporación media anual regiones de la XV a la III.

Fuente: DGA/DICTUC 2008.

En el trabajo DGA/GCF de 2010 se realiza una estimación de la evapotranspiración para todas las subcuencas del Salar de Atacama. Para ello se generaron regresiones lineales de evaporación de tanque v/s altura con información de evaporación mensual de 6 estaciones dentro de la cuenca del Salar o cerca de ella. Las estaciones utilizadas fueron Ojos San Pedro, El Tatio, Toconao Exp., Socaire, Peine y San Pedro de Atacama, cuyas alturas varían entre 2.400 [m.s.n.m.] y 4.500 [m.s.n.m.].

Las relaciones de evaporación mensual v/s altura se utilizaron para estimar la evapotranspiración de vegas, bofedales, áreas cultivadas y cuerpos de agua. Primero se determinó la evaporación de tanque a cierta cota mediante las relaciones mencionadas, luego se determinó la evapotranspiración de referencia multiplicando por un factor de 0,75 y finalmente se ponderó por los coeficientes de cultivo para estimar la evapotranspiración

real (ETR). En el caso de vegas y bofedales se utilizaron coeficientes de cultivo a nivel mensual y para las zonas agrícolas se adoptó un valor de 0,95 para todos los meses.

Los resultados obtenidos por este trabajo se discuten y presentan en el Capítulo 9 de este informe.

7. Hidrogeología

En la presente sección se revisará la información correspondiente a la hidrogeología del salar de Atacama en cuatro sectores. El sector norte, el borde oriental, el sector sur este y el núcleo del Salar.

El sector norte incluye el área del Salar entre la latitud de San Pedro de Atacama y Toconao y limitado al oeste por la cordillera de la Sal y al oriente por los abanicos aluviales de la cordillera de Los Andes. En este sector, se encuentra el delta del río San Pedro además de las lagunas Tebinquinche, Baltinache y Cejas. El borde oriental corresponde al área comprendida entre los abanicos aluviales del margen este del salar y el núcleo del salar. Este sector incluye los sistemas de aguas superficiales sistema Soncor (Canal del Burro muerto, Laguna Chaxa, Laguna Puilar y Laguna Barros Negros) y el sector Aguas de Quelana. El sector sur, se encuentra al sur del Salar de Atacama, entre el Cordón de Lila y el margen oriental. Este sector incluye el sistema Peine (Lagunas Salada, Laguna Saladita, Laguna Interna) y Laguna La Punta y Laguna Brava. Por último, el núcleo del salar definido en el trabajo de (Moraga, Chong, Fortt, & Henríquez, 1974), corresponde a la zona centro y parte del borde occidental del salar. Este sector se caracteriza por presentar costras de cloruros.

A continuación se realiza una descripción de las características hidrogeológicas más relevantes para cada una de estas áreas.

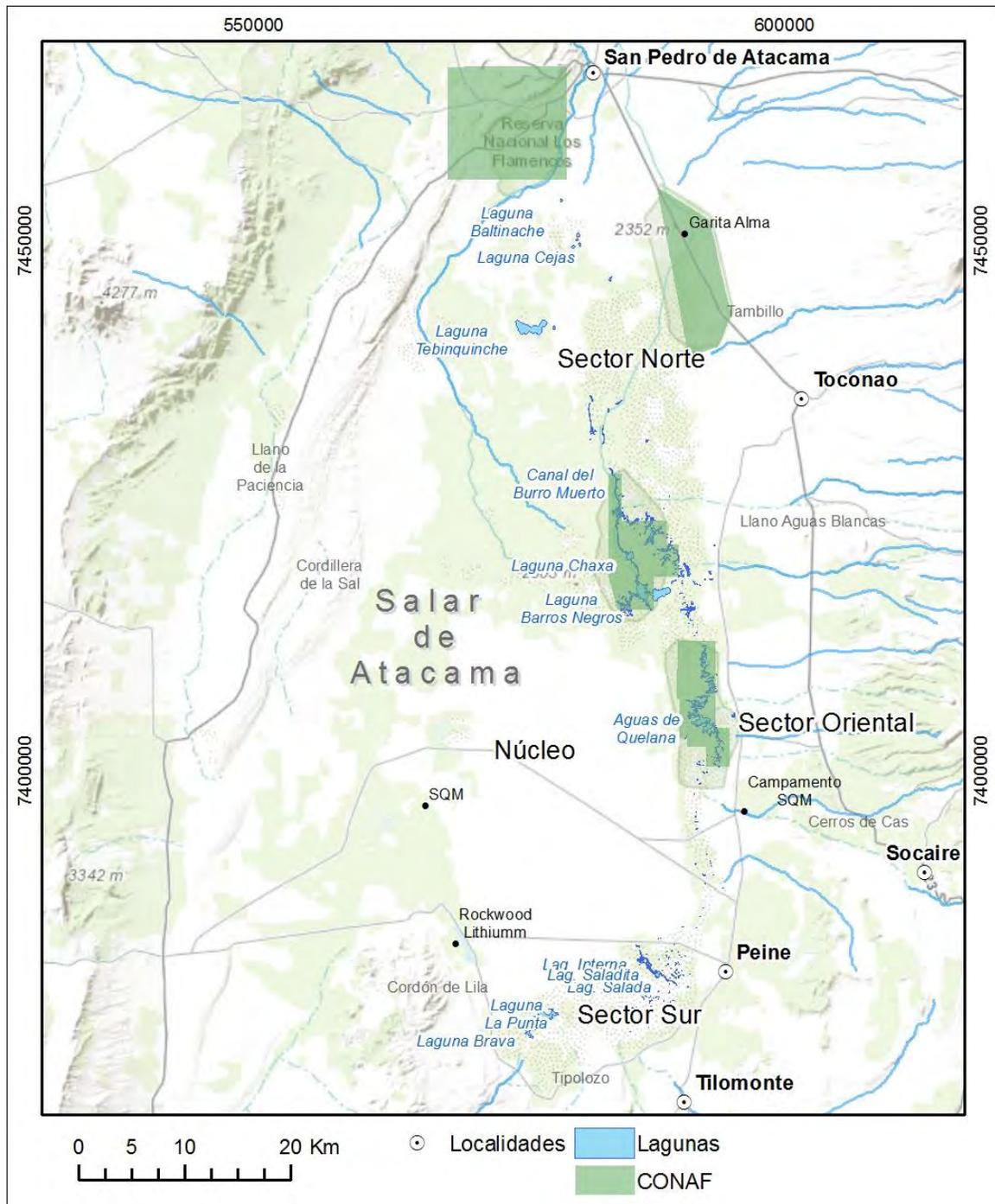


Figura 7-1 Zonas salar

7.1 Sector norte

7.1.1 Unidades hidrogeológicas

RioChilex, 1999 identifica cuatro unidades acuíferas, uno de tipo freático superior, un sistema intermedio confinado, que se denomina acuífero principal y un tercer nivel acuífero constituido por flujos ignimbríticos tobáceos. Lateralmente, en la parte occidental del campo de pozos, se desarrolla una unidad principalmente arcillosa. De acuerdo a EDRA (1997):

- a. El acuífero superior está constituido principalmente por arenas y gravas, con algunas intercalaciones de sedimentos arcillosos. Presenta espesores promedios que varían entre 4 a 30 metros. Los sondeos de monitoreo construidos para detectar las variaciones del nivel freático, evidenciaron, que este se ubica entre 0.2 a 3.0 metros bajo la superficie. Se correlaciona con el acuífero superior libre definidos por Dalannais (1979) y Fock (2011).
- b. El acuífero principal está constituido por acuíferos y acuitardos, éstos últimos corresponden a unidades de más baja permeabilidad que son capaces de almacenar agua, pero su entrega es de forma lenta. Los acuíferos están constituidos principalmente por arenas gruesas y gravas finas y material piroclástico fracturado o con bajo o nulo grado de soldamiento; el acuitardo está integrado por secuencias de sedimentos finos, cenizas, depósitos calcáreos y material piroclástico compacto. Se ubica inmediatamente debajo del acuífero superior, separado de éste por un nivel confinante, que podrían corresponder a niveles volcánicos vítreos, sedimentos silicificados y/o arcillas. Se correlaciona con el acuífero confinado descrito por Dalannais (1979) y Fock (2011).
- c. El tercer nivel acuífero, se ubica inmediatamente bajo el principal y está integrado principalmente por flujos ignimbríticos y tobáceos, presentando en algunos sectores secuencias elásticas intercaladas. En general, se desarrolla a profundidades bajo los 110 m y su espesor reconocido alcanza los 150 m. Los antecedentes geofísicos sugieren que ésta tendría un desarrollo superior a los 400 m.

La unidad de arcillas en la zona marginal tiene un espesor de al menos 190 m y se correlaciona sedimentológicamente con las zonas de baja permeabilidad reconocidas

7.1.2 Piezometría

No existe una piezometría de detalle actual para el sector norte, dado que existe escaso monitoreo en este sector. La piezometría del margen oriental de Salas et al., 2010, muestra que para el sector norte existe un dirección de flujo en sentido N-S, que es acorde con la recarga proveniente de la subcuenca del río San Pedro.

RioChilex realizó un monitoreo por el período de un año en 18 pozos perforados en el área de Baltinache desde el mes de agosto 1997 a octubre 1998. Se observa una variación cíclica anual acorde al ciclo hidrológico. Calcula un gradiente hidráulico de 0,5% para el acuífero superficial y para el principal confinado.

Actualmente el PSAH de SQM es el único monitoreo en la zona norte, donde cuenta solo con dos piezómetros (L11-1 y L11-2) y una regleta (L11-G1). La ubicación en planta se presenta en la Figura 7-2. En la Figura 7-3, se presenta la cota del nivel de agua para el piezómetro L11-1 durante el período Noviembre 2007 a Julio 2013 (PSAH SQM 2013). Es posible observar que existe una variación estacional del nivel de 10 cm aproximadamente. En la Figura 7-4, se presenta el grafico de la cota de nivel del piezómetro L11-1 donde es posible observar que el nivel presenta una variación estacional. Por otro lado, notar que la cota de nivel de los piezómetros L11-1 y L11-2 es de aproximadamente 2318,7 m.s.n.m. y 2314,5 m.s.n.m. respectivamente. Considerando una distancia de 2,5 km entre los piezómetros se obtiene un gradiente aproximado de 0,2%.



Figura 7-2 Ubicación pozos PSAH SQM zona norte.

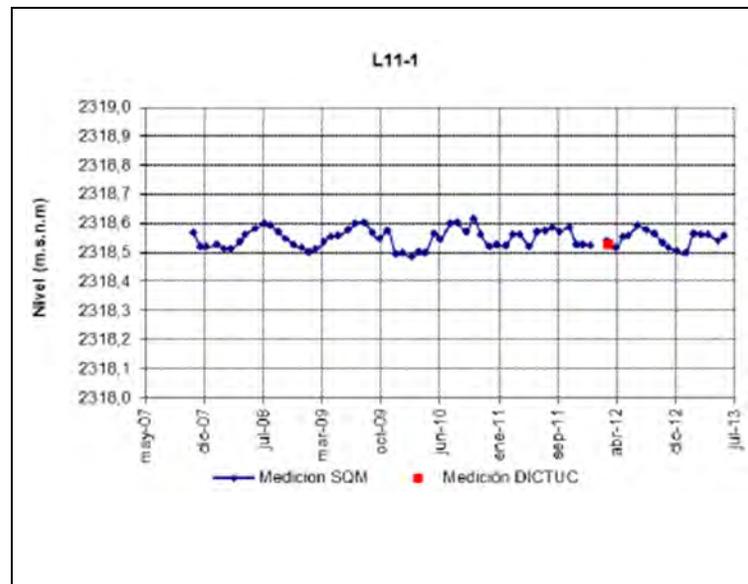


Figura 7-3 Nivel piezómetro L11-1 (PSAH SQM 2012)

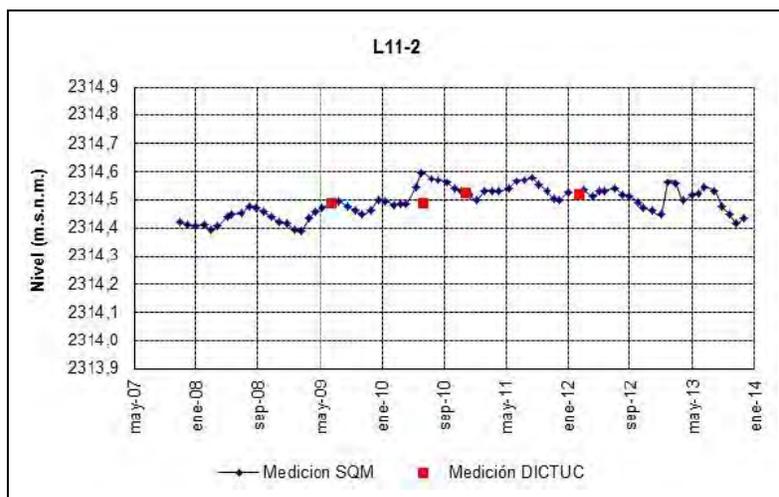


Figura 7-4 Nivel piezómetro L11-2 (PSAH SQM 2014)

A partir de estos datos se verifica el gradiente piezométrico norte – sur.

7.1.3 Sistemas lacustres

En el sector cuenta con lagunas de importancia ecológica y humedales asociados a esta. Se destacan tres lagunas: Baltinache, Cejas, Tebinquinche y Yona Grande. No obstante existen otras lagunas y vegas en el sector. No existen estudios que detallen el funcionamiento de estas o PSA que realicen su monitoreo.

El estudio Análisis de las Amenazas Generadas por las Relaciones de Actividades Productivas y los Humedales de CIREN (2011) realiza una comparación entre dos imágenes satelitales entre 1989 y 2010, con las cuales calcula y compara el índice NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), concluyendo que la zona de estudio presenta una pérdida de vegetación y cursos de agua (Figura 7-5). Esta conclusión es relativa, ya que el estudio no menciona el mes en que se tomaron las imágenes satelitales ni contextualiza según las condiciones hidrológicas de los años en que fueron tomadas, lo que es importante al momento de realizar comparación ya que estos sistemas son fuertemente dependientes de las condiciones hidrológicas y sufren variaciones estacionales considerables.

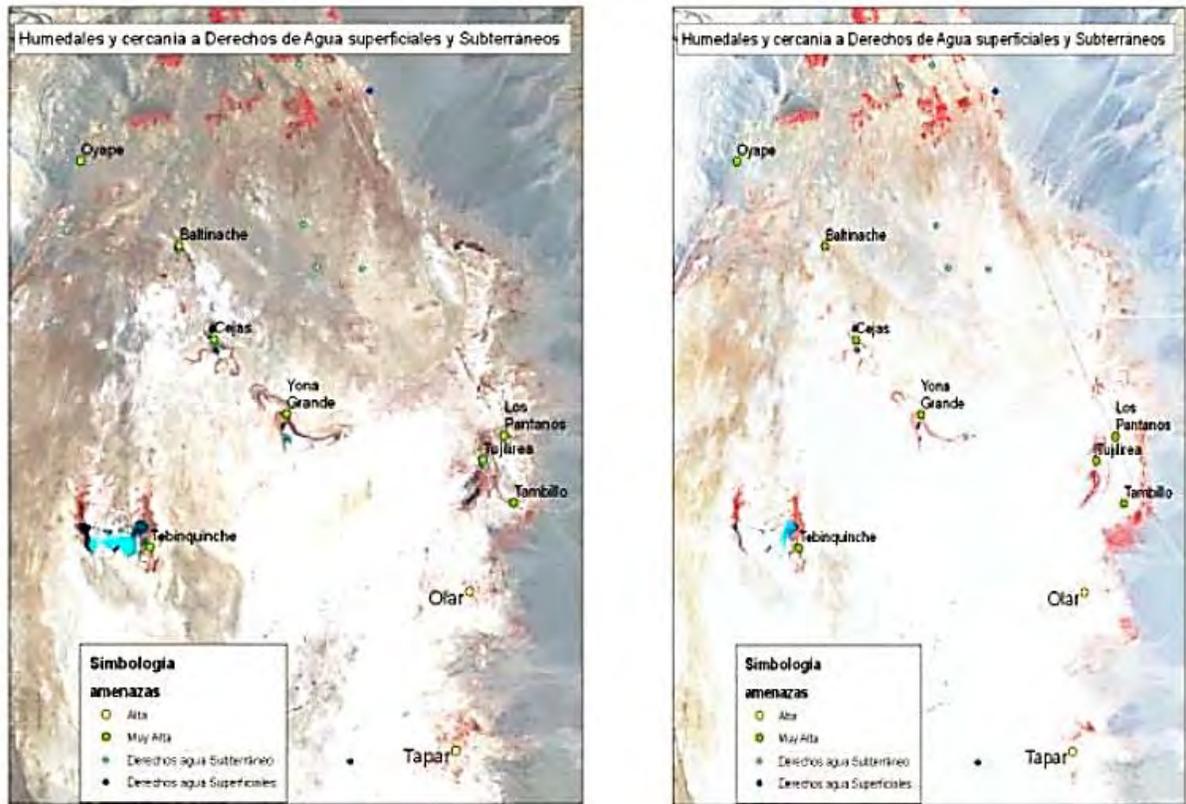


Figura 7-5 Lagunas sector norte (CIREN, 2011)

7.1.4 Parámetros hidráulicos

RioChilex (1999) el año 1997 realiza pruebas de bombeo en cinco pozos del sector norte con el fin de determinar las características del acuífero principal. Durante estas pruebas no se detectaron variaciones en el nivel del acuífero superior, por lo que concluyen que existe una desconexión hidráulica. Los resultados de las pruebas permiten estimar una transmisividad media del sistema acuífero principal es de 1450 m²/día y un coeficiente de almacenamiento de 10⁻³. Considera un gradiente del acuífero superficial de 0,5% con un caudal subterráneo pasante de 405 l/s. Finalmente considera para el acuífero principal el mismo gradiente con un caudal pasante de 1678 l/s.

7.2 Sector oriental

7.2.1 Unidades hidrogeológicas

La hidrogeología del sector oriental del Salar de Atacama se encuentra caracterizada por una serie de perforaciones y ensayos de bombeo, descritos por Díaz del Río (1972), Dalannais (1979), SQM (2005), Cornellá et al. (2009) y Salas et al. (2009), entre otros.

En el área de estudio se reconoce una secuencia formada por sedimentos clásticos (gravas, arenas, limos y arcillas), secuencias de ceniza e ignimbritas, que alcanzan una potencia reconocida del orden de 500 m. Toda esta secuencia cubre al basamento paleozoico.

De acuerdo a la información disponible, se han reconocido 2 acuíferos en el borde este, separados por un acuitardo, además del acuífero del núcleo del Salar de Atacama, ubicado al oeste del área de estudio (Figura 7-6). Los acuíferos del borde este corresponden a:

- a. Un acuífero superior libre, se distribuye a lo largo y ancho del sector oriental con un espesor saturado que varía entre los 40 y 100 m. Está conformado de gravas, arenas gruesas y en algunos sectores de arena mediana. La base del acuífero corresponde a una ignimbrita. Se caracteriza por presentar una mejor calidad de agua que el acuífero confinado (Dalannais, 1979).
- b. Un acuitardo: Corresponde a una toba de color gris, muy densa y compacta, de unos 10 m de espesor, que lateralmente varía a una Arcilla gris compacta y plástica. Este acuitardo se reconoce desde los pozos de Camar hacia el sur. (Dalannais, 1979).
- c. Un acuífero confinado, que subyace al acuitardo. Corresponde a sedimentos finos (principalmente arena, lentes de limos y arcilla, ceniza y materiales calcáreos). Tienen un espesor promedio de 100 m pero con fuertes variaciones laterales, y presenta intrusiones de salmuera desde el Salar, debido a su cota relativa al Salar y que presenta un menor flujo que el acuífero libre (Dalannais, 1979).

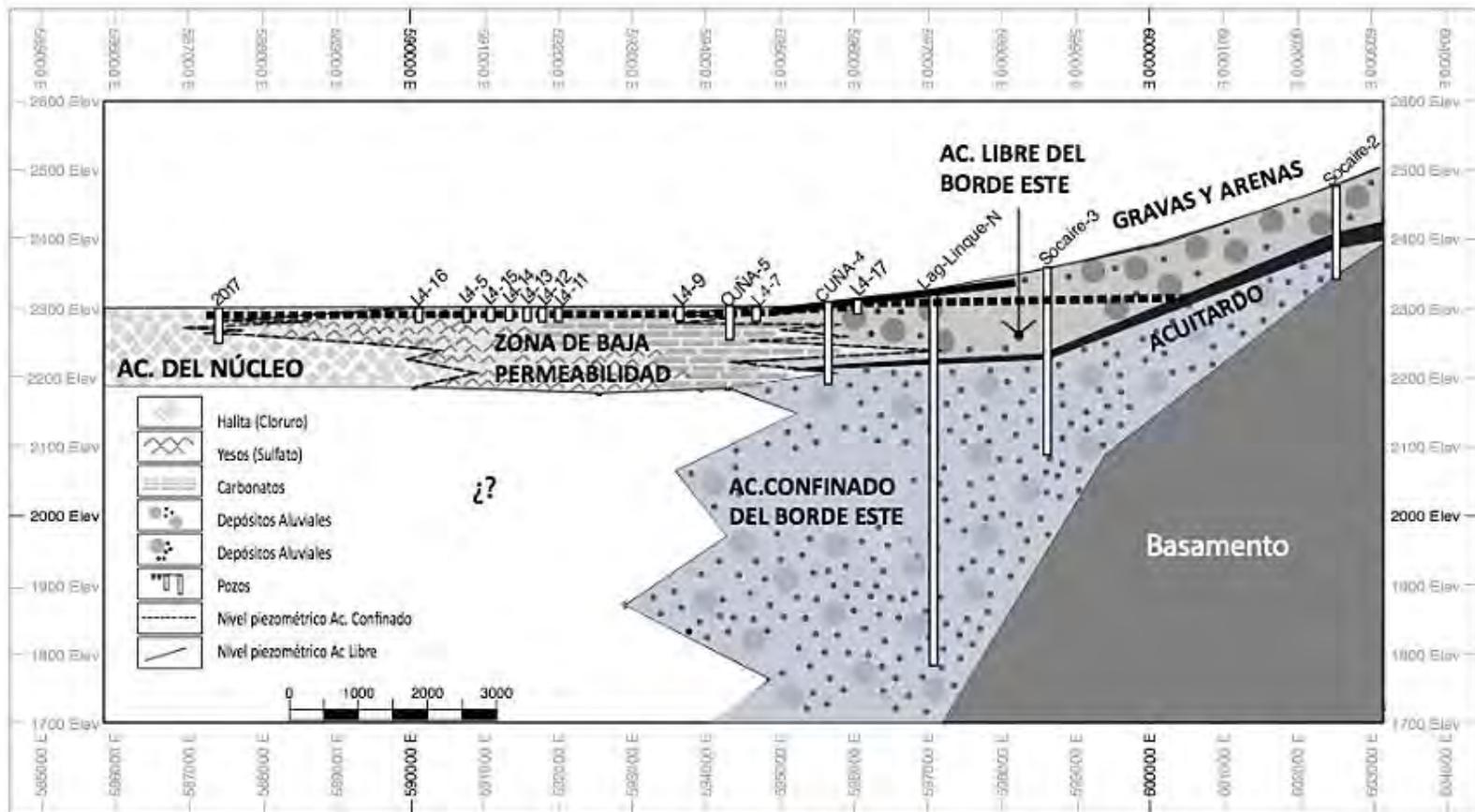


Figura 7-6 Perfil hidrogeológico del borde oriental del Salar de Atacama

Fuente: Fock (2011)

7.2.2 Piezometría

En esta zona existe un extenso monitoreo de niveles, química y ambiental por parte de SQM y CONAF, dado que se encuentran lagunas de importancia ecológica (Sistema Soncor y Aguas de Quelana).

Salas et al., 2010 realiza una piezometría para el margen oriental del Salar de Atacama generada a partir de los pozos de monitoreo del PSAH de SQM. La piezometría se presenta en la Figura 7-7. Es posible observar que las líneas equipotenciales son aproximadamente paralelas a la topografía, con un mayor gradiente piezométrico en la zona del cambio de pendiente entre los depósitos aluviales y los depósitos salinos. Los puntos verdes muestran la ubicación de los pozos utilizados para el cálculo de la piezometría. Las estrellas verdes muestran la ubicación de los pozos de bombeo de la DGA, donde se observan conos de depresión para los dos más meridionales. Los pozos de bombeo de norte a sur corresponden a Mullay, Allana, Camar, Socaire y P-2.

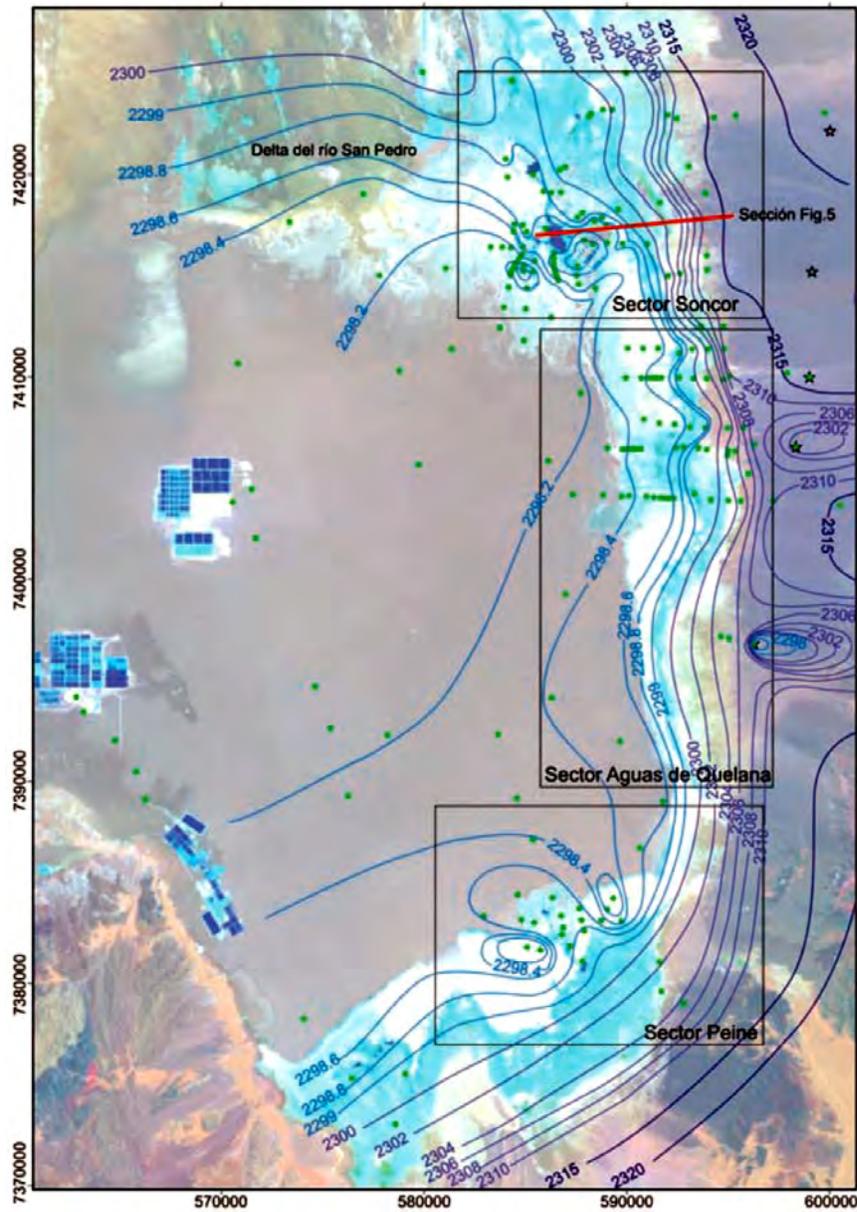


Figura 7-7 Piezometría borde oriental (Salas et al., 2010)

Como se describe en el PSAH de SQM 2012, al este de esta zona, sobre los depósitos aluviales, se ubican los pozos Mullyay, Allana, Camar-2 que comenzaron a operar en año 2008 y el Socaire-5 con anterioridad (Figura 7-9). El inicio del bombeo produjo un cambio en el comportamiento histórico de algunos pozos de la zona aluvial.

Dado lo anterior, los pozos más cercanos a las zonas de bombeo muestran un descenso pronunciado, por ejemplo el pozo L1-1 (Figura 7-9). Por otro lado, aquellos pozos más lejanos muestran un efecto mínimo y con un desfase temporal.

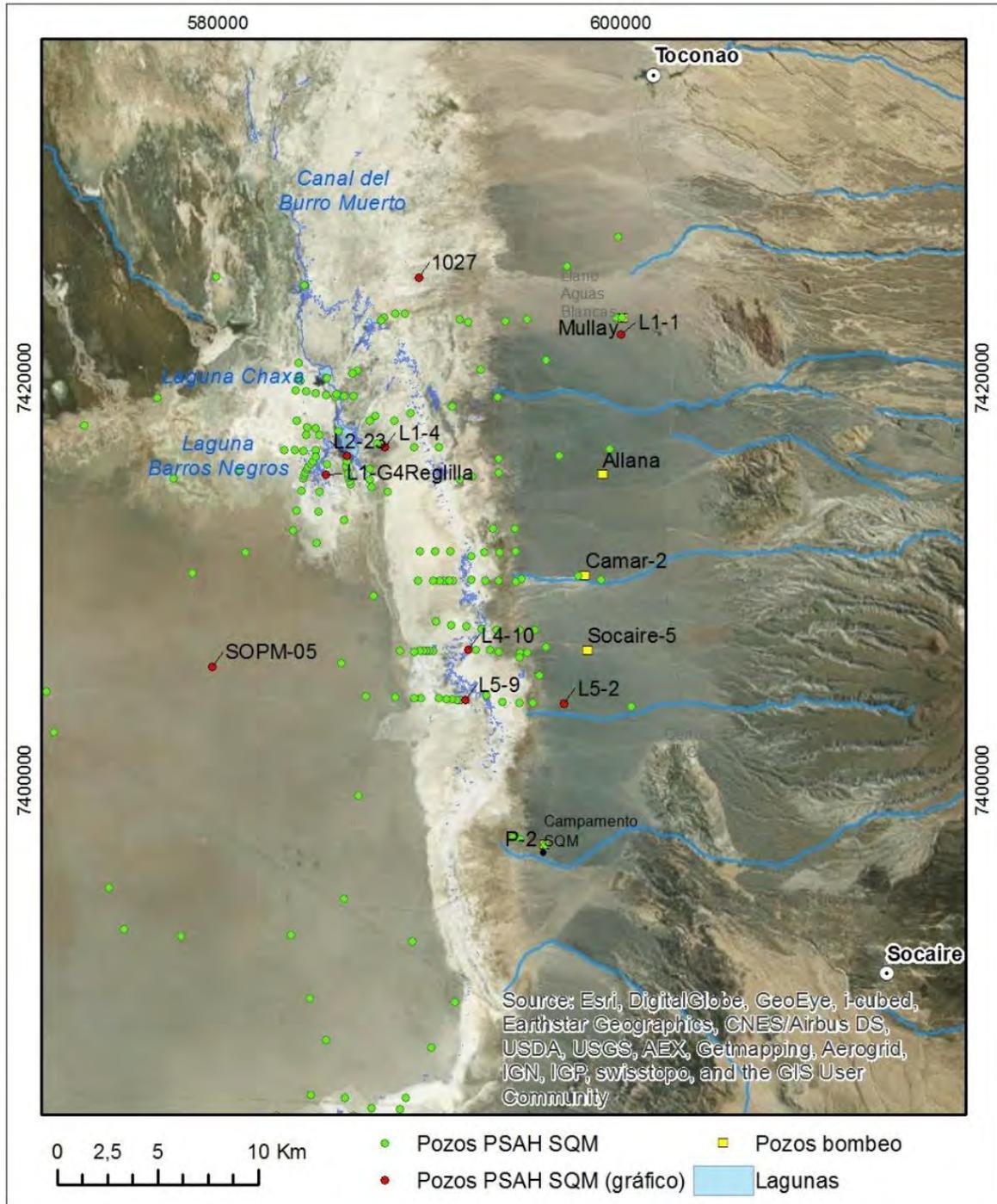


Figura 7-8 Ubicación pozos margen oriental

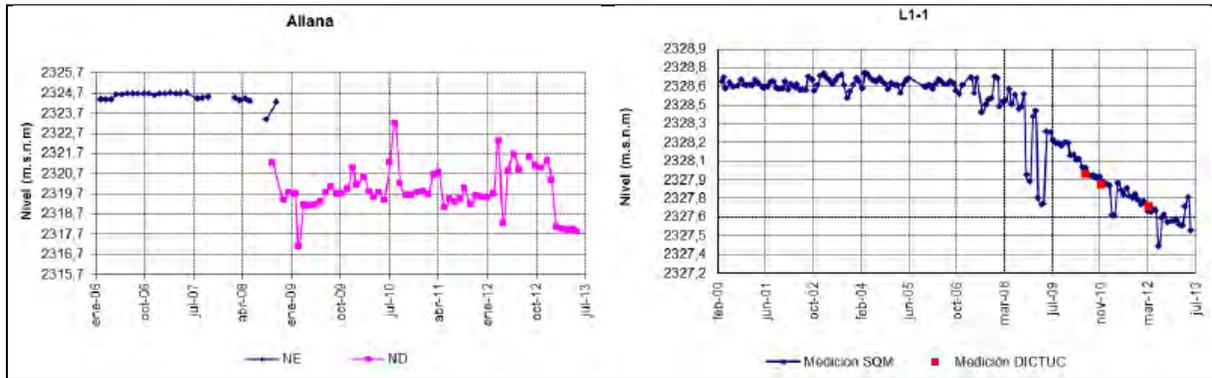


Figura 7-9 Pozos Allana y L11-1 (PSAH SQM 2012)

Los pozos ubicados en la zona marginal (zona de baja permeabilidad Figura 7-6) se caracterizan por tener un comportamiento estacional dado principalmente por el efecto de la evaporación y por el aumento de flujos subsuperficiales y subterráneos en época invernal. En la Figura 7-10, se muestra el comportamiento temporal de dos pozos L1-4 y 1027. El pozo 1027, que se ubica al noreste del sistema Soncor muestra un comportamiento estacional que varía entorno a los 20 cm, presentando una tendencia estable a lo largo del tiempo de monitoreo desde el año 1997 al 2013 (Figura 7-10). En el pozo L1-4 es posible observar un comportamiento estacional además, se destaca el aumento significativo en el nivel en Febrero del 2012. Esto se explica debido a las lluvias ocurridas entre el 8 y 15 de febrero de 2012, las que acumularon 46,9 mm. Posterior a este evento el nivel fue disminuyendo, pero manteniéndose por sobre los niveles observados a enero de 2012.

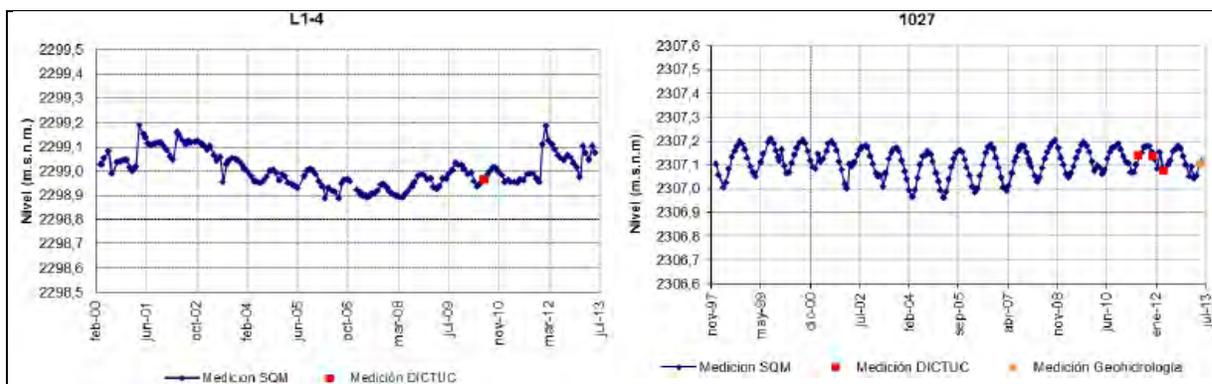


Figura 7-10 Pozos L1-4 y 1027 (PSAH SQM 2013)

7.2.3 Sistemas lacustres

En el margen oriental se identifican dos sistemas lacustres principales: el Sistema Soncor y Aguas de Quelana. Estos sistemas son descritos a continuación.

7.2.3.1 Sistema Soncor

El sistema Soncor se ubica en el margen oriental al sur oeste de Toconao. Este sistema lo conforma el Canal del Burro Muerto, Laguna Puilar, Laguna Chaxa y Laguna Barros Negro.

En este sector, la piezometría que es paralela (N-S) al borde oriental del salar se curva hacia el oeste en el sistema Soncor tomando una orientación E-W en el norte del salar circundando el núcleo del salar (Figura 7-7).

El funcionamiento del sistema Soncor es descrito en el trabajo de Salas et al., 2010 como un sistema que es alimentado en forma superficial y subterránea (Figura 7-11). La presencia de la cuña salina provoca desbordamientos de agua subterránea al oeste de ella, que alimentan la laguna Puilar y contribuyen al Canal del Burro Muerto. El agua escurre superficial y subsuperficialmente hacia el sur-oeste. La laguna Chaxa es alimentada por el canal del Burro Muerto y su salida se ubica en el sur donde continúa el canal del Burro Muerto. Al sur de la Laguna Chaxa, las líneas equipotenciales no se ven afectadas por la presencia del canal, lo que demostraría la desconexión hidráulica del canal Burro Muerto respecto al acuífero, aspecto que se ha confirmado mediante aforos. La laguna Barros Negros depende de una alimentación mixta, recibe un aporte superficial proveniente del Canal del Burro Muerto y un aporte subterráneo por medio del canal Sur de Barros Negros de aguas que afloran en el sector. Por último, existe una zona de desbordamiento de la laguna Barros Negros llamado sector "Cola de Pez" que corresponde a una zona de infiltración.

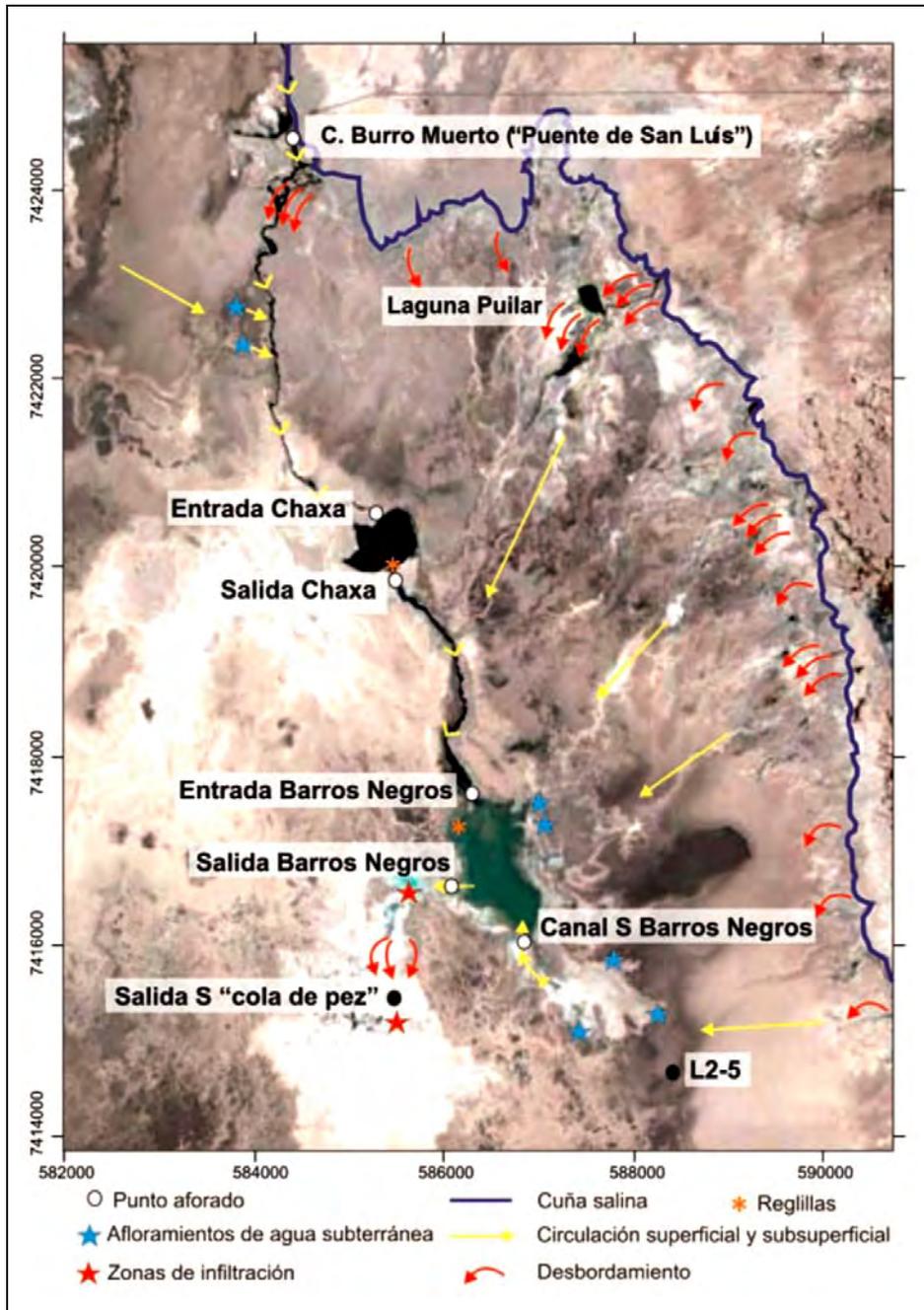


Figura 7-11 Sistema Soncor (Salas et al., 2010)

El sistema Soncor es extensamente monitoreado en el PSAH de SQM. En la Figura 7-12 se presenta la serie temporal de los niveles de la reglilla L1-G4 y el pozo L2-23, que se ubican en el sistema Soncor. La ubicación de estos puntos de monitoreo es presentada en la Figura 7-8.

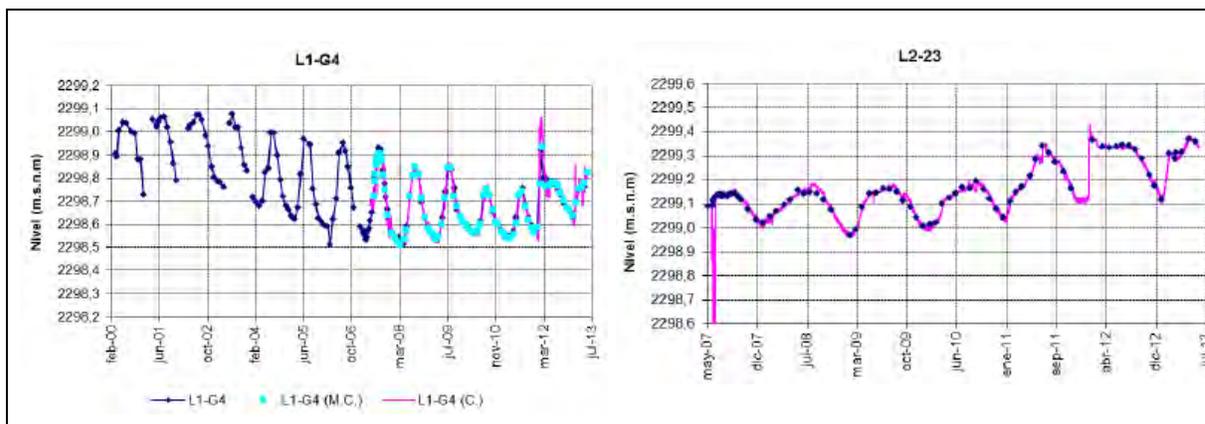


Figura 7-12 Reglilla L1-G4 y pozo L2-23

7.2.3.2 Aguas de Quelana

Aguas de Quelana corresponde a una franja de 10 km de largo en sentido N-S por 1 km de ancho donde se presentan pequeñas lagunas y zonas de inundación estacional.

Este sector indica un flujo subterráneo E-W, perpendicular a los alineamientos marcados por las zonas inundadas presentes a lo largo de la traza superficial de la cuña salina. En la zona central y S de este sector, la forma de las equipotenciales está controlada por la topografía característica de los depósitos distales de los abanicos aluviales del margen E, de manera que las líneas de flujo divergen ligeramente en dirección hacia el centro del Salar.

En la Figura 7-13 se muestra la piezometría del acuífero superior. En la figura se observa que la dirección de flujo es de este a oeste, y que se produce un fuerte cambio de gradiente en el límite entre el fin de los depósitos aluviales y la zona de baja permeabilidad constituida por yesos y carbonatos.

El PSAH de SQM monitorea los niveles del sector, en la Figura 7-14, se presenta la piezometría para los pozos L5-2 y L5-9. La ubicación en planta de estos pozos se muestra en la Figura 7-13. Como es posible observar, el pozo L5-2 se ubica en los depósitos aluviales y el nivel se ve fuertemente afectado por los bombeo del pozo Socaire-5. Por otro lado el pozo L5-9, que se ubica al oeste de la zona de lagunas de Aguas de Quelana muestra un comportamiento estacional donde la tendencia temporal mantiene su nivel. En la Figura 7-15, se muestra el comportamiento temporal de la reglilla L4-10 ubicada en una laguna.

Es posible observar que presenta un comportamiento estacional con una tendencia temporal estable.

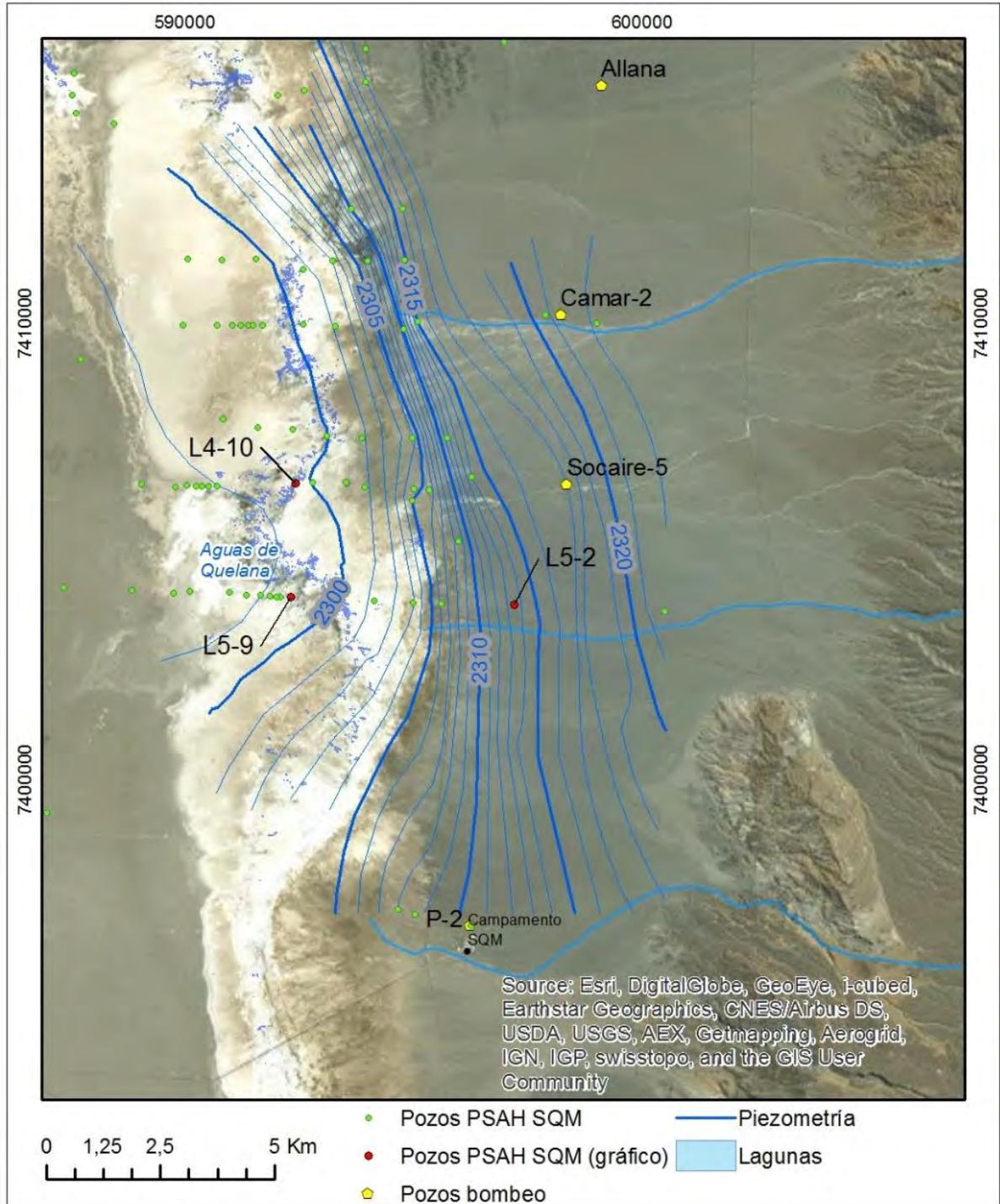


Figura 7-13 Piezometría Aguas de Quelana (modificado de Fock, 2009)

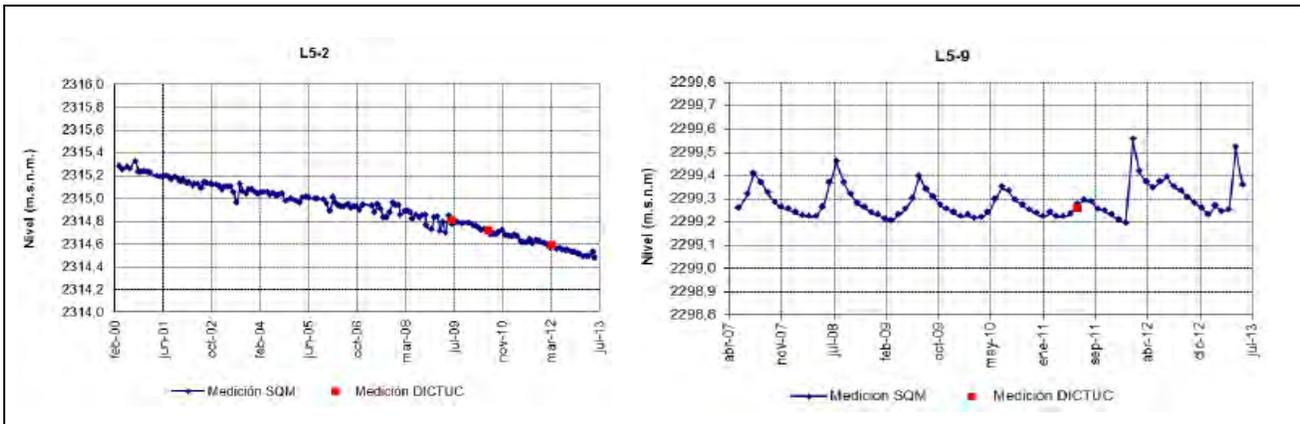


Figura 7-14 Pozos L5-2 y L5-9

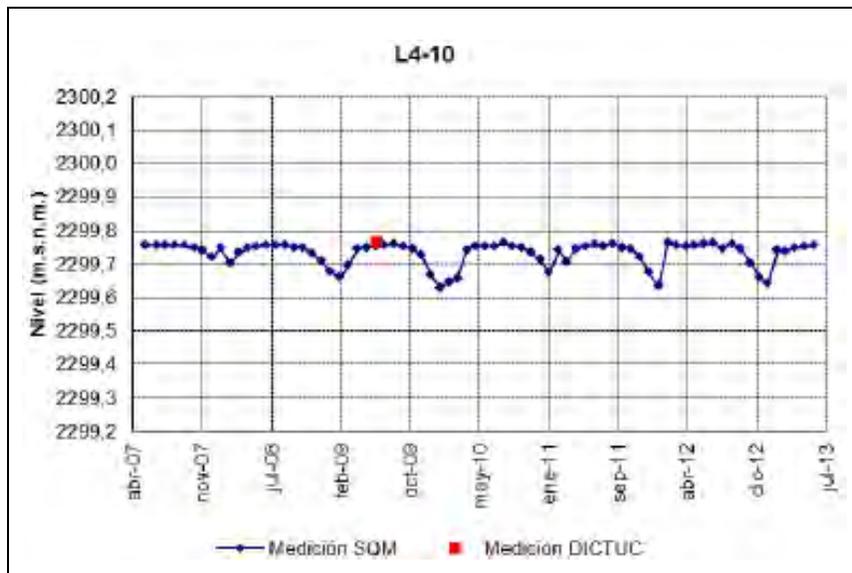


Figura 7-15 Reglilla L4-10

7.2.4 Parámetros hidráulicos

Los parámetros hidráulicos para la el acuífero superior libre del borde oriental del Salar de Atacama fueron determinados mediante pruebas de bombeo en el estudio de Dalannais (1979). Los resultados se presentan en la Tabla 7-1.

Tabla 7-1: Parámetros hidráulicos (Dalannais 1979)

Pozo bombeo	N-UTM	E-UTM	Espesor saturado	Litología	Caudal bombeado (l/s)	Método de análisis	T (m ² /d)	K (m/d)	S
Camar 2	7410342	593253	75	arena gruesa, arena fina y limo	60	Jacob	1350	18	1.4 10 ⁻³
						Rec. Theis	2315	30	-
						Walton	930	12.4	2.2 10 ⁻³
						Jacob	1265	17	-
						Rec. Theis	905	12	-
Socaire5	74065S1	598342	65	grava media	65	Berkaloff	984	15	-
						Boulton	1325-1514	21,26	5,3 10 ⁻⁴ -1.2 10 ⁻³
						Jacob	935	14,4	-
Mullay 1	7423054	600099	60	grava fina y arena fina	40	Boulton	860-917	15	2 10 ⁻⁴ - 3 10 ⁻²
						Berkaloff	2362	43,8	9,3 10 ⁻⁵ -2 10 ⁻³
						Berkaloff	1100	18	-
Allana 1	7415249	599138	78	grava media y arena media	40	Jacob	1265	15	-
Aguada 2	7431115	599642	60	grava media y arena gruesa	80	Boulton	1376-1413	23	3.14 10 ⁻⁴ -1.4 10 ⁻¹
						Rec. Theis	3954	65,9	3.4 10 ⁻²
						Jacob	2220	37	-
Zarzo 1	7458722	591796	22	grava media y arena gruesa	50	Walton	960	43	5 10 ⁻⁴
						Jacob	1.337	63	-

7.2.5 Interpretación de los resultados del levantamiento geofísico

Las secciones TEM muestran dos unidades que podrían contener agua. La más superficial se ubica generalmente entre las cotas 2.200 y 2.250 m s.n.m. y tiene un espesor típico de aproximadamente 10 m. La más profunda se ubica por debajo de la cota 2.200 m s.n.m. y, como se describió en la sección 5.5.2.3, se acuña hacia el este. En esta última unidad se ha identificado en las secciones TEM la cuña salina.

En las secciones MT se han identificado tres zonas de baja resistividad, ubicadas a cotas entre 900 y 2.000 m s.n.m. Estas zonas están ubicadas a lo largo de la sección 1, y fueron detectadas por las estaciones 6 y 7 (al sur de Toconao), 11 y 12 (al norte de Talabre), y 20 a 22 (frente al volcán Tumisa). Si bien es posible que estas zonas de baja resistividad se asocien a que en estos sectores existen pasos subterráneos profundos de agua, ésta no es la única interpretación posible. Por lo tanto, las secciones MT sirven, más bien, para descartar las zonas de baja resistividad como posibles zonas de paso de agua subterránea a gran profundidad.

7.3 Sector sur

7.3.1 Unidades hidrogeológicas

De acuerdo a lo descrito en el EIA de RWL (Anexo 3 realizado por SGA), en este sector se ponen en contacto dos acuíferos. Por un lado está el acuífero del núcleo, en contacto con el acuífero salobre Negrillar-Monturaqui. La diferencia entre las densidades de estos acuíferos define una zona de interfaz entre ellos. La salmuera se acuña hacia el sur y el agua salobre se sitúa sobre esa interfaz, aflorando en la parte más distal de la misma formando lagunas, que son características del margen distal de la zona de transición. Esta interfaz salina ocupa el margen sur y el margen oriental de la cuenca del Salar de Atacama, alcanzando profundidades que se han registrado hasta el entorno de los 70 m en la zona situada al Sur de Tilopozo.

En los bordes Sur y al igual que el sector oriental, predominan unidades sedimentarias, que dan lugar a unidades hidrogeológicas menores. Estas unidades corresponden a depósitos aluviales que se acuñan hacia el interior de la cuenca.

En este sector se define una unidad que es descrita como el acuífero Negrillar-Monturaqui que es descrito en el EIA de SCL como un acuífero semiconfinado o confinado, que se emplaza en una unidad volcano-sedimentaria, formada por una alternancia de depósitos aluviales y de depósitos de origen volcánico. El espesor de los depósitos es variable, pero se observa un acuñamiento de los mismos según nos adentramos hacia partes más distales de la cuenca. Los depósitos sedimentarios son heterogéneos, existe una variación de tamaño desde arcilla a grava, y del grado de retrabajamiento. En las zonas distales se observa una mayor cantidad de finos. Los depósitos volcánicos, incluyen depósitos de cenizas, tobas volcánicas e ignimbritas. En esta unidad se desarrolla un acuífero que localmente puede ser semiconfinado o confinado, cuando subyace bajo capas de arcillas. Estas capas de arcillas pueden alcanzar espesores de hasta 50 m. En la Figura 7-16, se muestra un esquema de la hidrogeología del sector. Es posible observar la presencia de la cuña salina (color verde) corresponde a la interfaz entre el acuífero del núcleo y el acuífero Negrillar-Monturaqui. La cuña provoca el ascenso del agua donde se forman lagunas.

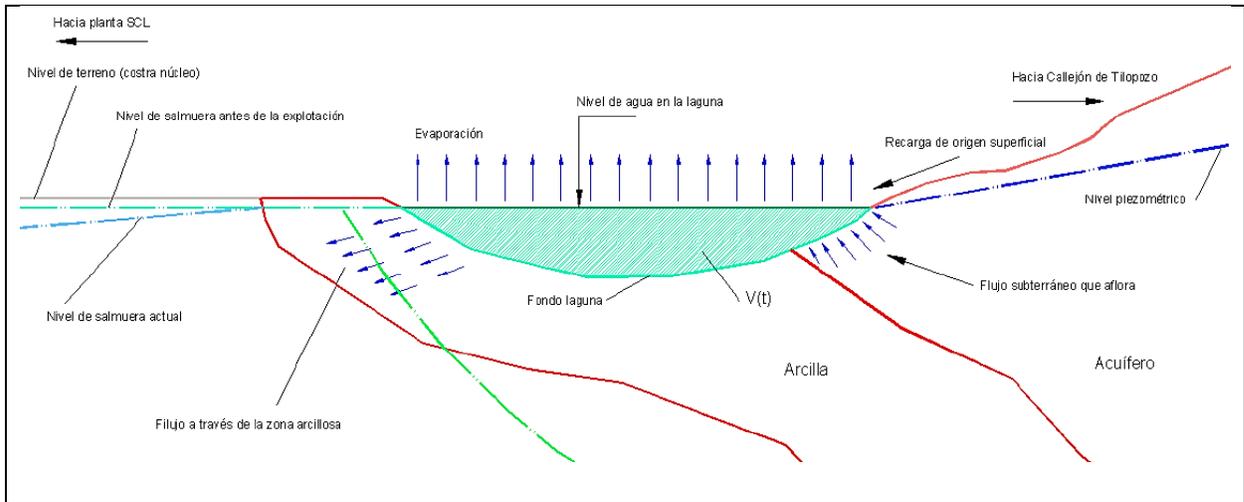


Figura 7-16 Diagrama hidrogeología sector sur (modificado de EIA RWL)

7.3.2 Piezometría

En la Figura 7-17 se presenta la piezometría para el año 2012 para el sector sur (EIA Rockwood Lithium, Anexo 3). Es posible observar que el flujo de agua subterránea tiene dirección NW. Al lado oeste se observa el contacto de las rocas paleozoicas del Cordón de Lila, que corresponden a un basamento impermeable. Con una línea roja se ha delimitado la zona de interfaz de agua salobre con el acuífero Monturaqui proveniente del sur este de la cuenca.

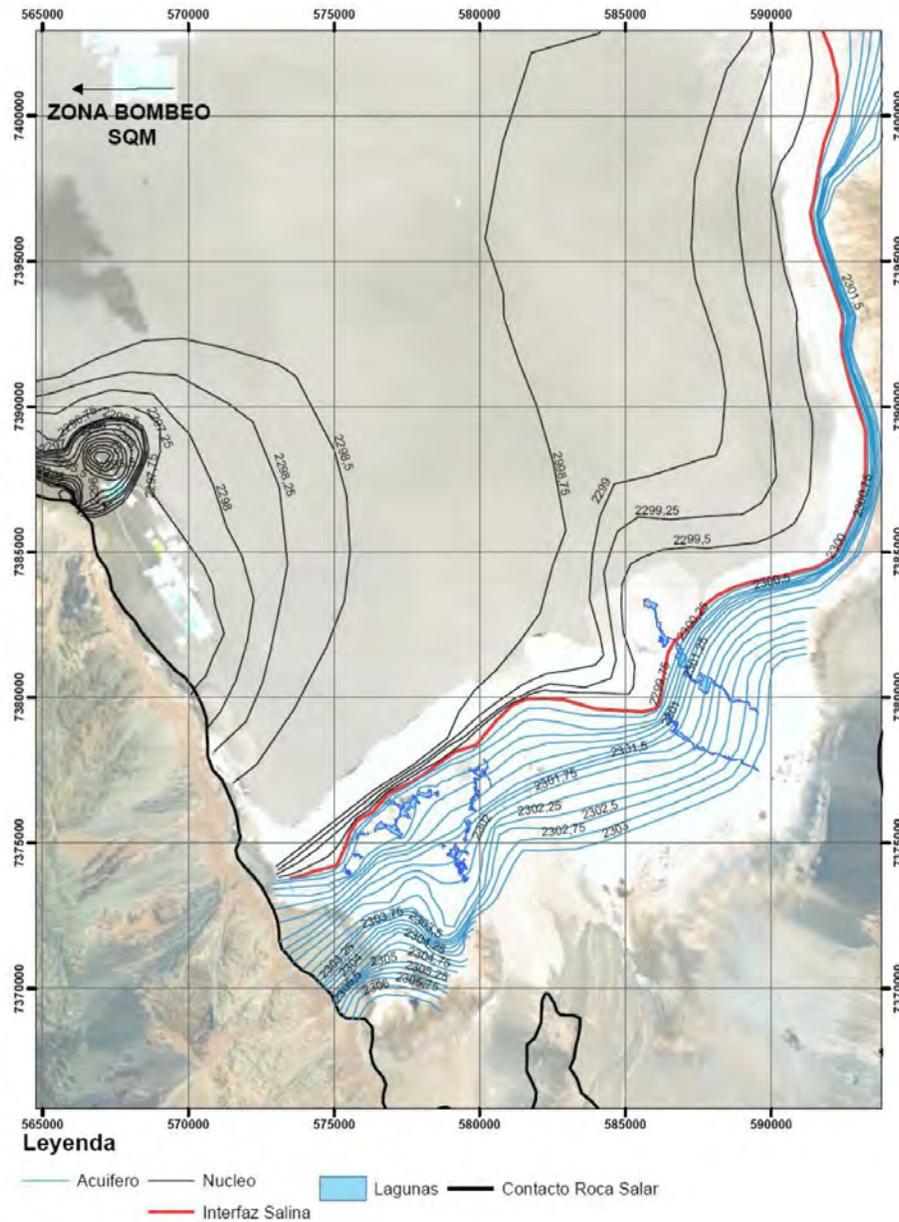


Figura 7-17 Piezometría 2012 sector sur (Anexo 3 de EIA de RWL)

En la Figura 7-18, se presenta la ubicación de tres puntos de monitoreo del PSAH de SQM. El pozo L12-3 ubicado en las cercanías de la laguna La Brava muestra un comportamiento estacional con variaciones de 10 cm aproximadamente. Desde el inicio del periodo de monitoreo el año 2007 ha mostrado una tendencia estable hasta la fecha (Figura 7-19). El pozo L10-4 ubicado en la cercanía de la laguna Saladita y cercano al acuífero del núcleo muestra un tendencia al descenso muestra un comportamiento con recargas en periodos lluviosos (Figura 7-19).

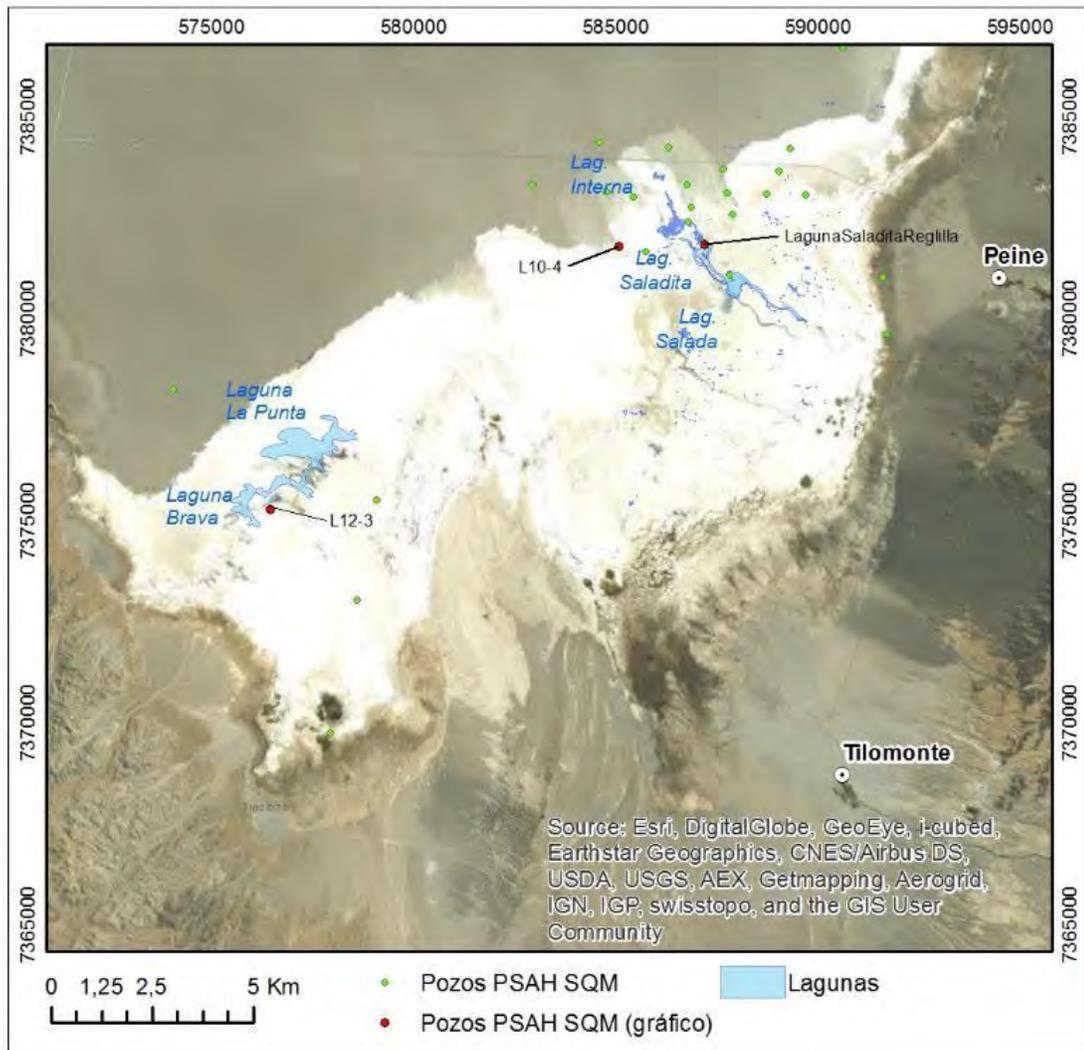


Figura 7-18 Pozos L10-4 y L12-3 y Reglilla Saladita

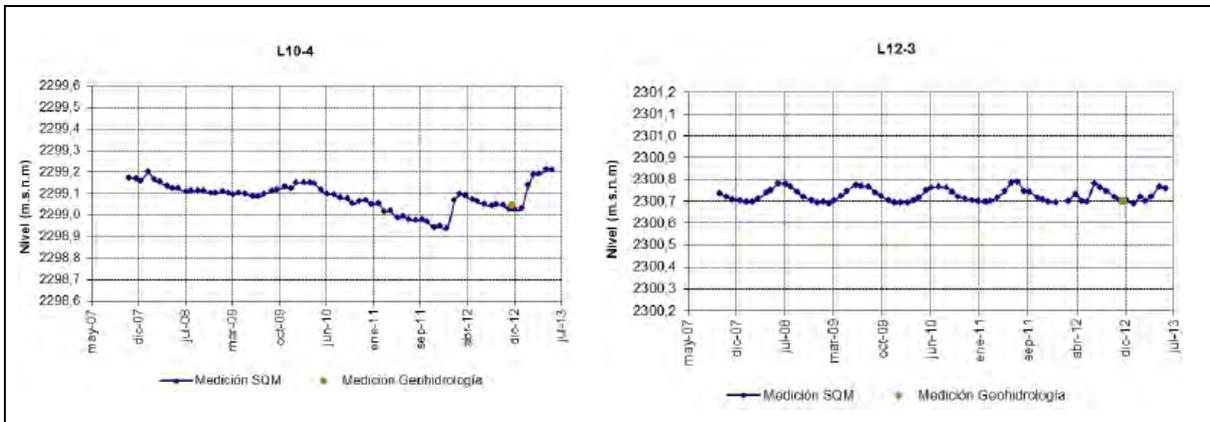


Figura 7-19 Pozo L10-4 y L12-3

7.3.3 Sistemas lacustres

Como se observa en la Figura 7-17, en el sector de Peine y Tilopozo, la principal dirección del flujo subterráneo es SE-NW hacia el centro del Salar. Salas et al., 2010, afirma que en el entorno de las lagunas Interna y Saladita se notan los efectos de la presencia de un acuífero multicapa sobre la piezometría local. Identifica un sector con niveles piezométricos relativamente elevados, asociado a la existencia de un nivel acuífero colgado. Esto sería explicado por la presencia de niveles de finos caracterizados por permeabilidades verticales extremadamente bajas. Su presencia en el subsuelo indica la persistencia del ambiente de sedimentación lacustre restringido y las zonas de desbordamiento adyacentes. Esta zona está flanqueada por dos sectores con mínimos niveles relativos, que podrían estar asociados a la existencia de zonas de infiltración preferencial a través de litologías más permeables.

El PAT de MEL 2013, indica que los resultados del monitoreo en los puntos someros de las lagunas no muestran tendencias claras de descenso o ascenso de los niveles de las lagunas. Donde distintos puntos de monitoreo de la Laguna La Punta presentan ascensos y/o descensos, no indicando una tendencia general. Los puntos someros de la laguna La Brava presentan una estabilidad en sus niveles. El PSAH de SQM en la Laguna Saladita permite da cuenta que el nivel en esta laguna permanece estable con variaciones estacionales menores (Figura 7-20).

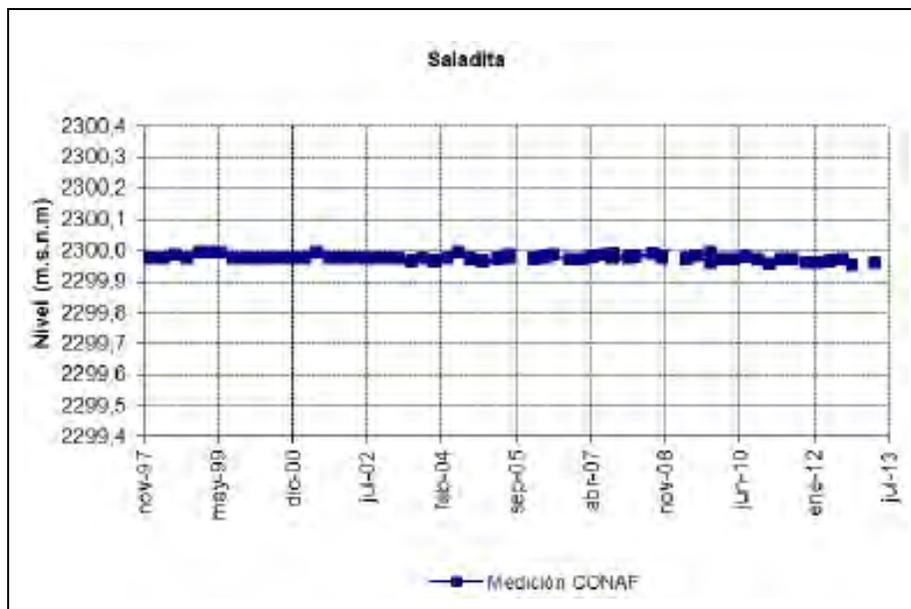


Figura 7-20 Reglilla Saladita

Adicionalmente, el PAT de MEL monitorea semestralmente el área del espejo de agua de las lagunas a través del análisis de imágenes satelitales. En la Figura 7-21, se presenta un gráfico con las superficies de las lagunas a partir del año 2002 al año 2013. Es posible observar que existe un comportamiento estacional, donde en julio se observa una mayor superficie de aguas someras.

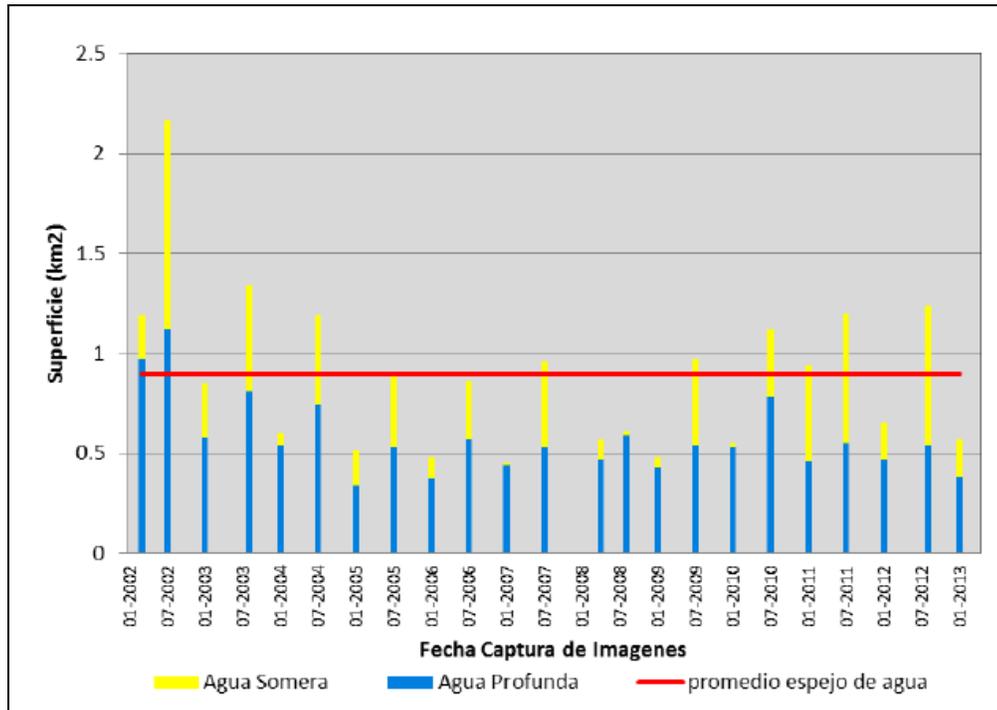


Figura 7-21 Superficie lagunas sector sur (PAT MEL 2013).

7.3.4 Parámetros hidráulicos

Los parámetros hidráulicos del acuífero Negrillar-Monturaqui han sido presentados en el informe del Proyecto de Estudio y Monitoreo del Recurso Hídrico de la Cuenca del Salar de Atacama, que realizaron en conjunto las compañías mineras SQM, MEL, CMZ y SCL el año 2003.

Las transmisividades obtenidas a partir de los modelos numéricos son más altas en Negrillar (hasta 3.600 m²/día) que en el cauce principal de Monturaqui (800 a 2.000 m²/día) y a lo largo del Callejón de Tilopozo (hasta 1.200 m²/día). Esto concuerda en términos generales con el patrón observado en los valores obtenidos a partir de los análisis de las pruebas de bombeo. Los parámetros del acuífero derivados del cotejo e interpretación de los datos de programas de terreno por MEL anteriores hasta 1996, se presentan en la Tabla 7-2.

Tabla 7-2 Parámetros hidráulicos sector sur (SQM/MEL/CMZ/SCL, 2003)

Parámetro	Gama
Coeficiente de almacenamiento (%)	5-10
Coeficiente de almacenamiento Negrillar/Tilopozo	$1 \cdot 10^{-4}$ - $2 \cdot 10^{-4}$
Conectividad hidráulica (m/d) Monturaqui	1-2
Conectividad hidráulica (m/d) Negrillar/Tilopozo	1,5-3
Flujo Pasante (l/s)	450-900

7.4 Núcleo

7.4.1 Unidades hidrogeológicas

El acuífero del núcleo del salar de atacama se emplaza al oeste de los acuíferos reconocidos en el sector oriental del salar (Figura 7-6), separado por una zona de baja permeabilidad asociada a los depósitos de sulfatos y carbonatos reconocidos en la zona marginal del Salar. Este acuífero se desarrolla principalmente en el espacio entre los cristales de halita del Núcleo. DICTUC, 2004 indica que está desconectado hidráulicamente del acuífero aluvial.

Lowenstein et al., 2003 provee una descripción de tres sondajes de diamantina ubicados en el núcleo del salar. Los sondajes 2031 y 2005, de profundidades 40 m y 100 m respectivamente se ubican al oeste de la Falla del Salar (Figura 5-1). Estos sondajes son descritos como extensos paquetes de halita con variaciones texturales dependientes de las condiciones paleoclimáticas, donde se destacan intercalaciones menores de capas de yeso y arcillas. Estas capas de arcilla y yeso son identificadas en ambos sondajes a una profundidad aproximada de 14-15 m. Además en el sondaje 2005 se identifica un paquete de yeso y arcillas entre las profundidades 47-49 m y 53-63m. Estas capas de baja permeabilidad podrían aislar o dividir el acuífero del núcleo localmente. El sondaje 2002 ubicado al este de la falla es descrito como un extenso paquete de halita con variaciones texturales. No se reconocen capas de yeso-arcillas.

7.4.2 Piezometría

No se cuenta con una piezometría del núcleo. Los bombeos de SQM y RWL generan conos de depresión locales en el sector y la información disponible del PSAH y RWL no permite

generar una piezometría de detalle para este sector. Se muestran dos pozos (E-101 y SOPM-05) que son monitoreados en el PSAH de SQM, la ubicación se presenta en la Figura 7-22 y las series temporales del nivel se presentan en la Figura 7-23. A partir de las series temporales es posible observar que el nivel desciende continuamente debido a la extracción de salmuera. No obstante el pozo SOPM-05 que se encuentra alejado de la zona de explotación ha mostrado aumentos en su nivel que corresponden a periodos de alta precipitación.



Figura 7-22 Ubicación pozos núcleo

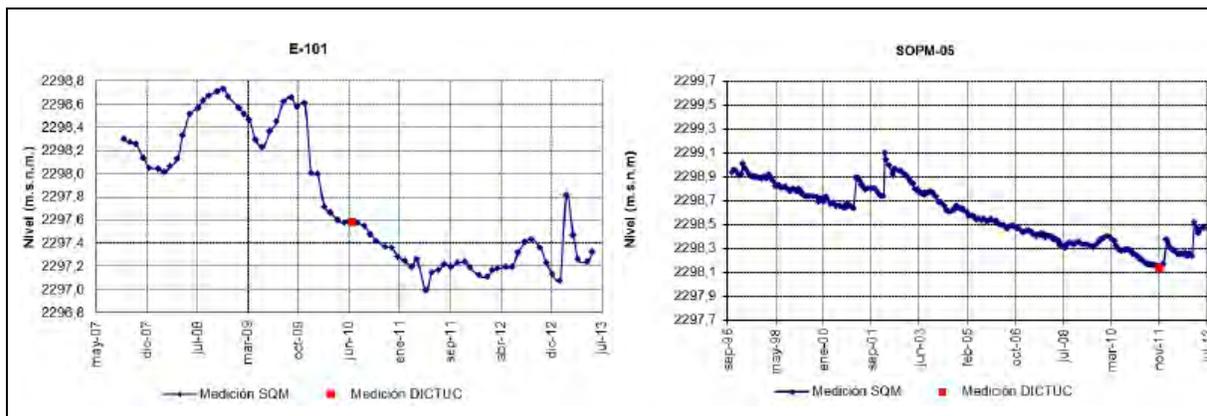


Figura 7-23 Pozos E-101 y SOPM-05

7.4.3 Parámetros hidráulicos

Esta sección se basa en la información proveniente del estudio "Proyecto de Estudio y Monitoreo del Recurso Hídrico de la Cuenca del Salar de Atacama en conjunto de las compañías mineras SQM, MEL, CMZ y SCL (RWL) del año 2003.

El estudio afirma que los valores de la conductividad hidráulica del núcleo del Salar han sido estimados a partir de estudios y pruebas de bombeo efectuadas en los pozos de SQM. Se ha encontrado que la conductividad hidráulica en el núcleo del Salar en los primeros 10 m de profundidad es del orden de 10 veces mayor que los siguientes 40 metros y 50 veces mayor que los siguientes 50 m. Se observa una gran dispersión en los valores de conductividad hidráulica medidos, variando entre 5×10^{-5} m/día y 5×10^3 m/día (posiblemente zona con cavidades). Las pruebas de bombeo realizadas a pozos de explotación de SQM, entregan valores de la transmisividad las que se presentan en la izquierda de la Figura 7-24. Con respecto a la porosidad, el estudio menciona que la porosidad tiende a disminuir exponencialmente con la profundidad. 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 7-24 se presenta la distribución de la porosidad efectiva promedio para los primeros 40 m de profundidad, utilizando una interpolación con un kriging lineal simple, y se presentan los valores

puntuales obtenidos por Hydrotechnica (1988) en Johnson, 2009. Los valores de la porosidad se presentan a la derecha de la Figura 7-24.

8. Hidroquímica

8.1 Fuentes de información

La información utilizada para elaborar la hidroquímica se recogió de seis fuentes bibliográficas:

- Geología de superficie, subsuperficie y Geoquímica del Salar de Atacama (Díaz del Río, Bonilla, & Peralta, 1972). Se construye un modelo geológico-hidrogeológico del Salar de Atacama, para lo cual, entre otras cosas, se utilizan 83 análisis químicos, distribuidos principalmente en los bordes norte y este del salar.
- Catastro y caracterización de las fuentes de aguas minerales y termales de Chile (Hauser, 1997). Se presentan las fuentes de aguas minerales y termales de Chile, y entre ellas se mencionan 3 fuentes en la cuenca del Salar de Atacama.
- Evaluación hidrogeológica acuífero sector norte Salar de Atacama (EDRA, 1997). Esta evaluación forma parte del Estudio de Impacto Ambiental para la Compañía Minera Riochilex, y que incluyó la realización de 20 análisis químicos en 6 puntos de muestreo ubicados en la mitad norte del salar.
- Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III regiones – Chile (Risacher, Alonso, & Salazar, 1999). Se realiza un análisis hidroquímico de las cuencas asociadas a los salares altiplánicos. Dentro de este estudio se incluyen 25 muestras químicas distribuidas en toda la cuenca del Salar de Atacama, pero principalmente hacia el norte, este y sureste del salar.
- EIA Modificación y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación solar en el Salar de Atacama (Gestión Ambiental Consultores, 2009). Dentro del Estudio de Impacto Ambiental se incluye el análisis de 17 muestras químicas ubicadas en el borde sureste del salar.
- Banco nacional de Aguas (BNA-DGA). Se incluyen series de datos correspondientes a 5 puntos de muestreos con registro entre los años 1966 y el presente, y que totalizan 324 muestras químicas.

En resumen, se tienen 463 análisis químicos en 125 puntos de muestreo, los que se encuentran distribuidos principalmente en las cuencas de los ríos San Pedro y Vilama, y hacia el este y sureste del salar (Figura 8-1). La tabla con la recopilación de los análisis químicos se presenta en el Anexo 4.

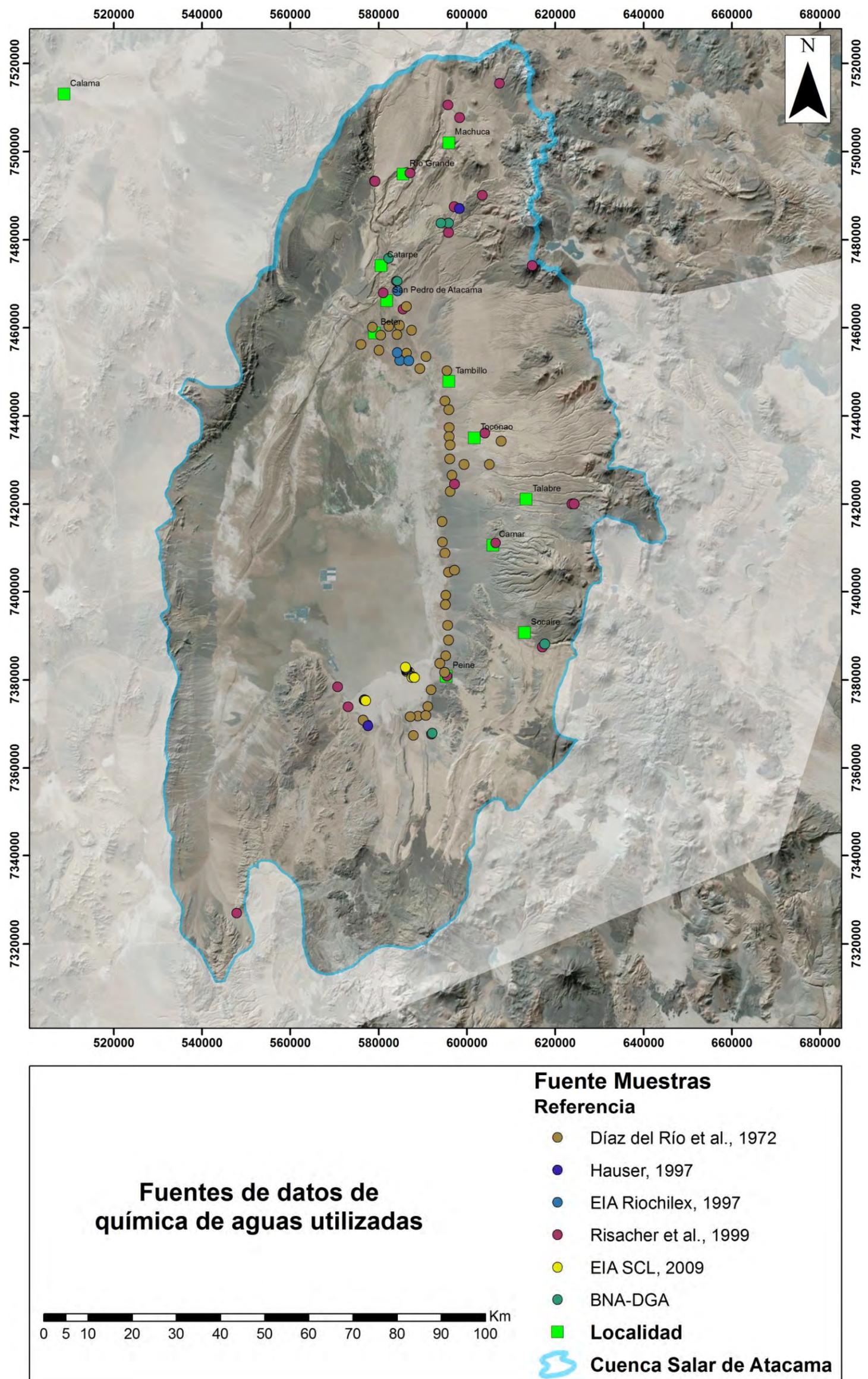


Figura 8-1: Ubicación y fuente de las muestras utilizadas en este trabajo.

8.2 Parámetros

8.2.1 Concentración de cloruro

Los cloruros constituyen una buena fuente para indicar el grado de evaporación del agua, debido a que la concentración de saturación es alta. Se observa que en general, las aguas que llegan al salar desde el sureste tienen una alta concentración de cloruros, lo que podría indicar que la cuña de intrusión salina en este sector se ha alejado mucho del salar, mientras que las muestras ubicadas hacia el norte y el este presentan un contenido de cloruros más bajo.

Con respecto a las muestras ubicadas en la parte norte, se puede observar como aumenta el contenido de cloruros en la medida que el agua va avanzando por el salar, lo que da muestra de la evaporación (Figura 8-2).

8.2.2 Relación Li/Cl

Tanto el litio como el cloruro son elementos que necesitan presentar una alta concentración en el agua para alcanzar la saturación, sin embargo, el litio se asocia a un origen magmático, mientras que el cloruro se puede asociar a una fuente meteórica o magmática. Por lo tanto, una alta relación Li/Cl indicará que el agua presenta mezcla con una fuente magmática (en este caso lo más probable es que sea a un volcán), mientras que una baja relación indicará que el agua es de origen meteórico, sin que los resultados estén afectados por la evaporación.

Esta relación ha permitido diferenciar las aguas del río Vilama, con una importante componente magmática, de las del río San Pedro, de origen principalmente meteórico. La componente magmática del agua se puede asociar a cualquiera de los volcanes ubicados en este sector.

En el borde este del salar, se reconocen dos zonas donde la relación Li/Cl es relativamente más alta. La primera se encuentra cerca del volcán Lascar y en la quebrada Aguas Blancas, de manera que fácilmente se puede interpretar que esta agua se asocia al volcán Lascar. La segunda se encuentra más al sur, y es más difícil de atribuir directamente a algún volcán.

Finalmente, al sureste del salar las aguas presentan una relación Li/Cl relativamente baja, aunque en el bode oeste del Cordón de Lila existen algunos afloramientos de agua donde esta relación es más alta (Figura 8-3).

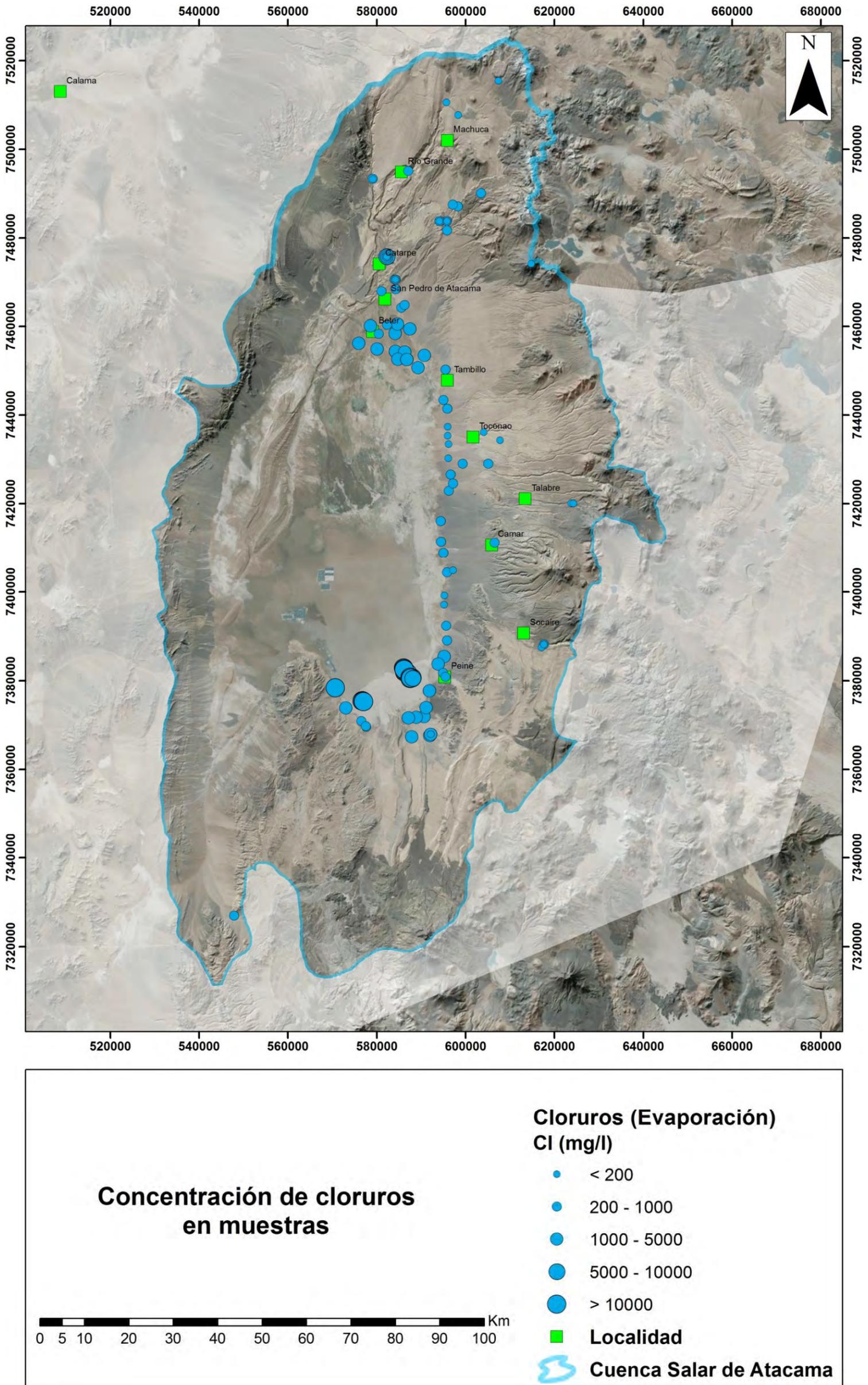


Figura 8-2 Concentración de cloruro (en mg/l) de las muestras

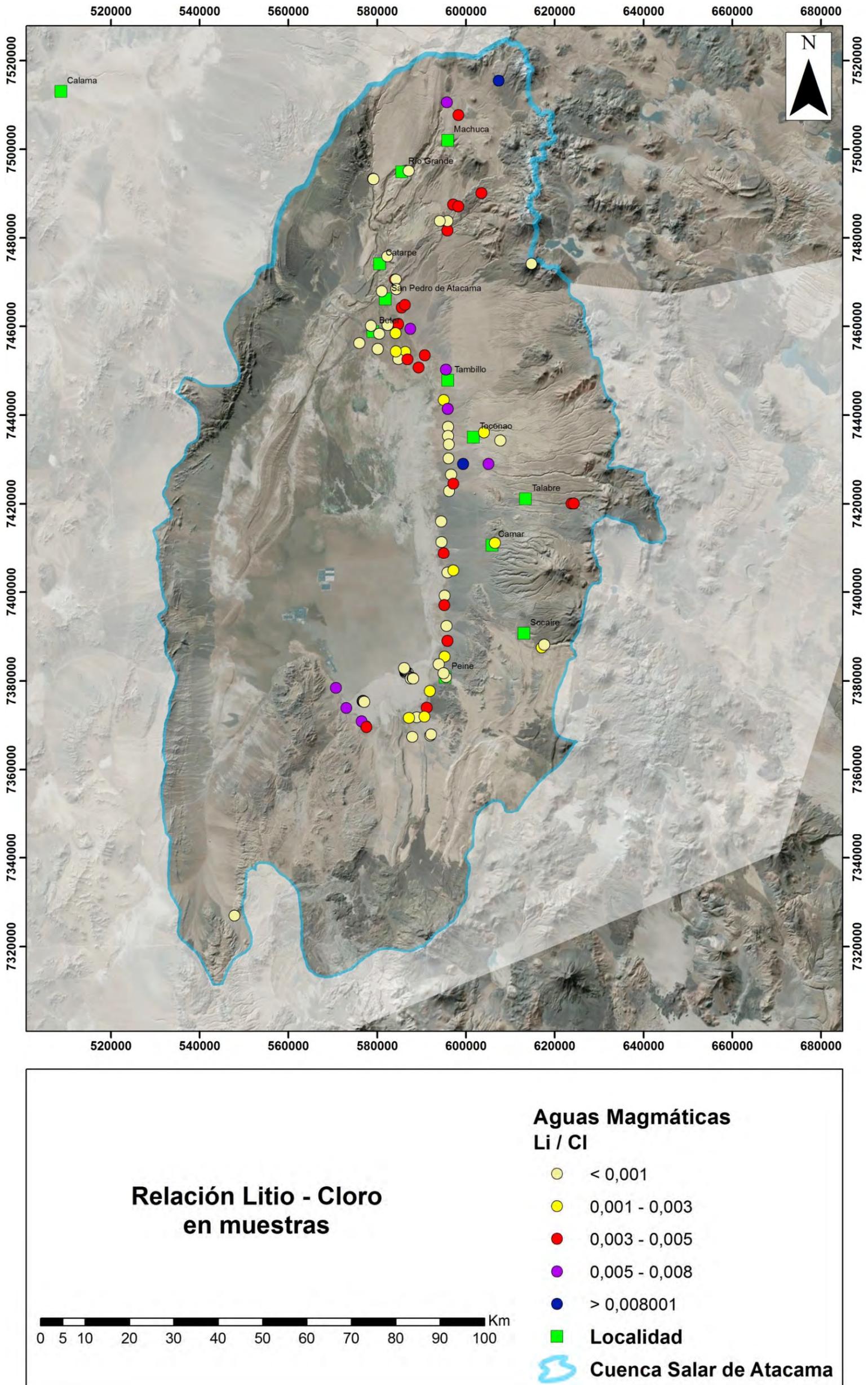


Figura 8-3 Relación Li/Cl de las muestras

8.3 Diagramas de Schöeller

Debido a que el catastro de análisis químicos es muy extenso, se construyeron diagramas de Schöeller con las muestras identificadas en distintos sectores de la cuenca, separándolas únicamente por ubicación geográfica.

Las muestras de la cuenca del río San Pedro siguen mayoritariamente un mismo patrón de comportamiento, y la mayor diferencia que existe entre ellas se asocia a que algunas muestras de agua se encuentran más evaporadas que otras. Estas aguas tienen como iones mayoritarios dominantes el cloruro y el sodio, y en segundo lugar el sulfato y el calcio. Existen algunas muestras con un comportamiento diferente, y que se asocian a algunos afluentes del río, como es el caso de las muestras ATA-1 y ATA-18.

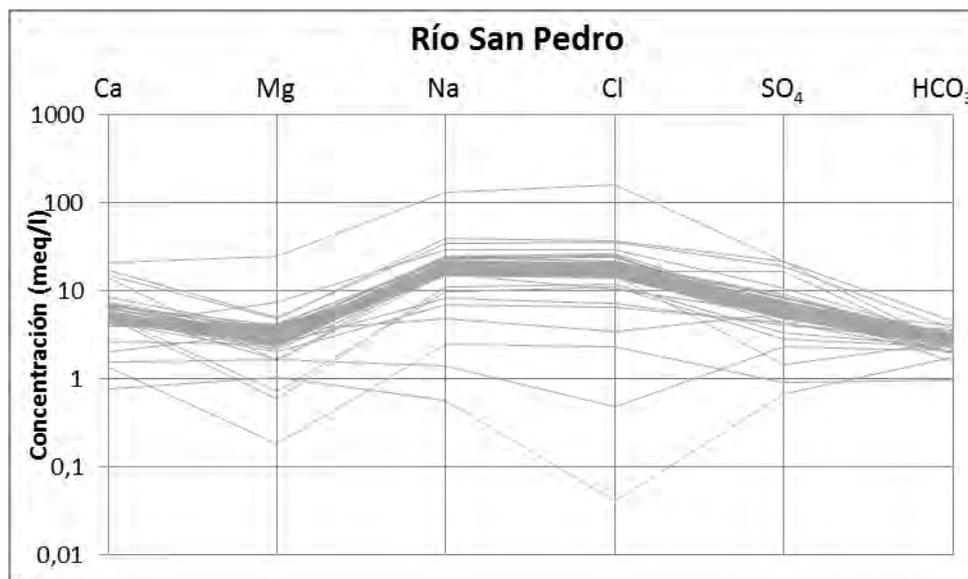


Figura 8-4 Diagrama de Schöeller con las muestras del río San Pedro

En las muestras del río Vilama también son el cloruro y el sodio los iones dominantes, sin embargo se observan variaciones mayores en la importancia relativa de los otros iones mayoritarios, lo que indicaría que estas aguas han estado expuestas a procesos de mezcla.

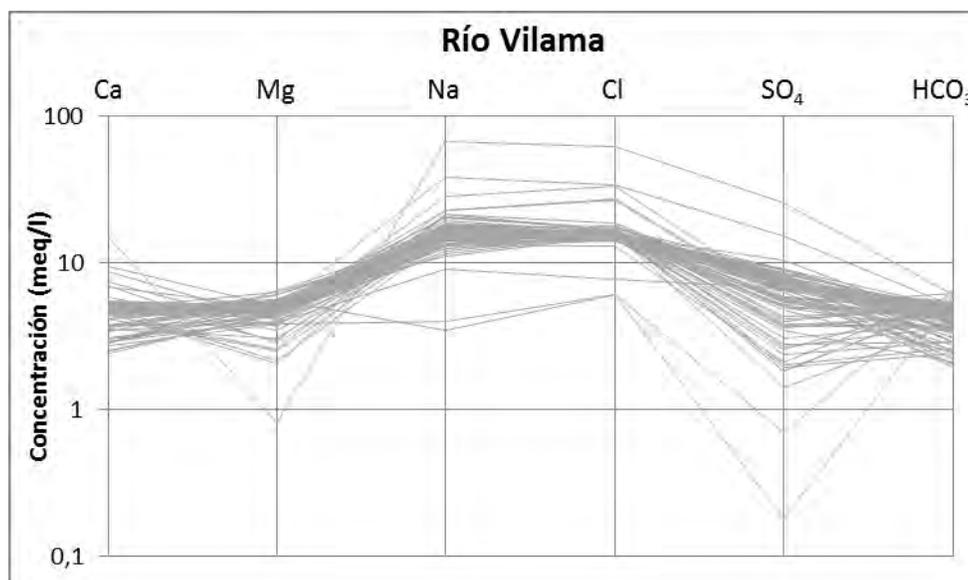


Figura 8-5 Diagrama de Schöeller con las muestras del río Vilama

Dentro del salar se han diferenciado aquellas muestras correspondientes al núcleo de aquellas ubicadas al norte de éste (Salar Norte). Esta diferenciación se ha hecho por dos razones. La primera es que las muestras del núcleo se encuentran mucho más evaporadas que las del norte, y por lo tanto, los diagramas de Schöeller no permitirían ver nada en la parte norte. La segunda es que las muestras del núcleo corresponden al extremo sureste de él, y por lo tanto, la historia evolutiva de estas aguas debiera ser completamente diferente a las del sector norte.

En este sentido, las muestras de la parte norte del salar son muy parecidas a las de los ríos San Pedro y Vilama, pero más evaporadas, mientras que las muestras del núcleo son aguas altamente evaporadas, en donde se observa cómo se va saturando el agua en los diferentes cationes en la medida que se evapora.

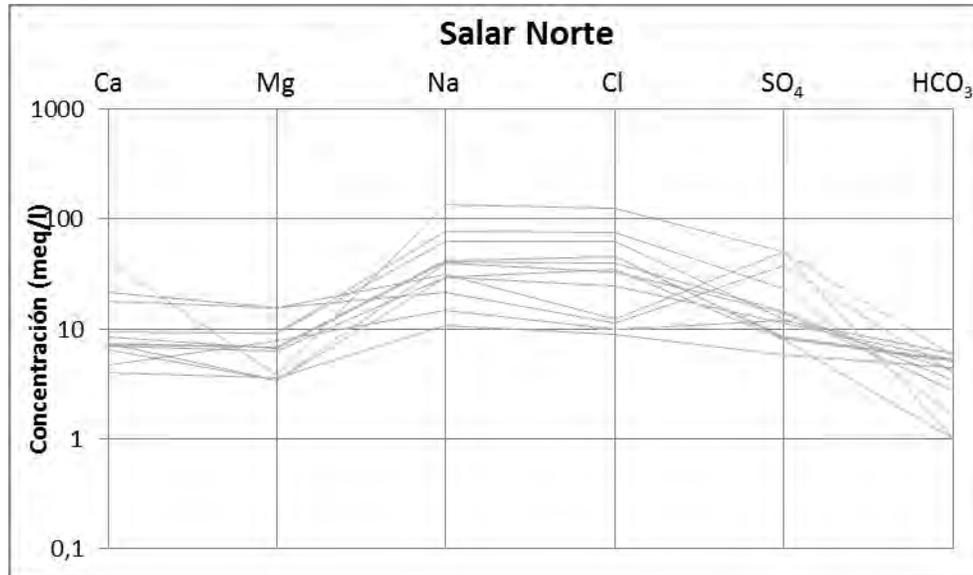


Figura 8-6 Diagrama de Schöeller con las muestras de la parte norte del Salar de Atacama

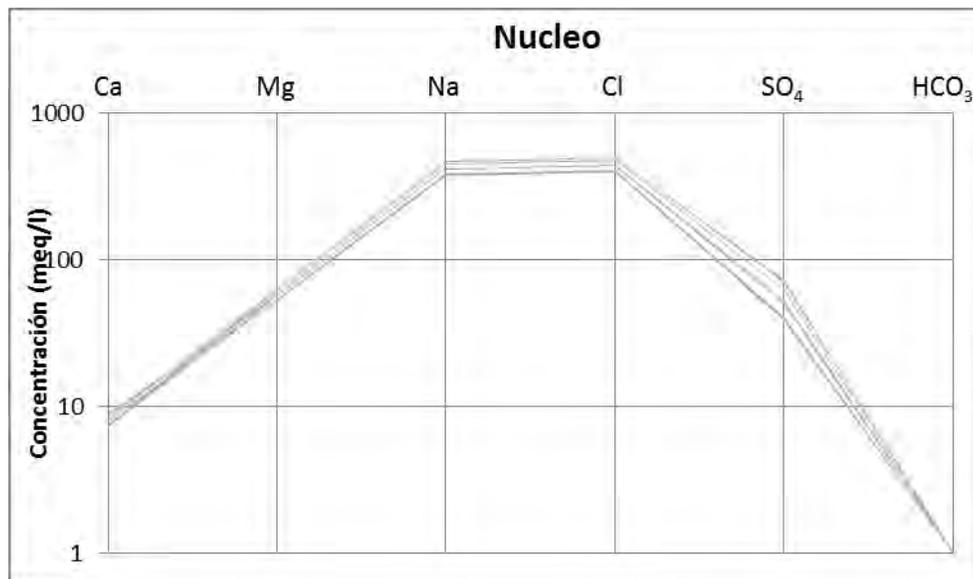


Figura 8-7 Diagrama de Schöeller con las muestras del núcleo del Salar de Atacama

Por el este del salar, las muestras de agua identificadas presentan un alto grado de variabilidad. Esta situación es natural, considerando que el área aportante para estas muestras tiene una extensión del orden de 100 km, donde se encuentran sectores con volcanes y otros sin (ver relación Li/Cl).

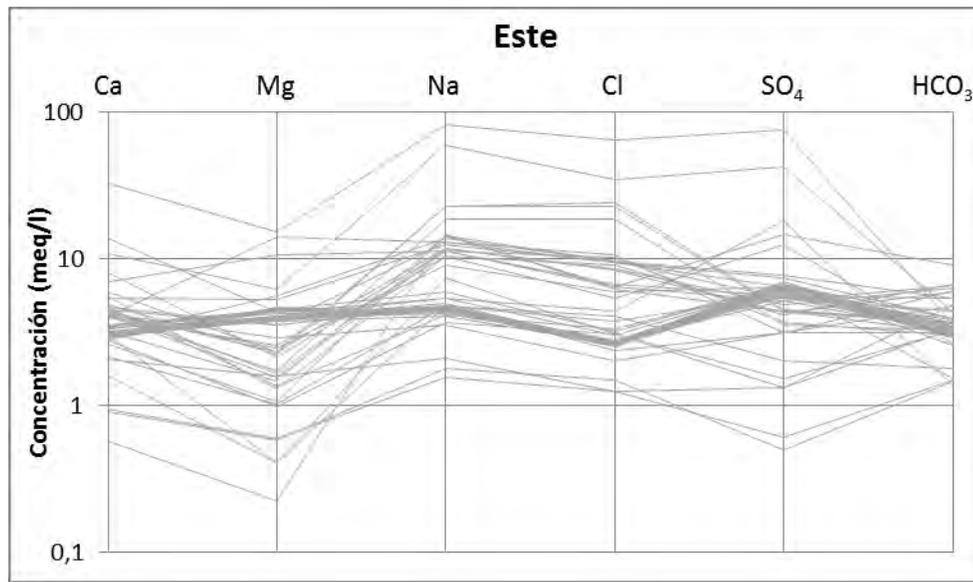


Figura 8-8 Diagrama de Schöeller con las muestras del borde este del Salar de Atacama

En el sector sureste las muestras de agua presentan dos composiciones diferentes. La primera de estas composiciones es muy similar a las muestras del núcleo y se asocia a aquellas ubicadas más hacia el norte. La segunda agrupa a las muestras de agua ubicadas más lejos del salar, y son muestras con una concentración mayor de cloruro y sodio, pero que en segundo lugar tienen una alta concentración de sulfato calcio y magnesio.

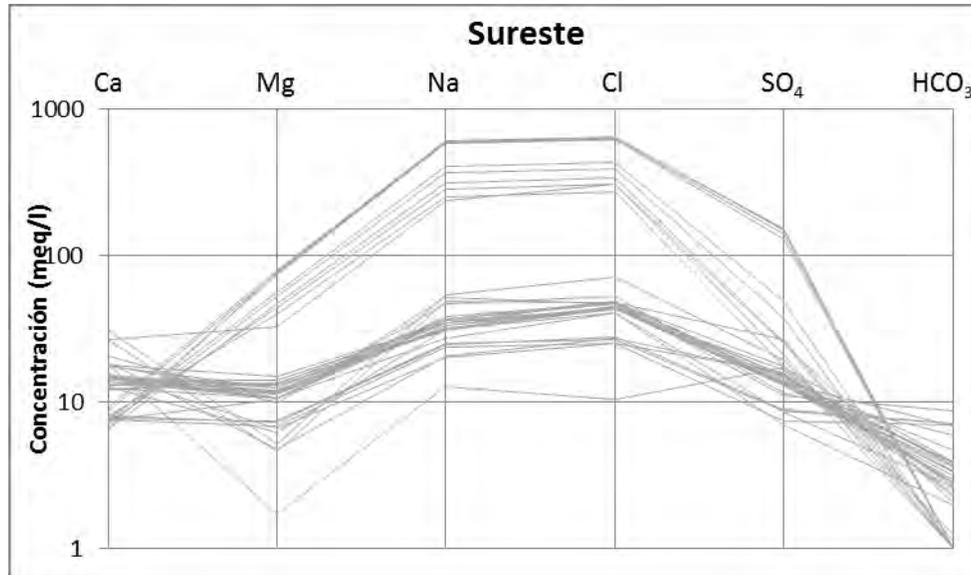


Figura 8-9 Diagrama de Schöeller con las muestras del sector sureste del Salar de Atacama.

8.4 Diagrama de Piper

Las muestras utilizadas en esta caracterización presentan un bajo grado de variabilidad y son principalmente cloruradas sódicas, que son el resultado de tener aguas altamente evaporadas. La excepción a esta situación son las muestras ubicadas en la parte este, que presentan una alta variabilidad en su composición.

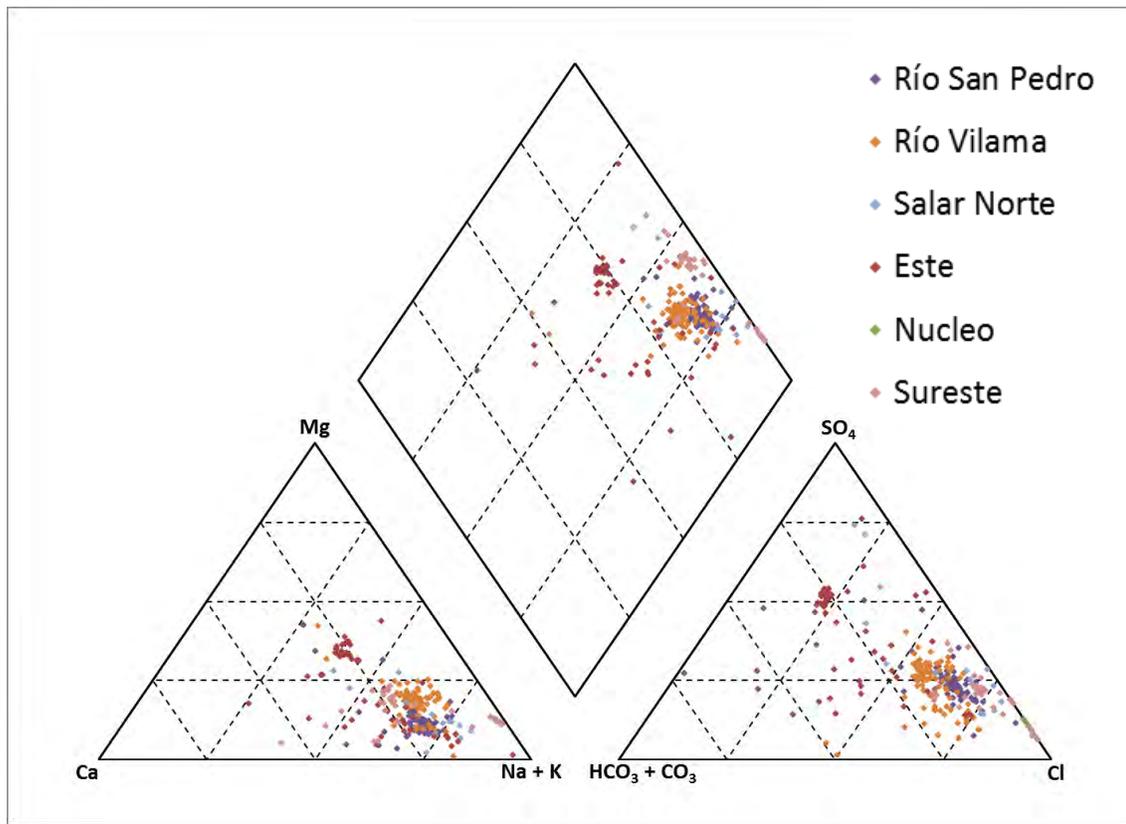


Figura 8-10 Diagrama de Piper con todas las muestras analizadas.

8.5 Identificación de zona de interfaz Cuña Salina

El estudio CHI-535 Investigación de Recursos Hidráulicos en el Norte Grande de CORFO 1977, realizó un mapeo de la cuña salina a escala regional. El mapa de la ubicación se presenta en la Figura 8-11, donde presenta la cuña como una zona definida por una línea punteada (margen exterior) y una línea continua (margen interior). Para una escala local, Salas et al., 2010 muestra la ubicación de la cuña en el sector del Sistema Soncor (Figura 7-11) y EIA de SCL presenta la ubicación para el sector de Peine y Tilopozo (Figura 7-17). Por último Fock 2009, provee información acerca de la posición de la cuña en el sector de Aguas de Quelana. A partir de los antecedentes anteriores se realizó un mapeo de la cuña que se presenta en la Figura 8-12.

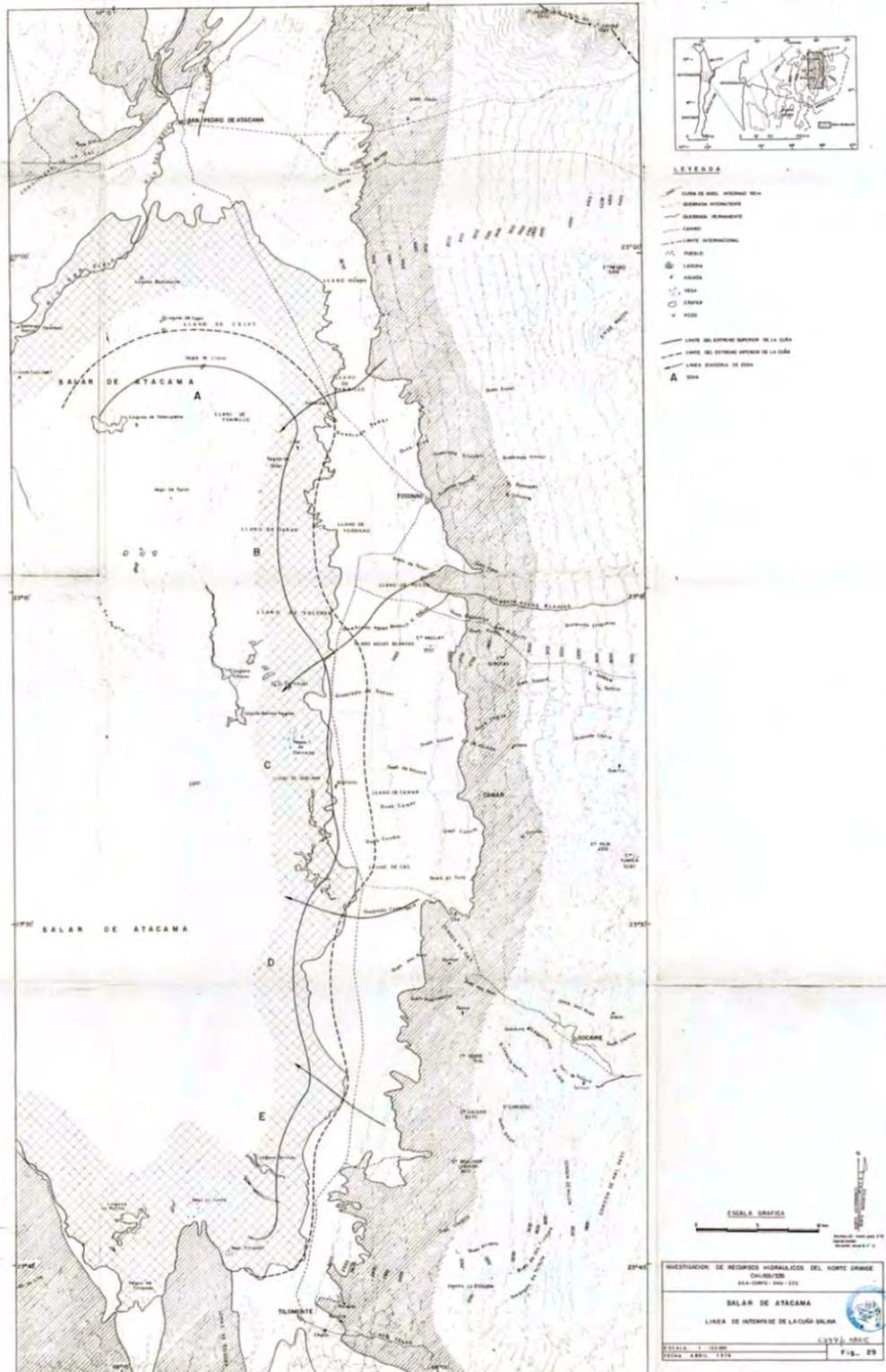


Figura 8-11 Cuña salina (CORFO, 1977).

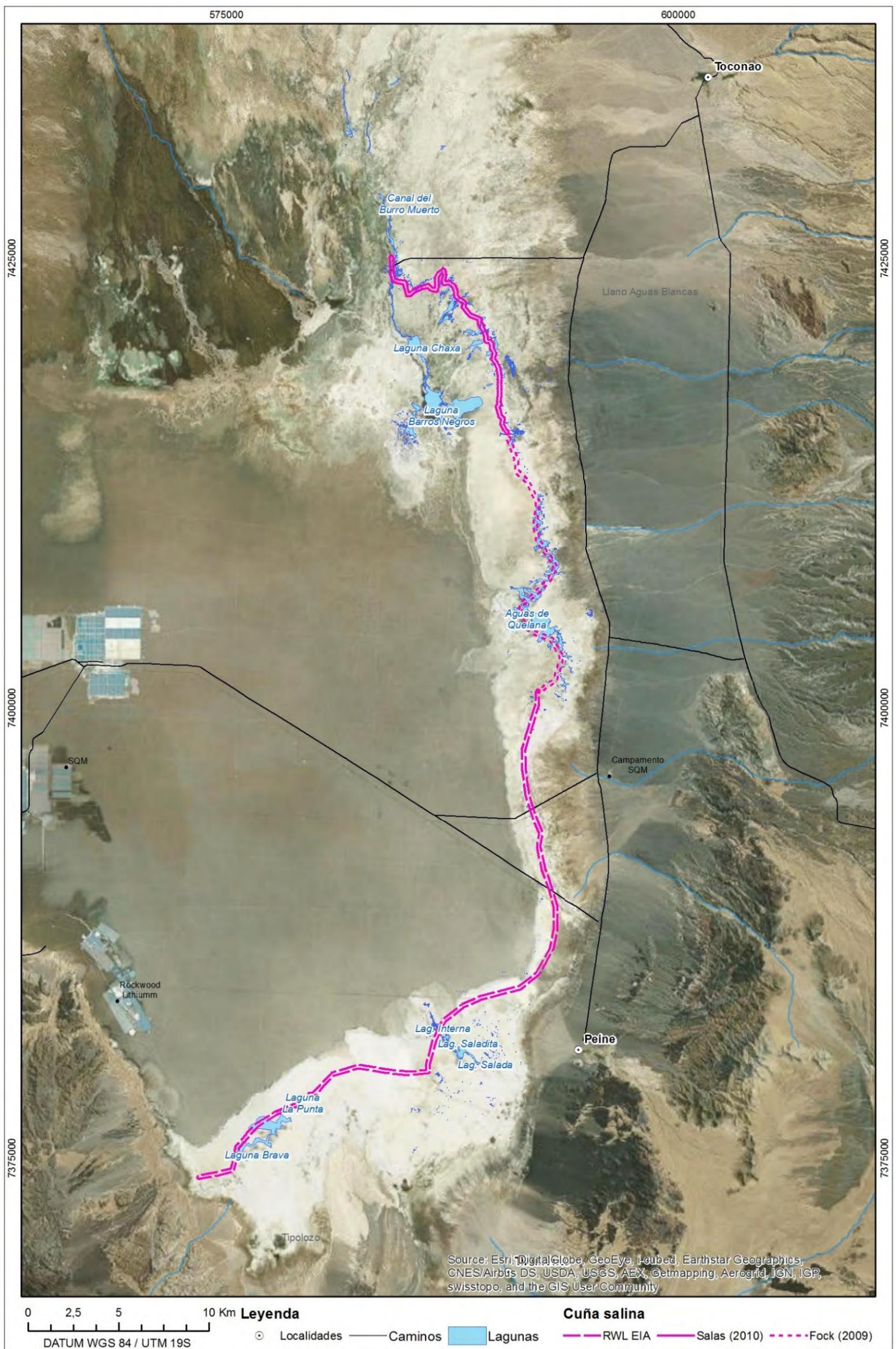


Figura 8-12 Cuña salina

9. Evaluación recursos hídricos

En este capítulo se analizan los factores determinantes para la evaluación de recursos hídricos en el Salar de Atacama. Se presentan los resultados de los principales estudios que contribuyen con información relevante de balance hídrico realizados entre los años 1986 al 2013 y/o estudios que realizan aportes en la estimación del recurso hídrico en Salar de Atacama. Se describen las componentes principales del balance hídrico y los enfoques considerados en cada trabajo.

El balance hídrico consiste en realizar un balance de masas entre las entradas y salidas del sistema hídrico. Para esto es necesario identificar las componentes de recarga y descarga. La identificación e interacción de estas componentes depende de las definiciones de área de estudio y el sistema, extensión y límites hidrológicos e hidrogeológicos y se explica a través de un modelo conceptual, las que son descritas en esta sección.

9.1 Análisis de recarga

En trabajos anteriores el análisis de la recarga del salar se ha realizado considerando distintos enfoques. Un criterio bastante utilizado en la zona de estudio es el de considerar que la única descarga del sistema corresponde a la evaporación que se produce desde Salar mismo, y al ser la cuenca del Salar de Atacama del tipo endorreico, se obtiene la recarga a partir del balance hídrico, conociendo la evaporación. Otra forma de estimarla ha sido mediante su cálculo directo.

En el Balance Hidrológico Nacional, II Región, elaborado en 1986, se propone que el balance hídrico del Salar de Atacama, debido a que es una cuenca endorreica puede dividirse en dos subcuencas: el salar mismo y la subcuenca aportante a éste. Para la zona del salar la evaporación será aproximadamente igual a la escorrentía más la precipitación sobre el mismo. Para la subcuenca drenante al salar la escorrentía total aportante al salar provendrá de esta subcuenca. El balance hídrico se realizó subdividiendo la cuenca en los siguientes sectores o subcuencas:

- Río San Pedro
- Río Vilama
- Quebrada Aguas Blancas

- Salar
- Resto de la cuenca

La precipitación se estimó en base al perfil pluviométrico promedio, de acuerdo a un análisis de variación de la precipitación con la elevación y el correspondiente trazado de isoyetas. La evapotranspiración desde zonas de cultivo se estimó en base a tasas de consumo estimadas a partir de antecedentes entregados en los estudios existentes y la evapotranspiración en zonas desprovistas de cultivos, lagunas y/o salares se utilizó la fórmula de Turc por bandas de altura. Determina que la escorrentía afluente al Salar de Atacama es de **3.570 (l/s)** y una precipitación sobre el mismo de **1.200 (l/s)**, lo que completa una recarga de **4.770 (l/s)**.

En el caso de Mardones (1986), realiza un estudio de las características hidrogeológicas del salar que incluye el cálculo de la recarga basado en datos de estudios anteriores y cálculo de la descarga con datos obtenidos a partir de la instalación de lisímetros.

La estimación de la recarga se realizó para el volumen de control definido por la superficie del Salar y su proyección subterránea, aplicando la Ley de Darcy en diferentes sectores del borde del Salar. Se utilizó como referencia el estudio desarrollado por el proyecto CHI 535, en el cual se dividen los sectores aportantes al acuífero del Salar en 5 zonas: A, B, C, D y E. Para cada una de ellas se determina su gradiente hidráulico (i), transmisividad $T = b \cdot K$, donde b es el espesor saturado y la longitud de cada zona L .

Junto con lo anterior se indican caudales superficiales de algunos cauces ubicados en el sector norte y oriental del Salar. Estos caudales infiltrarían antes de alcanzar el borde del Salar y se incluyen dentro de la recarga del acuífero libre. El caudal total de recarga al Salar de Atacama se calculó en **4.705 [l/s]**.

La minuta 60, que utiliza **los resultados del informe hidrogeológico: "Evaluación de la disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas, cuenca Salar de Atacama, II región"** (DGA/D. Orphanopoulos, 1997), **corresponde a un estudio de la disponibilidad de recursos hídricos para la estimación de nuevos derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al Salar de Atacama.** El estudio de la recarga se realizó considerando el recurso hídrico aportado por la precipitación mediante las isoyetas determinadas en el Balance Hídrico de Chile (1986), definiendo valores por franjas de altura. Se estimó la evapotranspiración desde superficies con vegetación natural

mediante la fórmula de Turc, y aquella asociada a superficies cultivadas mediante un factor de cultivo estimado a partir de distintas fuentes. La delimitación de las subcuencas utilizadas en este trabajo se muestra en la Figura 9-1.

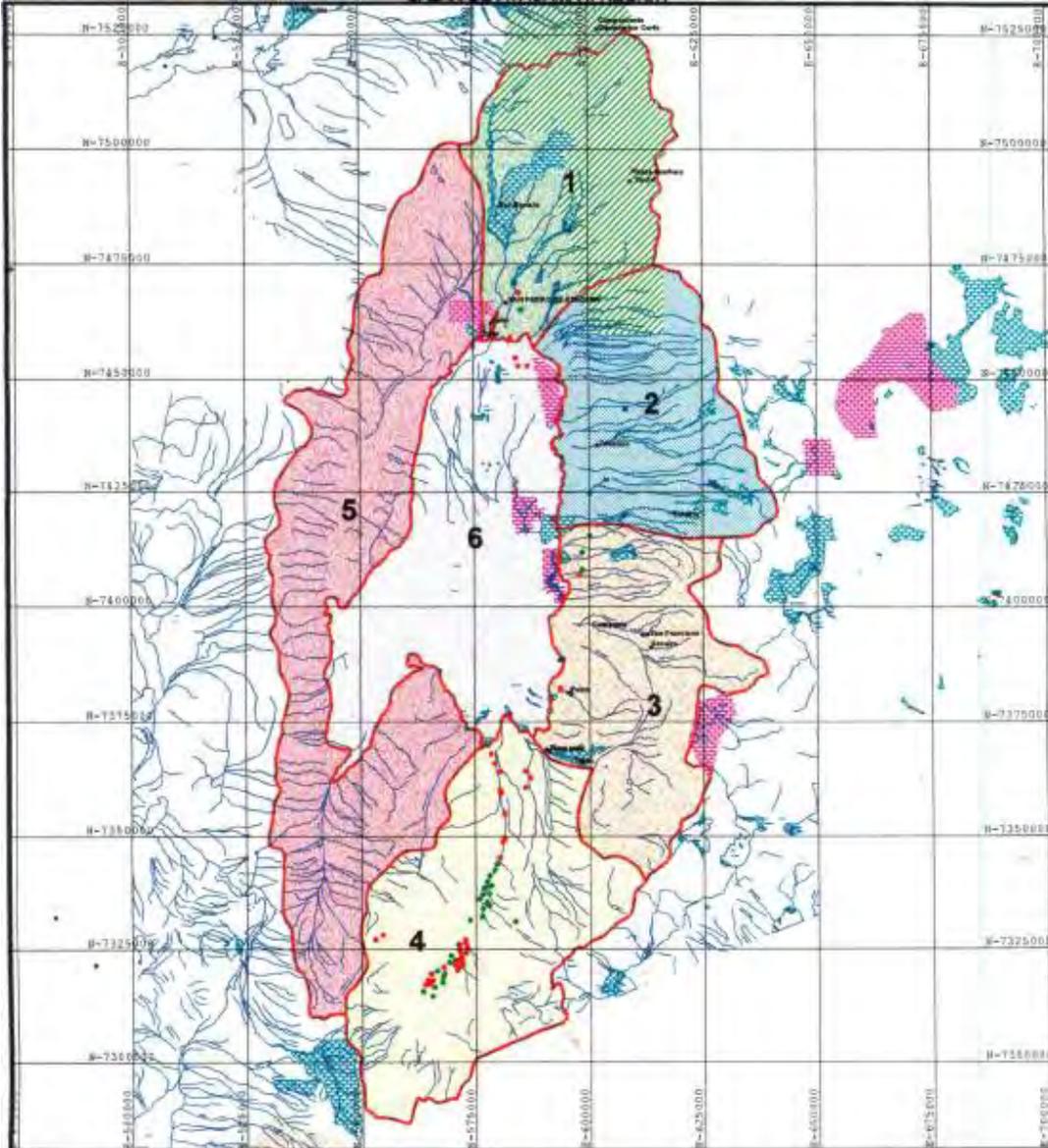


Figura 9-1: Delimitación de subcuencas Minuta 60, 1998.

La recarga por precipitación efectiva de cada subcuenca ocurre principalmente en las subcuencas ubicadas al norte, sur y borde oriental del Salar, sumando un total de 3.940 [l/s]. En el caso de la subcuenca del Salar de Atacama, toda la precipitación bruta que cae sobre ella (1.380 [l/s]) se pierde por evaporación.

La recarga por precipitación se divide en sus componentes de escurrimiento superficial y subterráneo. El escurrimiento superficial proviene del sector norte y borde oriental del Salar totalizando **760 [l/s]**, mientras que la recarga subterránea se cuantificó en **3.180 [l/s]**, lo que da una recarga total al Salar de **3.940 [l/s]**. Respecto a la evaporación desde el salar, se obtuvo como resultado de la evaluación del Balance Hídrico un valor de 5.320 l/s para el régimen natural equivalente al analizado en Mardones.

En la Evaluación de Impacto Ambiental "Cambio y Mejoras de la Operación Minera Salar de Atacama de SQM", DICTUC 2004 realiza el modelo numérico del acuífero del núcleo del salar. Este trabajo incluye el cálculo de la recarga y descarga de la cuenca y es sintetizado en el artículo Muñoz et al., 2004.

En su publicación Muñoz realiza una descripción del funcionamiento hidrogeológico del acuífero del núcleo del Salar de Atacama. La recarga del acuífero del Salar estaría conformada por dos flujos: el flujo lateral subterráneo proveniente de los acuíferos adyacentes ubicados al norte, sur y este del núcleo, y la precipitación que cae directamente sobre este.

A nivel de cuenca la principal recarga corresponde a la precipitación sobre la cordillera de los Andes, mientras que los escurrimientos superficiales se infiltran o son consumidos por los regadíos antes de alcanzar los depósitos salinos.

La recarga por flujo lateral subterráneo de cada una de las subcuencas se estimó a través del modelo de simulación hidrológica Seamod, el cual transforma estadísticas de precipitación mensual en escurrimientos subterráneos y superficiales. Para esto se consideran procesos de evaporación e infiltración de cada subcuenca, aplicando relaciones de balance de masa entre los diferentes componentes del sistema.

En la modelación del Salar de Atacama cada cuenca aportante se subdividió en dos subcuencas: una subcuenca superior que recibe la mayor parte de la precipitación y de suelos delgados, y otra subcuenca inferior de suelos más profundos que recibe los aportes desde la subcuenca superior y la entrega al acuífero del Salar. Se consideraron las series de precipitación mensual y evaporación potencial de cada cuenca, además su área y características del suelo como la capacidad de campo y la capacidad de infiltración. Como resultado de la aplicación del modelo se obtuvieron series temporales a nivel mensual de los escurrimientos producidos a la salida de cada una de las

subcuencas. Si se considera la recarga de las cuencas aportantes más la recarga directa por precipitaciones sobre el Salar se obtiene que la recarga total del Salar de Atacama es de **5.114 [l/s]**.

Más recientemente, DGA/GCF, 2010 propone un modelo conceptual donde la precipitación efectiva proveniente de las subcuencas escurre en forma superficial hacia el salar. En las subcuencas existe evapotranspiración de vegas y bofedales (los que son identificados a través de imágenes satelitales) y parte de la escorrentía superficial es utilizada para consumo de riego.

Considera como variables la precipitación efectiva, la evapotranspiración, la evaporación desde las lagunas de cada subcuenca, el aporte producto del retroceso de la línea de nieves y la recarga o escorrentía total efectiva. En este trabajo se determinó la recarga al Salar de Atacama a través de un balance hídrico a nivel mensual entre la recarga efectiva de la cuenca y las pérdidas por evaporación en el Salar. La escorrentía total o recarga efectiva de la cuenca se calculó como la diferencia entre la precipitación efectiva y la evaporación desde vegas, bofedales y superficies de agua libre de las subcuencas aportantes.

La delimitación de las subcuencas aportantes de este trabajo corresponde a la presentada en la Figura 6-5. La precipitación efectiva consiste en el caudal que efectivamente se infiltra o escurre superficialmente dada cierta condición fisiográfica de cada subcuenca. Esta condición fisiográfica está representada por un factor aplicado a la precipitación bruta, con el cual se calibró la ecuación de balance para igualar la recarga con la descarga por evaporación estimada en **5.600 [l/s]**.

Por último la escorrentía total efectiva corresponde a la recarga aportante de cada subcuenca tanto superficial como subterráneamente. Ésta se calculó restándole la evaporación a la precipitación efectiva.

Posteriormente, DGA 2013 corrige la determinación del balance hídrico desarrollado por DGA/GCF (2010).

Si bien se tomó como base la metodología desarrollada por DGA/GCF (2010), en el trabajo de la DGA se incluyeron algunas modificaciones. En primer lugar se modificó el área de la superficie del Salar, la cual se disminuyó en 158 [km²]. Esta área se distribuyó en las cuencas aportantes obteniendo una superficie total de la cuenca igual a la

estimada por DGA/GCF (2010). Esta variación influye en el cálculo de la precipitación bruta puesto que arrojará un valor mayor producto de la mayor superficie aportante.

Otra modificación al método anterior fue no considerar el aporte hídrico originado por variaciones en la línea de nieves con el objetivo de contar con una herramienta de análisis más simple. Esto se justifica haciendo mención a que no existe acumulación de nieve interanual, por lo tanto al estimar la recarga a nivel anual las variaciones mensuales no afectan al resultado final.

Luego se verificó la representatividad de las precipitaciones calculadas tanto en el reporte DGA/GCF (2010) como en el Balance Hídrico de Chile (1987) y el estudio DGA/DICTUC (2008). Se determinó que si bien la metodología de DGA/GCF (2010) entrega valores confiables, esta no representa adecuadamente la variación espacial de las lluvias, como sí es el caso del Balance Hídrico de Chile y el estudio DGA/DICTUC. Por este motivo se corrigieron las precipitaciones de DGA/GCF (2010) manteniendo sus promedios anuales e incluyendo parte de la variación espacial de las isoyetas generadas por el Balance Hídrico de Chile y el trabajo DGA/DICTUC (2008).

9.2 Análisis de la descarga

9.2.1 Evaporación desde el salar

Respecto a la estimación de la descarga del Salar de Atacama, casi la totalidad de los trabajos existentes están basados en las experiencias de Mardones, 1986, quien durante los años 1983 y 1984 instala lisímetros en cinco ubicaciones del salar de diferente nivel freático, tipo de suelo y costra superficial. A partir de los resultados crea un mapa de 16 zonas de evaporación que varía entre 2 mm/año (núcleo) a 5,8 mm/día en zonas marginales.

Tabla 9-1 Resultados estudio Mardones 1986

Zona	Descripción	Nivel freático medio (m)	Tasa evaporación (mm/día)	Área (km²)	Volumen evaporado (l/s)
A1	Costra de limo salino blando	0,50-0,55	0,4	20	92,05
A2	Costra de limo salino sobre costra dura de carbonato de calcio (CaCO ₃)	0,37	0,1	130	150,17
A3	Costra delgada sobre sal granulada	0,34	1,45	80,3	1348
A4	Yeso limoso blando	0,72	0,3	120	416,4
A5	Yeso limoso blando	1,11	0,1	200	231,3
A6	Costra de cloruro de sodio (NaCl)	1,00	4,4 mm/año	100	13,9
A7-1	Costra salino limosa de yeso y halita	0,31	1,0	45	520,80
A7-2	Costra salino limosa de yeso y halita	0,5	0,5	17	98,30
A8-1	limo salino sobre costra dura de carbonato de calcio (CaCO ₃)	0,47	0,1	26	30,06
A8-2	limo salino	0,27	1,45*	16	185,18
A9-1	limo salino	0,32	1,5	30	520,8
A9-2	limo salino	0,6	0,1	48	55,5
A10-1	limo salino sobre costra dura de carbonato de calcio (CaCO ₃)	0,25	1,0	8	92,5
A10-2	limo salino sobre costra dura de carbonato de calcio (CaCO ₃)	0,25	0,2	50	115,74
A11	Lagunas Verano (v): 11.8 Km ² Invierno (i): 13.4 Km ²	0	5,8 (v) 4,38 (i)	12,6	792
A12	Vegas	0,00	0,3	180	624,7
A13	Núcleo, costra dura de cloruro de sodio	0,67	2 mm/año	1620	102,7
	Total			2703	5390,22

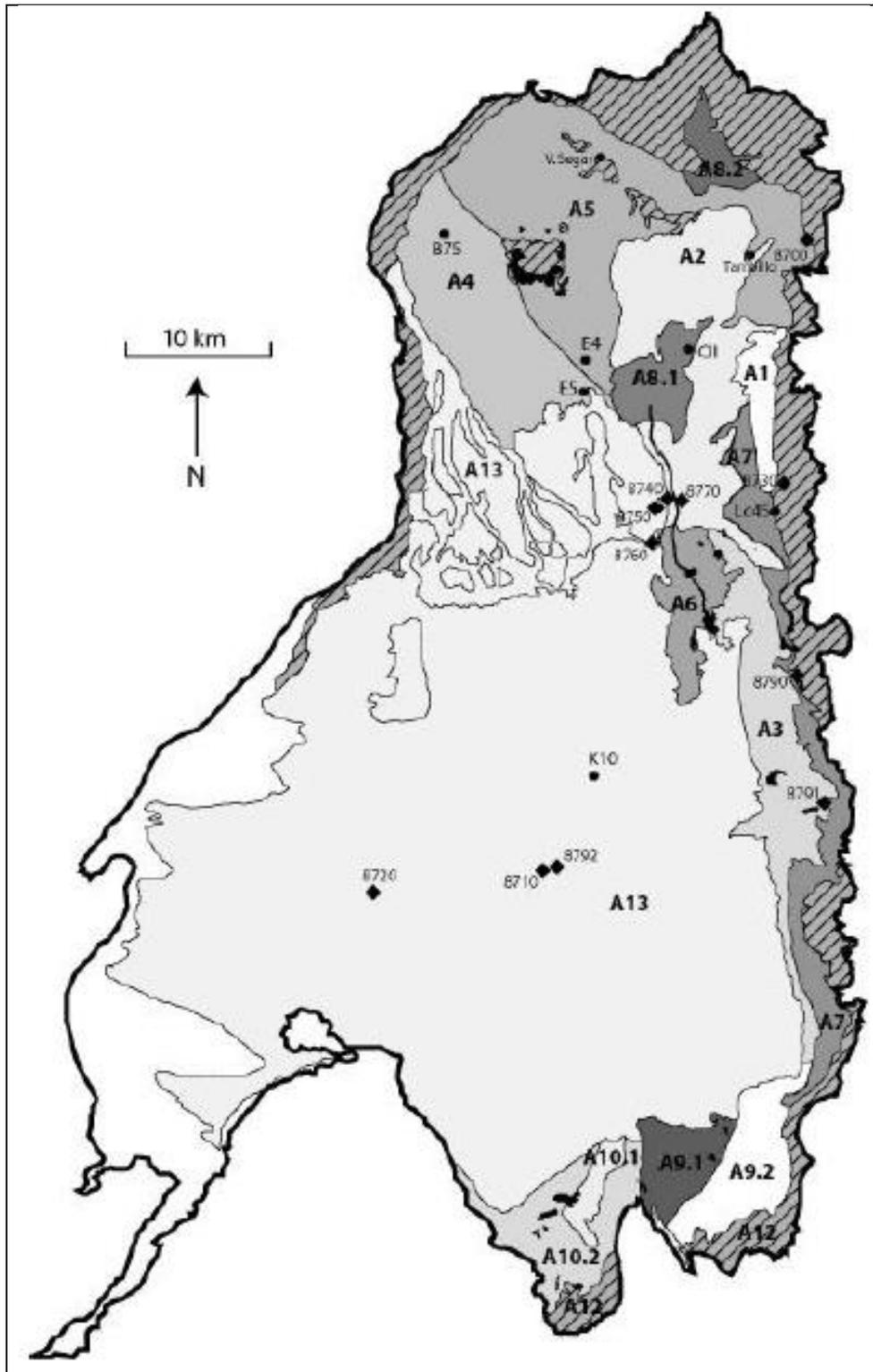


Figura 9-2 Ubicación lisímetros Mardones 1986 e Hydrotechnica 1988 en Kampf, 2002

Para el cálculo de la descarga proveniente de los cuerpos de agua superficial, Mardones (1986) estimo la evaporación desde la superficie de agua libre de las lagunas del Salar en base a mediciones de evaporación en estanques evaporímetros clase A, como;

$$E_0 = K_e \cdot K_s E_t \quad \mathbf{9-1}$$

Donde K_e es un coeficiente de estanque (adimensional), igual a 0,7 de acuerdo al estudio de Harza (1978). Este coeficiente fue estimado en Estados Unidos y fue adoptado debido a las semejanzas climatológicas con el Salar de Atacama. K_s es un coeficiente de reducción por salinidad (adimensional), que para una densidad de 1.045 kg/l (densidad promedio del agua en las lagunas) es igual a 0,95 (Ide, 1978) y E_t es la evaporación medida en el tanque evaporímetro clase A.

Finalmente estima un valor de la tasa de evaporación para las lagunas de 5,8 mm/día para verano y de 4,38 mm/día para el invierno.

Los resultados de Mardones fueron tomados en el Balance Hídrico Nacional II Región, en que se evalúa los factores dependientes de la evaporación. Plantea en base de mediciones y estudios anteriores que es posible modelar la evaporación en función de la profundidad utilizando las siguientes expresiones:

$$E = E(z) = E_0 \cdot e^{-a(z-z_0)} \quad E(z) \leq E_w \quad \mathbf{9-2}$$

$$E = E_w \quad E(z) \geq E_w \quad \mathbf{9-3}$$

E : Evaporación

z : Profundidad desde el suelo.

E_0 : Evaporación desde el suelo.

a : Parámetro que depende del tipo de suelo

En la Figura 9-3 se presenta la curva de evaporación v/s profundidad. Se distingue entre dos tipos de suelos: núcleo (costra de cloruros) y costras limosa y de sulfatos que son calculadas para el Salar de Atacama. Los valores corresponden a las mediciones realizadas por Mardones 1986, durante los años 1983 a 1984

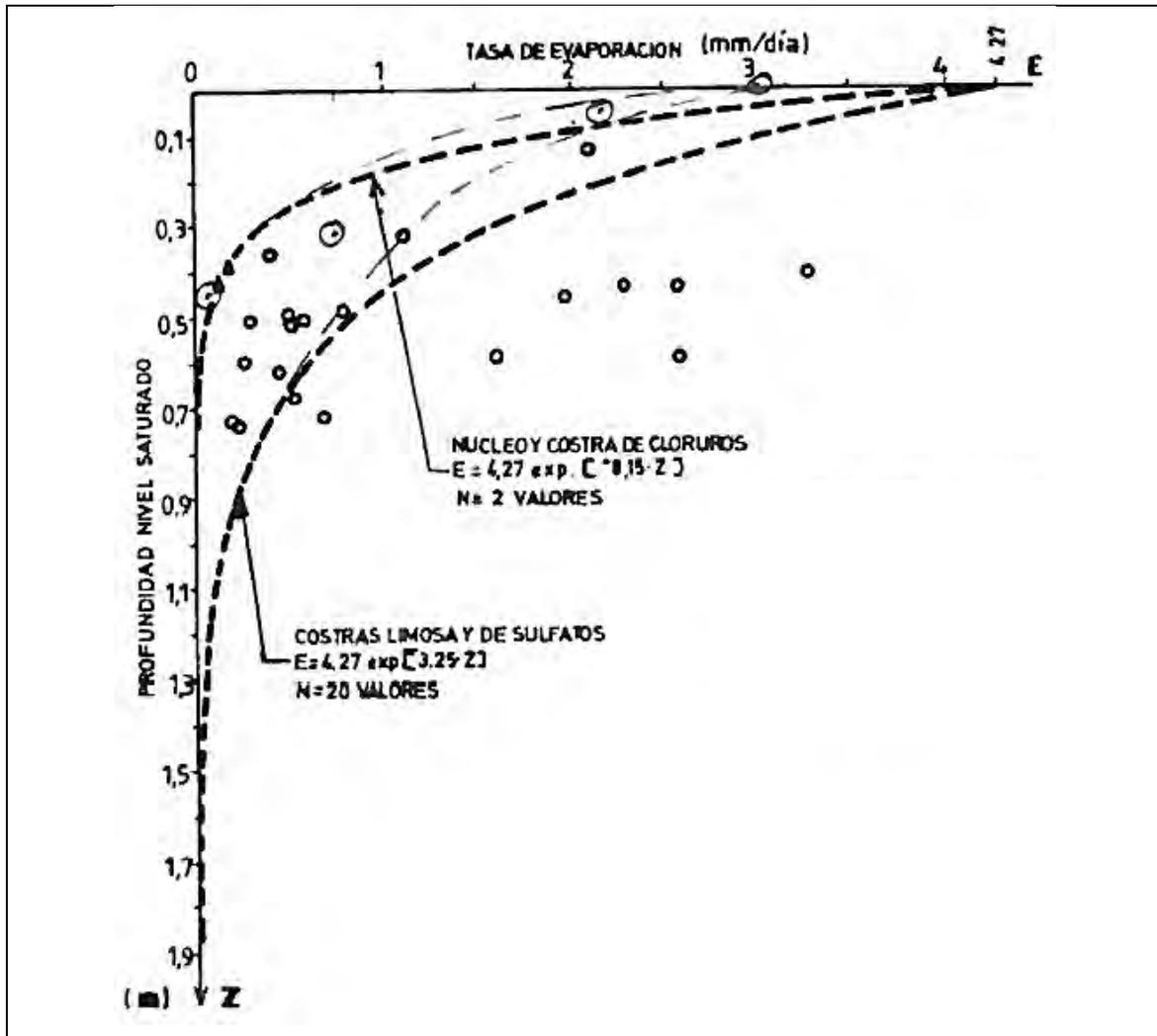


Figura 9-3 Curva evaporación v/s profundidad DGA, 1986.

Estos valores de evaporación desde el Salar son recogidos en la Minuta 60 de la DGA.

Una metodología que aporta nueva información es la propuesta por Kampf, 2002, en que para estimar la evaporación utiliza el método de correlaciones de Eddy, instalando los equipos en ocho lugares del salar durante Agosto del 2001 y Enero del 2002. Esta información es relacionada con imágenes satelitales ASTER, las que son utilizadas para obtener valores de albedo, emisividad y temperatura superficial del Salar. Con esto se define áreas de evaporación homogéneas y calcula el caudal evaporado del Salar de Atacama (Tabla 9-2, Tabla 9-3 y Tabla 9-4).

La Figura 9-4 muestra el resultado de la composición de imágenes de albedo, emisividad y temperatura superficial obtenida como resultado del estudio y que determinó además la distribución espacial de las diferentes superficies evaporativas.

Tabla 9-2 Resultados Kampf 2002

Tipo costra	Profundidad nivel freático (cm)		Evaporación promedio (mm/día)	
	8/01	1/02	8/01	1/02
1, Núcleo halita	91	79	-0,10	-0,10
2, Transición norte núcleo	82			0,02
3, Núcleo con detritos		76		-0,14
4, Vegas y zonas vegetación	4	7		2,76
5, Vegetación escasa	70	64	0,38	1,09
6, Costra yeso - halita	16	30	0,36	0,59
7, Costra carbonatos		31		1,11
8, Costras de yesos		0		0,12

Tabla 9-3 Comparación resultados Kampf 2002

Tipo de superficie	Evaporación promedio (mm d ⁻¹)			
	Kampf, 2002		Mardones, 1986	Hydrotechnica, 1988
	Agosto 2001	Enero 2002		
Lagunas			5,80	6,00
Vegas		2,76		
Vegetación escasa	0,38	1,09	0,30	
Limos			0,10-1,45	
Costra halita rugosa	-0,01	-0,10	0,005	
Yeso rugoso		0,12	0,005	
Costra halita no rugosa			0,01	0,05
Costra halita - yeso	0,36	0,59	0,75	
Costra carbonatos		1,11	1,45	0,60

Tabla 9-4 Evaporación salar de Atacama Kampf 2002

Evaporación Salar de Atacama	Estimación
27,1 (10,0)	1. Cálculo del flujos de energía por teledetección con parámetros constantes
26,1 (22,7)	2. Cálculo de flujos de energía por teledetección asignados a la clasificación de suelos.
2,9 (1,6-4,2)	3. Mejor estimación de las tasas de evaporación asignadas según tipo de suelo.
() Los números entre paréntesis corresponde a la asignación de una tasa de evaporación de 0 mm/día a la zona del núcleo del salar.	

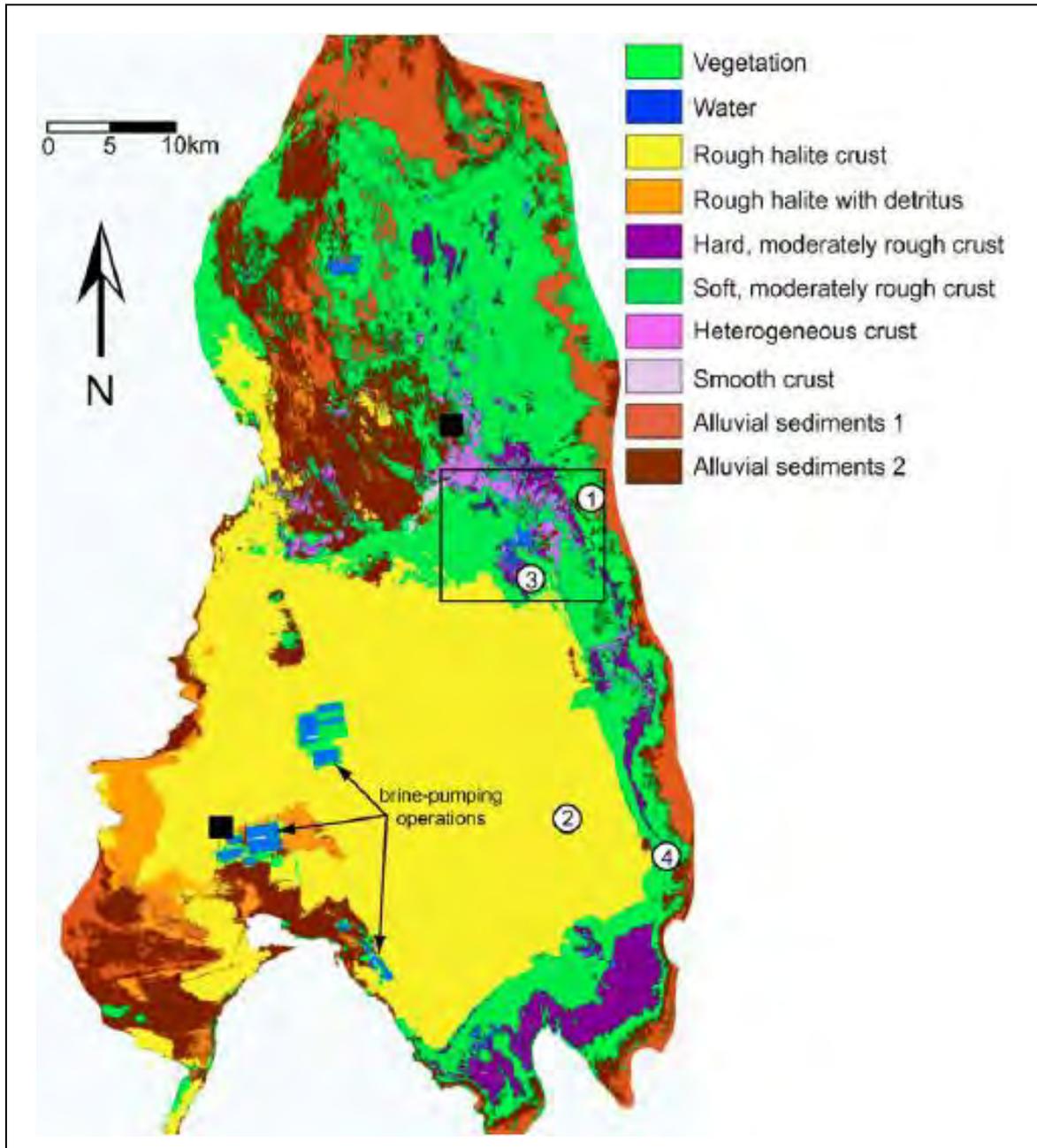


Figura 9-4 Zonación superficie Kampf, 2006

Por su parte, DICTUC, 2004 utiliza la información de los datos obtenidos en la campaña de medición por medio de lisímetros de Mardones 1986 para generar curvas de evaporación v/s profundidad utilizado el ajuste de Philip (1957). Las zonas son definidas a partir de la geología superficial del Salar de Atacama modificada de Mardones.

En la Figura 9-5, se presentan las curvas de evaporación/profundidad desde el agua subterránea en diferentes zonas del Salar, agrupadas por tipos de costras salinas (Mardones 1986) y ajuste de la expresión propuesta por Philip (1957).

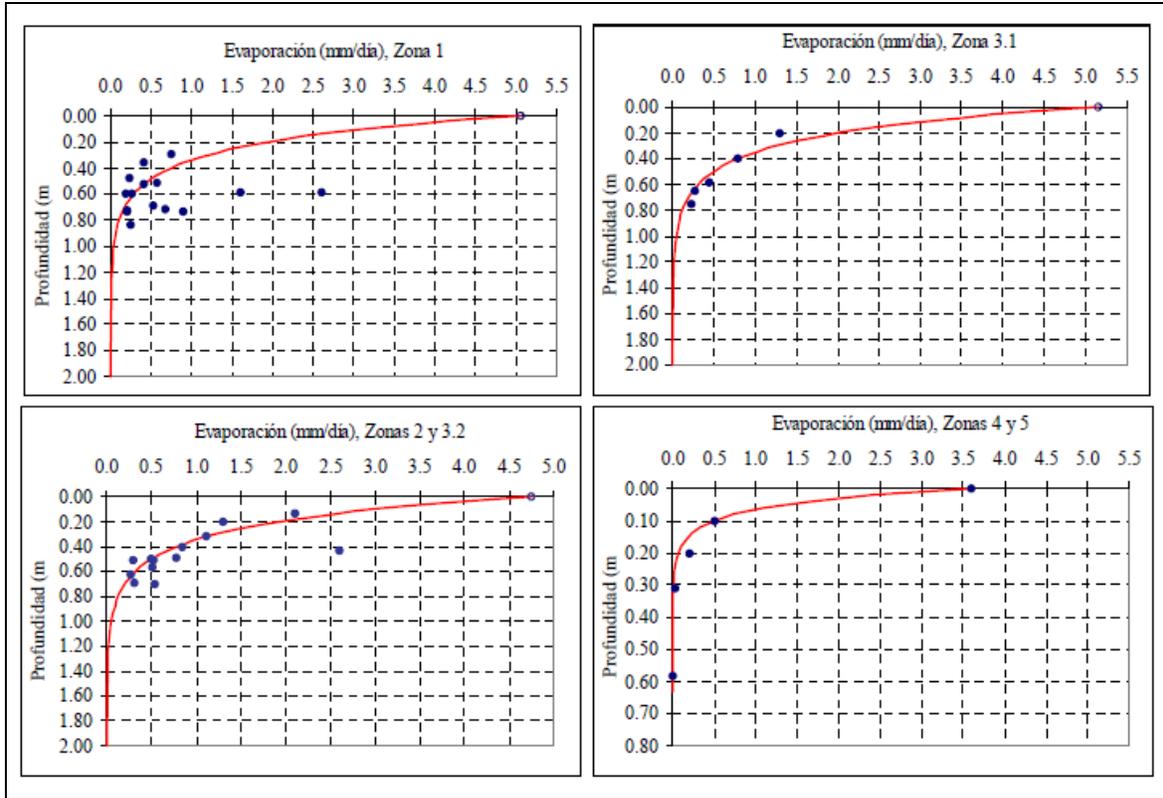


Figura 9-5 Curvas evaporación Muñoz et al., 2004

En la Figura 9-6 se presenta en el lado izquierdo las zonas definidas por Mardones 1986, presentados en el trabajo de Muñoz, 2004 y en el lado derecho de la figura se presentan las zonas definidas para el modelo numérico del EIA (DICTUC, 2004) que se basaron en los estudios de Mardones 1986 y Kampf 2002.

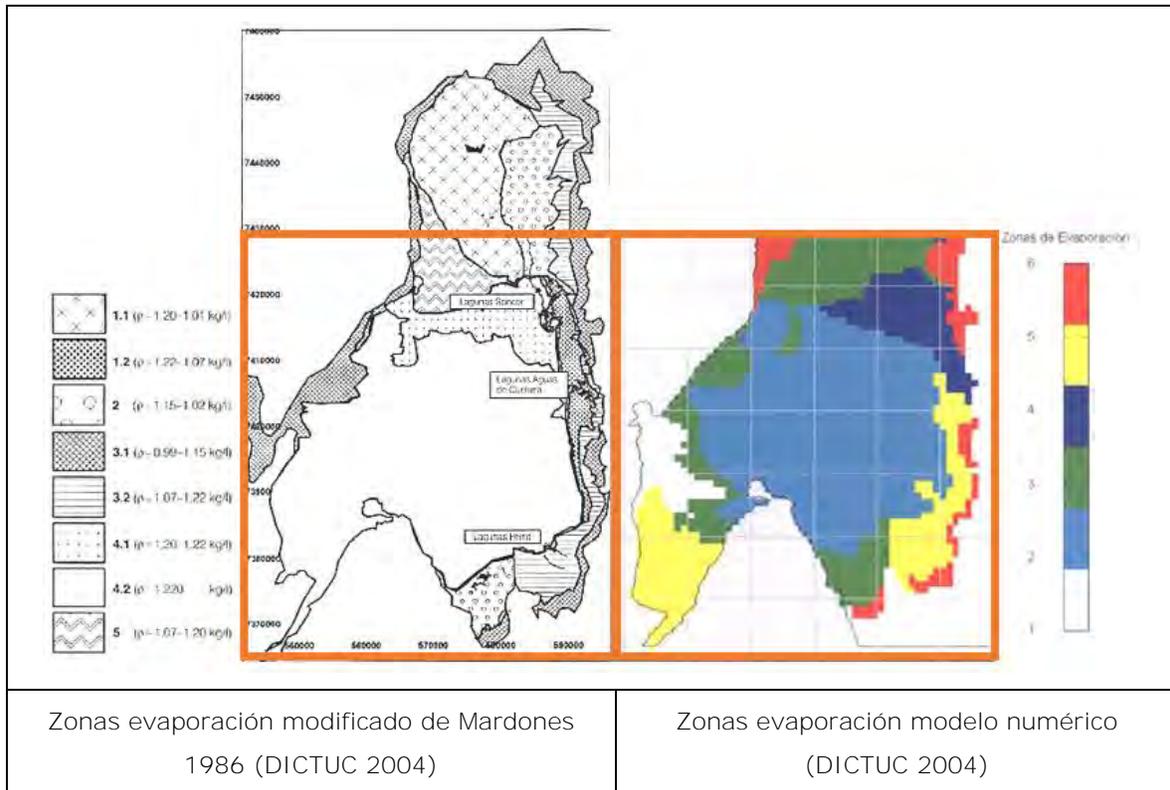


Figura 9-6 Zonas evaporación DICTUC 2004 (no están a la misma escala)

DGA/GCF 2010, realiza una corrección al estudio de Mardones 1986, a partir de la corrección de las áreas de vegas. Utilizando imágenes satelitales y aplicando el NDVI, modifica el área total de las vegas de 180 km² propuestos originalmente por Mardones 1986 a 261 km². El aumento de la superficie de las vegas es sustraída de las otras zonas. Utilizando las tasas de evaporación de Mardones 1986, calcula que la evaporación del salar es de 5844 l/s. Finalmente concluye que su cálculo podría estar sobreestimando la evaporación por lo que promedia el resultado obtenido con el resultado de Mardones 1986, estimando que el total de la evaporación de Salar de Atacama es de 5.600 l/s.

DGA 2013 incluye dos modificaciones con respecto al cálculo realizado por DGA/GCF 2010: una variación en la superficie de vegas y lagunas, y se consideró la precipitación sobre el Salar.

En el caso de las superficies, se utilizó un promedio entre la zonificación realizada por Mardones y la zonificación de Mardones actualizada por DGA/GCF. Esto significa una variación en la estimación de la evaporación; Mardones la estimó en 5.437 [l/s] y la actualización de DGA/GCF (2010) en 5.844 [l/s] obteniendo un promedio de 5.641 [l/s].

La precipitación se consideró restándola de la evaporación para así obtener la evaporación real producto de la recarga de las subcuencas aportantes. La precipitación sobre el Salar, excluyendo al núcleo, se estimó en 462 [l/s], con lo cual se obtuvo una evaporación de 5,17 [m³/s] producto de la recarga de las subcuencas aportantes.

9.2.2 Extracciones

Las extracciones consisten en una descarga artificial que involucra cauces superficiales y/o acuíferos, comúnmente por medio del desvío de un cierto caudal de aguas superficiales o extracción por medio de pozos de bombeo.

En la cuenca del Salar de Atacama, las extracciones por bombeo ocurren principalmente en cuatro ubicaciones. En la zona norte, donde se utiliza agua superficial para riego y pozos de captación menores para consumo doméstico u hotelero. En el margen oriental en los abanicos aluviales, donde se extrae agua para consumo y abastecimiento de agua potable para empresas mineras. En el acuífero Negrillar-Monturaqui ubicado al sur del Salar, y en el núcleo donde se extrae salmuera. En la Figura 9-7, se presentan los derechos otorgados (subterráneos y superficiales), según la recopilación de antecedentes presentada en el Anexo 2 del estudio DGA/GCF, 2010. Se incluye las extracciones del acuífero del núcleo del Salar, las que son presentadas en la Figura 9-8. Estas últimas corresponden a extracciones de tipo minero.

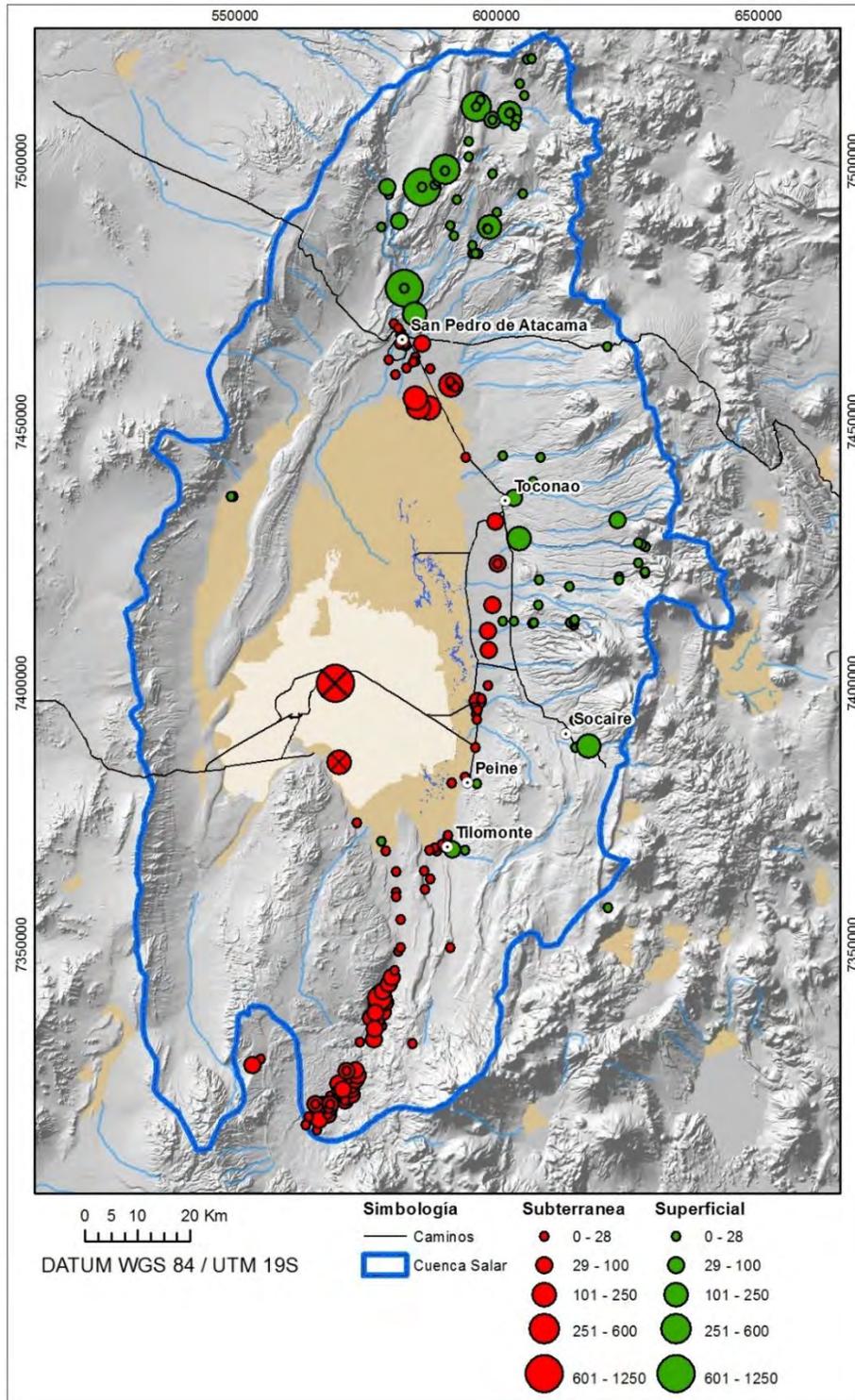


Figura 9-7 Derechos otorgados. Modificado de DGA/CGF, 2010. Las extracciones en el núcleo de RWL y SQM se señalan con una X y corresponden extracciones mineras.

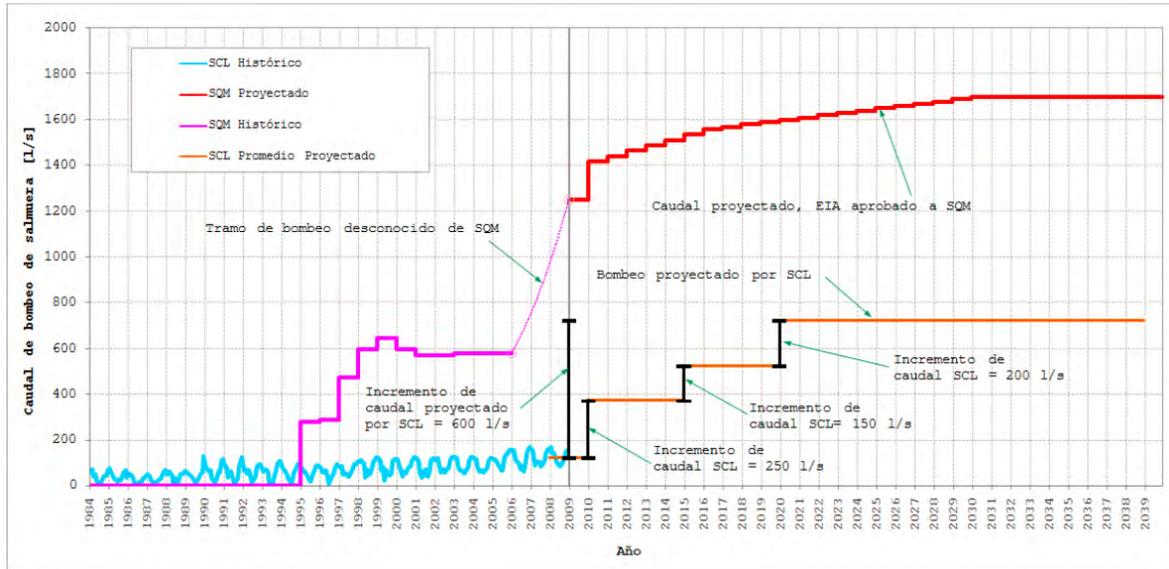


Figura 9-8 Extracciones de salmuera en el núcleo del Salar.

FUENTE: EIA SCL, 2009

9.3 Variación volumen embalsado

En el balance hídrico es importante conocer las variaciones del volumen embalsado, sobre todo cuando existe explotación de uno o más acuíferos en la zona de estudio.

Uno de los problemas de mayor complejidad es el de estimar las variaciones del volumen embalsado en el acuífero del núcleo. Este acuífero está afecto a bombeo y reinyección por parte de las empresas mineras, recarga subterránea y una recarga directa por precipitación. Se observa que el bombeo produce un descenso en los niveles freáticos, además se ha observado que para periodos de precipitación existe un aumento del nivel en los pozos. En el capítulo 7. Hidrogeología, se describe que el acuífero del núcleo se encuentra desconectado hidráulicamente del acuífero de los bordes de salar (DICTUC, 2004) y que existe una gran variabilidad en el coeficiente de almacenamiento del acuífero del núcleo. Por otro lado, el bombeo prolongado sobre el acuífero del núcleo produce un retroceso de la cuña salina hacia el centro del salar. Esto se ha identificado en el sector de Tilopozo, donde existen zonas de hundimiento producidas por la intrusión de agua dulce que disuelve los depósitos salinos.

Dada la heterogeneidad de los depósitos del salar, es muy difícil obtener una buena aproximación de la variación de volumen almacenado y no se tiene una evolución de la piezometría en el tiempo suficientemente densa como para observar el descenso a escala del núcleo.

9.4 Modelo conceptual

De acuerdo a los antecedentes presentados y los resultados del presente estudio se presenta el modelo conceptual de la Cuenca del Salar de Atacama, modificado de DICTUC, 2004.

La cuenca del Salar de Atacama es una cuenca cerrada donde en el depocentro de ésta se encuentran los depósitos salinos del Salar de Atacama. El Salar de Atacama recibe los aportes tanto subterráneamente como superficialmente de las subcuencas hidrogeológicas e hidrológicas respectivamente.

En las partes altas de la cuenca ocurren precipitaciones sólidas y líquidas las que en parte se infiltran alimentando los acuíferos que recargan lateralmente al salar y en forma menor contribuyen a pequeños cauces superficiales que llegan al Salar. Además existe precipitación directa sobre el salar que una parte de esta recarga el acuífero. Existe una descarga menor por medio de captaciones de agua mediante pozos y desvío de cauces superficiales en la zona aluvial previa a que esta llegue al salar.

El acuífero del núcleo del Salar de Atacama es de aguas salobres con una densidad mayor a la de los acuíferos que lo rodean provenientes de las partes altas de la cuenca. Lo anterior define una zona de interfaz donde debido a la diferencia de densidad de las aguas del núcleo con las provenientes de las cuencas aportantes. Las aguas no se mezclan, formando una cuña salina donde las aguas de las partes altas de la cuenca afloran formando lagunas superficiales y estableciendo el nivel freático cerca de la superficie. Además existe una zona de baja permeabilidad en el área de las lagunas, por lo que se postula que el acuífero aluvial se encuentra desconectado hidráulicamente del acuífero del núcleo. Debido a que el agua se encuentra somera, este sector contribuye con la mayoría de la descarga por evaporación del sistema.

El sector de afloramientos de agua subterránea en la interfaz de la cuña salina actúa como una barrera reguladora de los aportes al acuífero del núcleo. En años húmedos los

niveles ascienden someros y el área de las lagunas aumenta, por lo tanto existe una mayor descarga por evaporación. Por otro lado, en años secos, una baja en el nivel freático del área y menor superficie lacustre implica una menor pérdida por evaporación.

Debido a lo anterior, una pequeña parte del flujo ingresa al acuífero del núcleo del Salar, donde se ha registrado escasa evaporación desde el agua subterránea. Por otro lado, compañías mineras extraen la salmuera por medio de pozos de bombeo que serían responsables del decaimiento de los niveles del acuífero del núcleo.

Del escurrimiento subterráneo, la mayor parte puede considerarse como un aporte efectivo en el borde del Salar, debido a que ese traspaso podría ocurrir en los conos aluviales los ríos, justo al borde del Salar y antes que se genere una descarga a través de las capas superiores del suelo o de zonas vadosas y lagunas.

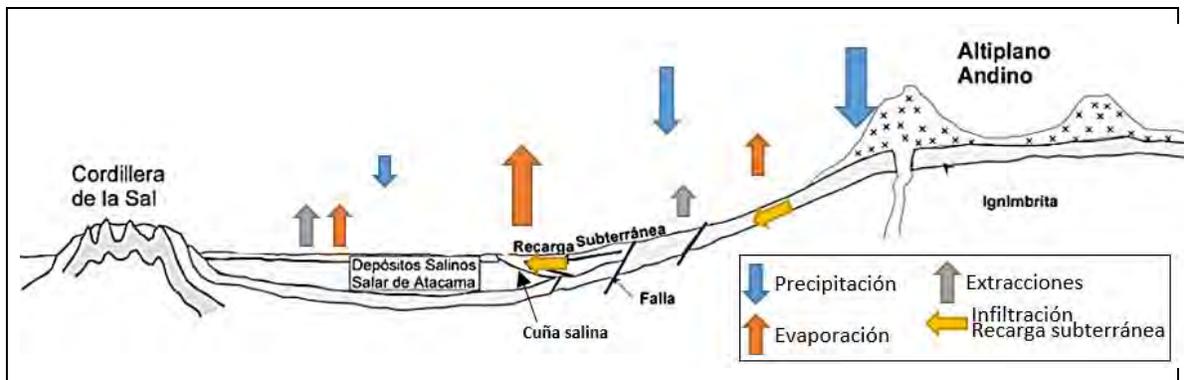


Figura 9-9: Modelo conceptual (modificado de DICTUC, 2004)

El balance hídrico está dado por los valores calculados en estudios anteriores, que proporcionan un rango de referencia:

Tabla 9-5 Balance hídrico estudios Salar de Atacama

Estudio	Recarga (m³/s)	Descarga (evaporación) (m³/s)	Método estimación descarga
Mardones 1986	4,7	5,44	Determina por medio de lisímetros la tasa de evaporación a distintas zonas del salar las que fueron definidas a partir del tipo de costra superficial y profundidad de la napa.
DGA 1986	4,7	^{1.} 4,7 ^{2.} 5,0	^{1.} Igual a la recarga ^{2.} A partir de curvas profundidad/evaporación basada en las mediciones de Mardones 1986.
Hydrotechnica 1988 (en Kampf, 2002)	-	-	Instala lisímetros, evaporímetros de bandeja, instrumentos para cálculo de la razón de Bowen. No se cuenta con resultados descarga del salar.
Kampf, 2002	-	^{1.} 27,1 (10,0) ^{2.} 26,1 (22,7) ^{3.} 2,9 (1,6-4,2)	Determina por medio del método de correlaciones de Eddy tasas de evaporación, las que son asignadas a distintas zonas que fueron definidas a partir de imágenes ASTER. 1. Cálculo del flujos de energía por teledetección con parámetros constantes 2. Cálculo de flujos de energía por teledetección asignados a la clasificación de suelos. 3. Mejor estimación de las tasas de evaporación asignadas según tipo de suelo. () Los números entre paréntesis corresponde a la asignación de una tasa de evaporación de 0 mm/día a la zona del núcleo del salar.
EIA SQM, (DICTUC, 2004)	^{1.} 4,77 ^{2.} 4,992 ^{3.} 5,114	^{4.} 4,67 + ^{5.} 0,1	Se basa en resultados de Mardones 1986, donde corrige la zonación de Mardones 1986 con la definida por Kampf 2002. Además incluye la curva Philip 1957 según la piezometría de la fecha. ^{4.} Tasa promedio descarga por evaporación zona marginal del salar ^{5.} Tasa promedio descarga evaporación núcleo del salar
DGA/GCF 2010	Igual a la descarga	^{1.} 5,6 ^{2.} 5,84	^{1.} Basado en Mardones 1986, corrige áreas de zonación a partir de imagen satelital. ^{2.} Inicialmente estima una descarga de 5,84, pero promedia este valor con 5,44 de Mardones 1986.
DGA 2013	Igual a la descarga	^{1.} 5,6 ^{2.} 5,17	^{1.} Basado en el cálculo de DGA/GCF 2010, que se basa en Mardones 1986. ^{2.} Valor de la recarga lateral al salar estimada a partir de la sustracción de la precipitación directa sobre el salar.

10. Mecanismos de evaporación desde el salar

Este acápite se centra en la descripción de los mecanismos de la evaporación que se produce desde el Salar de Atacama. La descripción se separa en descarga por evaporación desde el agua subterránea, descarga por evaporación desde cuerpos superficiales (lagunas), evapotranspiración y descargas por medio de extracciones (bombeo). A su vez se describen los criterios y diseños utilizados para la posterior realización de los trabajos de terreno.

10.1 Evaporación desde el agua subterránea

El proceso de evaporación en suelos bajo condiciones secas con una profundidad del nivel freático cercano a la superficie es un fenómeno complejo debido a que el transporte de calor, de agua líquida, de vapor y de soluto ocurre simultáneamente (Hernández 2012). La evaporación (Gran et al, 2011a), depende de varios factores entre los que se destacan:

- Profundidad del agua subterránea
- Características hidrodinámicas del perfil de suelo no saturado (curva de succión y curva de conductividad hidráulica no saturada)
- Distribución de la temperatura en el perfil de suelo no saturado
- Condiciones atmosféricas en la superficie
- Condiciones de salinidad del agua y del suelo.

Dado lo anterior, una estimación confiable de la descarga por evaporación desde una napa requiere tener un buen entendimiento y comprensión de los procesos que participan en el flujo de agua, de vapor y de calor desde la napa subterránea hacia la atmósfera, dada la variabilidad espacial que presentan los suelos y las diferentes profundidades que tiene la napa subterránea

La Figura 10-1, muestra dos curvas de evaporación v/s profundidad para dos tipos de minerales evaporíticos (halita y yeso), del estudio DGA 1986. Es posible observar que la evaporación en la halita disminuye a una menor profundidad que para el yeso. La profundidad donde la evaporación es nula para la halita y el yeso es 0,7 m y 2 m

aproximadamente, dando cuenta de la relevancia que toma la composición del suelo las propiedades físicas de este para cuantificar la evaporación.

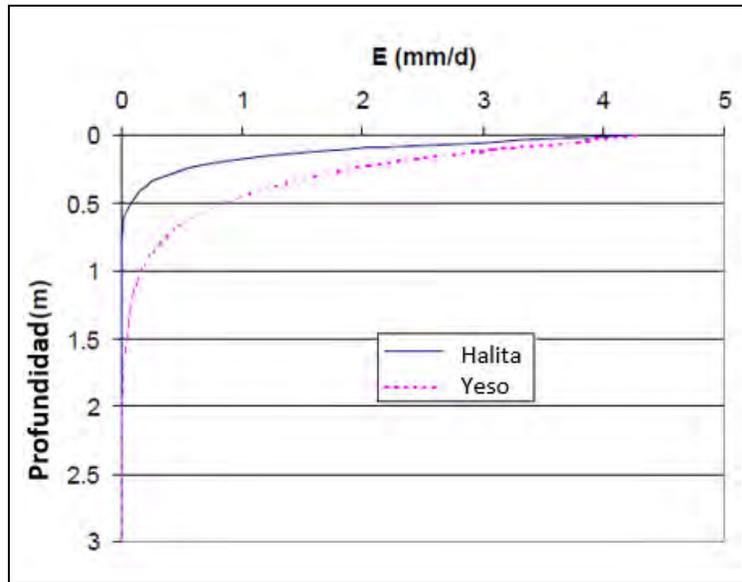


Figura 10-1 Evaporación v/s profundidad. Modificado de Kampf, 2002

La determinación de la evaporación desde el agua subterránea en una cuenca de clima árido o hiperárido requiere entonces conocer la distribución espacial tanto de las características del perfil de suelo no saturado que separa la superficie del suelo de la napa así como también las diferentes profundidades a la que se encuentra la napa en la cuenca.

Es por esto que se busca asignar curvas evaporación v/s profundidad a distintas zonas o áreas del salar. Es importante mencionar que el criterio de selección de áreas influirá determinantemente en la tasa de evaporación estimada. Por ejemplo, DGA/GCF (2010), a partir de imágenes satelitales aumenta el área de las vegas (disminuye las otras). Utilizando las mismas tasas de evaporación de Mardones 1986, estima un aumento en la descarga de evaporación de 5,44 mm/día (Mardones 1986) a 5,84 mm/día, lo que corresponde a un aumento de un 7%. Por otro lado Kampf 2002, utilizando las mismas tasas de evaporación de Mardones 1986, pero corrigiendo la zonación a partir de una imagen satelital ASTER, y reduciendo el área del salar para que abarque la misma superficie de la imagen, estima una evaporación 11% mayor a la de Mardones 1986.

Lo anterior ejemplifica lo relevante de una buena elección de las zonas de evaporación. Es por esto que como parte de este proyecto se instalaron 10 lisímetros en zonas representativas con el fin de obtener la curva profundidad v/s evaporación. Esta curva se relacionará con la profundidad del nivel freático medido en el lugar de instalación del lisímetro para estimar la evaporación.

Para la definición de estas zonas de evaporación, se utiliza la información proveniente del capítulo 5. Geología, donde se describe la geología y se caracterizan los depósitos superficiales del salar de Atacama (Figura 5-1). Además se incorporan las observaciones y resultados de Mardones, 1986, Kampf, 2002 y DICTUC, 2004. Estos criterios deben considerarse una vez que se obtengan mediciones de los lisímetros instalados en este estudio con el fin de determinar las zonas de evaporación.

La profundidad del nivel freático se obtiene al restar la cota del nivel de la napa, presentada en los PSAH de SQM, MEL, RWL con la cota de la superficie de terreno. Es posible extrapolar lo anterior para obtener una superficie que abarque el área de estudio y a partir de esto calcular la descarga por evaporación de las aguas subterráneas del Salar de Atacama.

Adicionalmente se ha realizado una recopilación de antecedentes con respecto a los instrumentos disponibles para la estimación de la evaporación desde el agua subterránea. Estos instrumentos son presentados en Anexo 5.

10.2 Evaporación cuerpos superficiales

La estimación de la evaporación proveniente de los cuerpos de agua superficiales es importante para el cálculo de la descarga, esto principalmente debido a que la tasa evaporación de cuerpos superficiales podría ser de órdenes de magnitud mayor a la tasa de evaporación desde el agua subterránea.

La evaporación potencial es posible obtenerla a partir de la evaporación medida en evaporímetro de bandeja a partir de la Ecuación . Donde E_a corresponde a la evaporación registrada en el evaporímetro de bandeja Clase A, K un factor de corrección y E_0 corresponde a la evaporación potencial (FAO 1998)

$$E_0 = K E_a$$

10-1

El valor del coeficiente K es posible estimarlo a partir de las características meteorológicas de la zona de estudio. FAO 1998 provee tablas y ecuaciones con las cuales es posible estimar este factor.

La estimación de la evaporación a partir de los cuerpos superficiales del Salar de Atacama debe considerar al menos dos variables principales: el área del cuerpo superficial y la tasa de evaporación. Ambas presentan variaciones estacionales y además la tasa de evaporación depende de la densidad de las lagunas.

El trabajo de Mardones 1986 estima la evaporación a partir de la fórmula

$$E_o = K_e \cdot K_s \cdot E_t \quad \mathbf{10-2}$$

Donde K_e es un coeficiente de estanque (adimensional), igual a 0,7 de acuerdo al estudio de Harza (1978). Este coeficiente fue estimado en Estados Unidos y fue adoptado debido a las semejanzas en el clima con el Salar de Atacama. K_s es un coeficiente de reducción por salinidad (adimensional), que para una densidad de 1.045 kg l (densidad promedio del agua en las lagunas) es igual a 0,95 (Ide, 1978) y E_t es la evaporación medida en el tanque evaporímetro clase A (L/T). Mardones 1986, estima un valor de evaporación para salmueras de 5,8 mm/día para verano y de 4,38 mm/día para el invierno.

La tasa de evaporación proveniente de las lagunas es posible obtenerla a partir de la evaporación potencial medida en evaporímetros de bandeja Clase A, provenientes de las estaciones Salar, Chaxa, SCL, cuyas series de tiempo son presentadas en los PSAH de SQM y RWL.

En la Figura 10-2, se presenta la evaporación promedio mensual para la estación SCL del PSAH de RWL para los años 2002-2012. El promedio anual corresponde a una tasa de 9,3 mm/día, si se aplica el factor de corrección utilizado por Mardones 1986, se obtiene una tasa de 6,2 mm/día. Se cuenta además con las mediciones de evaporación en la estación Toconao experimental (1976-2009), que arrojan un promedio anual de 9,51 mm/día y aplicando los mismos factores de corrección se obtiene una evaporación de 6,3 mm/día.

En la Figura 10-3, se muestra los resultados del trabajo de Ide 1978, donde registra la tasa de evaporación desde agua con diferentes densidades. Es importante notar, dado que la densidad del agua de las lagunas es distintas entre sí y presentan una variación

estacional en la densidad que debiese existir una corrección según la densidad con el objetivo de mejorar la estimación. Es posible estimar la densidad estableciendo una relación con los sólidos disueltos (DICTUC, 2004).

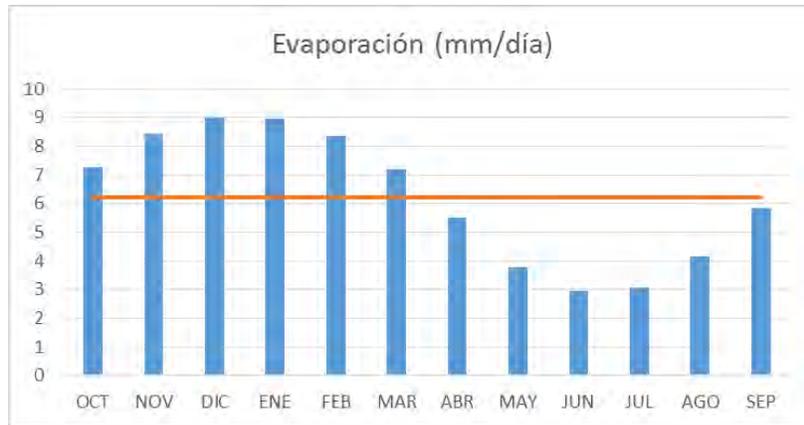


Figura 10-2 Evaporación estación SCL (2002-2012)

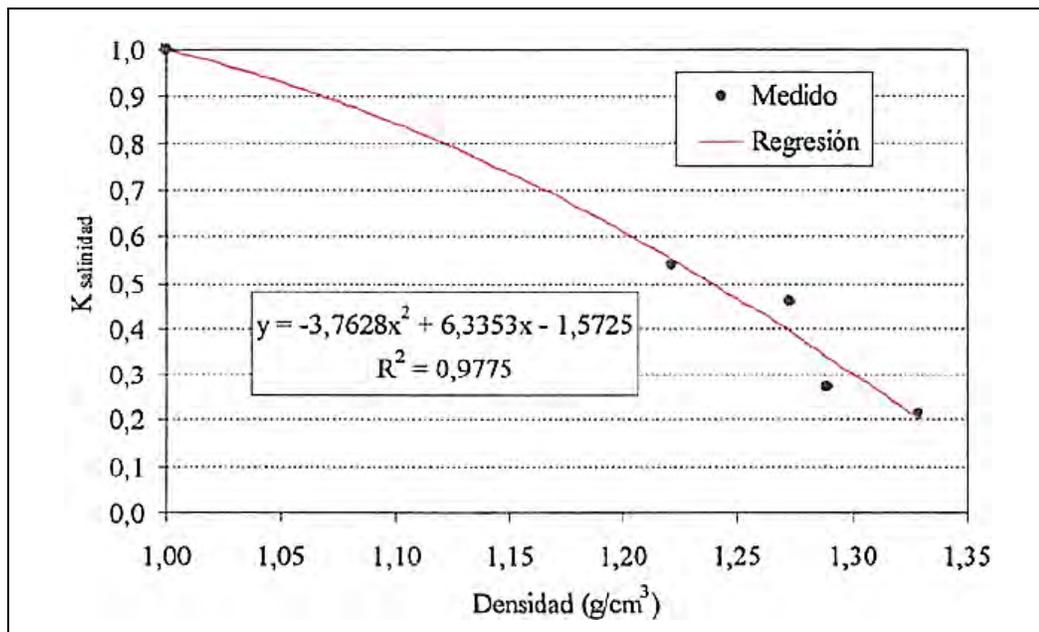


Figura 10-3 Ide, 1978 en DICTUC, 2004

Por último destacar que actualmente el PSAH de SQM y PAT de MEL monitorean las superficies lacustres en forma semestral, por lo que es posible utilizar esa información. En la Figura 7-21, se presenta un gráfico donde se observan las variaciones del tamaño de las lagunas conforme al monitoreo realizado por MEL, como parte del PSAH.

10.3 Evapotranspiración vegas, bofedales y áreas cultivadas

La evapotranspiración es posible estimarla a partir de medidas directas (lisímetro, correlaciones de Eddy, domo, entre otros) como a partir de estimaciones utilizando variables meteorológicas y del tipo de vegetación presente. Otra alternativa es la evaporación medida en un evaporímetro de bandeja por coeficientes de cultivo que dependen del tipo de vegetación y del ciclo de la planta.

En el Salar de Atacama, el cálculo de las superficies de vegas, bofedales y áreas de cultivo fue realizada en el estudio de DGA/GCF, 2010. Estas superficies fueron estimadas a través de análisis NDVI en imágenes satelitales. La tasa de evaporación fue medida por Kampf, 2002 y Mardones 1986 entrega una aproximación, los resultados son presentados en la sección 9.2.1.

10.4 Diseño de red de monitoreo

A continuación se describen los elementos pertenecientes a las estaciones de monitoreo y una red complementaria de 11 piezómetros. Cada estación de monitoreo consta de un lisímetro, un pluviómetro, un sensor de temperatura y un piezómetro. El diseño de los elementos es descrito a continuación.

10.4.1 Lisímetro

El diseño del lisímetro se basó en la recopilación de antecedentes realizada y al contacto con personas que han trabajado con este tipo de instrumentos; se constató que los diámetros utilizados varían entre los 300 y 400 [mm] (Hernández 2012). De acuerdo a la experiencia nacional en cuanto al uso de lisímetros para estimar la evaporación desde el suelo, no se encontraron estudios en los cuales se haya trabajado con diámetros mayores a 400 [mm]. Según la experiencia internacional, el uso de diámetros sobre los 300 [mm] es poco común incluso en empresas especializadas en la construcción de lisímetros (Ej.: Decagon Devices), y no se encuentran antecedentes que demuestren una pérdida de exactitud producto de una disminución en el diámetro de este. A partir de lo anterior ICASS diseñó un lisímetro de 400 mm de diámetro, el que fue construido por un técnico con vasta experiencia en este tipo de trabajos.

A partir de lo anterior, se diseñó un lisímetro que consta de dos piezas principales. La primera es un tubo de PVC de 1,2 m por 400 mm de diámetro que contiene el suelo inalterado y una cámara inferior de 0,2 m de altura por donde entra el agua proveniente del estanque. Ambas piezas están unidas mediante bridas (Figura 10-4 y Figura 10-5).

Las componentes de la cámara inferior corresponden a: disco perforado, tapa inferior, brida inferior, tope disco perforado y PVC de comunicación. Tapa inferior, brida inferior y tope disco perforado vendrán unidos y sellados desde maestranza.

El objetivo de la cámara inferior es conectar la muestra de suelo con el estanque de agua y permitir el flujo de agua hacia la muestra de suelo minimizando la alteración de este. Para esto la cámara ha sido llenada con arena-gravilla, donde el agua que entra desde el estanque pasa por la cámara y luego fluye a través del disco perforado hacia la muestra de suelo. Esto se consideró con el fin de asegurar un escurrimiento laminar a medida que el agua del estanque ingresa al lisímetro. Este diseño permite que el flujo de agua que ingresa desde el estanque sea amortiguado por la arena-gravilla, lo que permitirá que el suelo del lisímetro no se distorsione producto de la entrada de agua durante el proceso de llenado del estanque.

El lisímetro se conecta al estanque de agua mediante una manguera, la cual está protegida por un tubo de PVC para que no se aplaste por efecto del peso del suelo.

El estanque de agua corresponde a un tubo de PVC de 400mm de diámetro por 1,2 m de alto, cerrado con tapas en la parte inferior y superior. La tapa inferior a un costado tiene una salida que conecta con la manguera que une al lisímetro. En la parte superior del estanque se instaló un tubo de observación de PVC con tapa. Este conducto permite llenar el estanque, introducir el sensor y medir el nivel de agua al interior del estanque con un pozómetro.

El tubo de observación diseñado ofrece las siguientes ventajas: evita el ingreso de material al estanque, permite tapar el estanque completamente siendo visible sólo el tubo y evita la incidencia directa del sol sobre el agua con lo cual se disminuyen las pérdidas por evaporación. Adicionalmente, se considera fijar el cable de soporte del sensor a un perno ubicado en la parte superior del tubo de observación, lo cual entrega la ventaja de retirar el sensor directamente desde el tubo sin necesidad de sacar la tapa superior del estanque.

Adicionalmente se incluye una regla a un costado del estanque en caso que se desee realizar alguna calibración extra del sensor.

Es importante mencionar que el lisímetro no debe presentar filtraciones, ya que estas sobreestiman las mediciones de evaporación. Es por esto que se han tomado todas las medidas con el fin de evitar las pérdidas por filtración tanto en el diseño como en la instalación. El lisímetro diseñado considera acople por medio de bridas apernadas, como se mencionó anteriormente y el resto de las piezas van soldadas o atornilladas y se utilizará teflón y silicona para sellar las uniones.

El nivel del estanque será medido con un sensor de presión marca Seba modelo Dipper APT

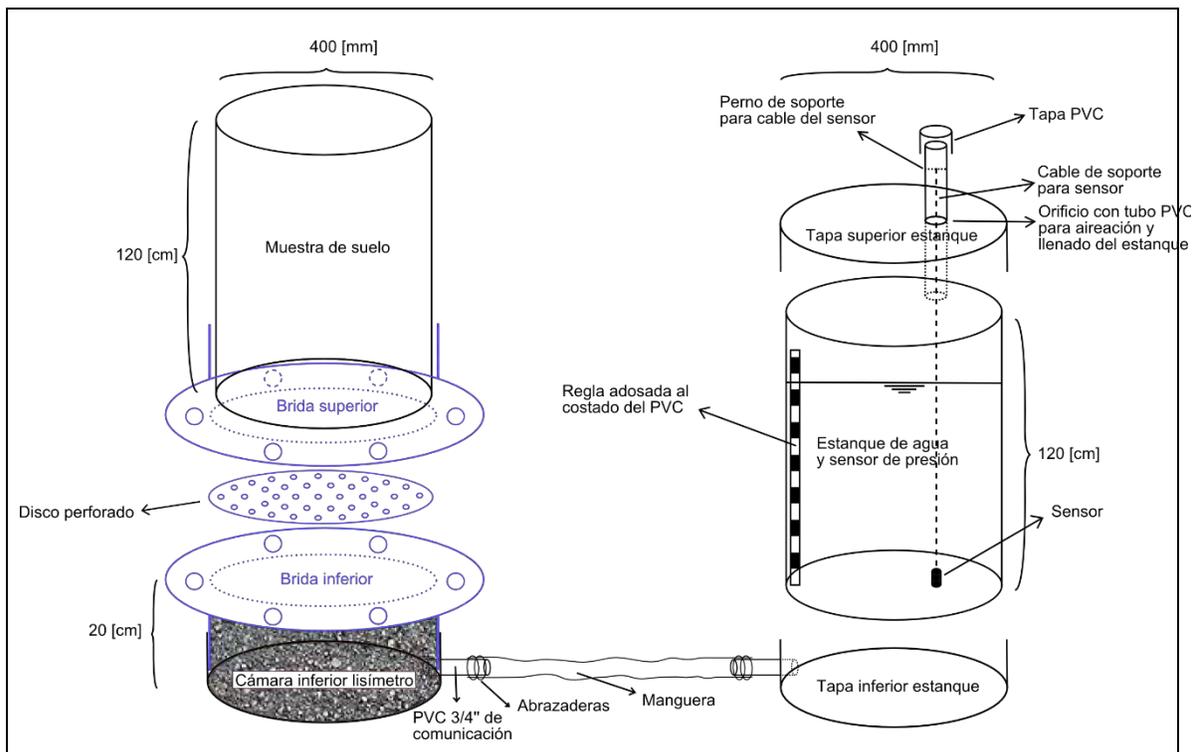


Figura 10-4: Diseño lisímetro



Figura 10-5 Fotografía lisímetro

10.4.2 Pluviómetro

Cada estación dispone de un pluviómetro tipo *tipping bucket*, marca HOBO modelo RG3-M. En las fichas del Anexo 8 se entregan los detalles de la instalación del pluviómetro, especificando la altura sobre el suelo de la bandeja (negra) de recolección de este.



Figura 10-6 Pluviómetro

10.4.3 Sensor de temperatura

Cada estación dispone de un sensor de temperatura marca HOBO. El sensor se instala en una caseta Solar Radiation Shield RS1, especialmente diseñada para ese propósito. En las fichas del Anexo 8 se entregan los detalles de la instalación del sensor de temperatura, especificando la altura sobre el suelo del sensor.



Figura 10-7 Solar Radiation Shield

10.4.4 Piezómetro

Los piezómetros del presente estudio cuentan con una profundidad de 2 m, se perforó en 4 pulgadas y se realizó una habilitación en PVC con un diámetro interno de 3 pulgadas que dispone además de una punta cónica. El PVC cuenta con el tramo de 0,05 m a 1,95 m de ranurado. El espacio anular se rellena con gravilla y el PVC ranurado se envuelve en un geotextil. Los 10 piezómetros ubicados en las estaciones de monitoreo disponen de un tapa-pozo metálico con candado para cubrir el sensor de registro de nivel. En la se presenta un esquema del diseño del piezómetro y fotos del pegado del geotextil y punta cónica. Todos los piezómetros fueron cortados de acuerdo a la profundidad de perforación alcanzada en cada punto y por lo tanto el largo total del PVC es variable.

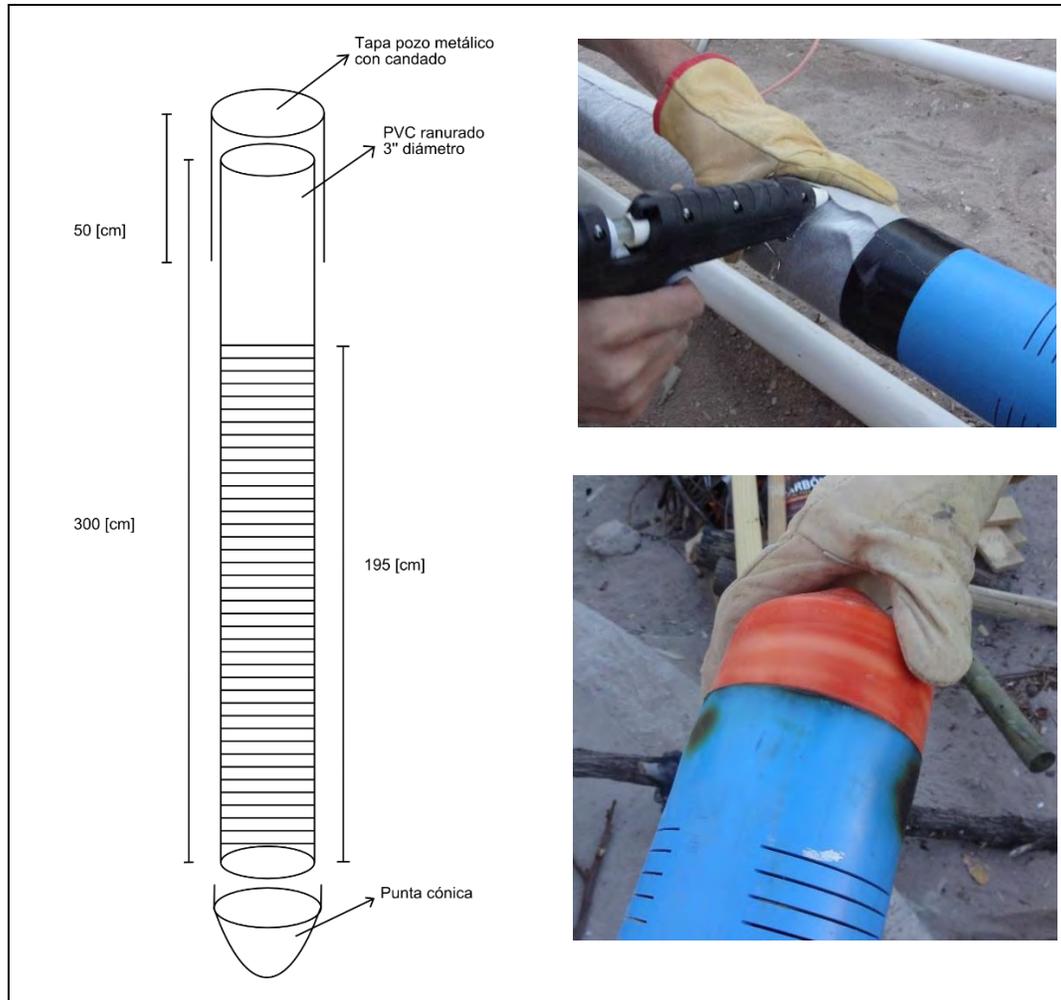


Figura 10-8 Construcción piezómetro

10.5 Ubicación de estaciones de monitoreo

La ubicación de las 10 estaciones de monitoreo (lisímetro, piezómetro y pluviómetro) busca caracterizar de la mejor forma la heterogeneidad de los depósitos superficiales del Salar de Atacama así como el nivel freático, aportando con datos de evaporación que representen de mejor manera la descarga del mismo.

A continuación se describen los criterios utilizados para definir la ubicación de las 10 estaciones de monitoreo. A partir de los trabajos de Mardones 1986 y Muñoz et al., 2004, se concluye que la evaporación está fuertemente influenciada por el tipo de suelo, nivel freático y densidad del agua. Es importante mencionar que el agua a utilizar en cada lisímetro corresponderá al agua subterránea de la zona, la cual será extraída *in-situ* desde un piezómetro.

A continuación se detallan los criterios utilizados para la propuesta de ubicación de los lisímetros. En primer lugar se menciona los criterios de zonación superficial, en segundo lugar se analiza el nivel freático del salar, por último se consideran otros criterios como zonas sensibles medioambientales y acceso de caminos.

10.5.1 Zonación superficial

Para el análisis de la superficie del salar, se consideraron en primer lugar los antecedentes del trabajo de Mardones 1986, quién presenta las 15 zonas de evaporación definidas por Mardones 1986 (Figura 9-2). Estas zonas fueron definidas a partir del tipo de costra superficial, tipo de depósito salino y el nivel freático. A partir de lo cual DGA/GCF, 2010 realiza una corrección de las áreas principalmente las atribuidas a vegas y humedales.

Por otro lado, la Carta Geológica de Chile Hoja de Toconao 1:250.000 elaborada por Ramírez y Gardeweg 1982, presenta la geología del Salar de Atacama, donde se distinguen 6 distintos tipos de depósitos salinos. El estudio de Bevacqua 1991, describe en detalle tipo de costra superficial y realiza perfiles estratigráficos, clasifica en 4 tipos de depósitos con subclasificaciones. Además, el estudio de Kampf et al., 2006 quienes realizan a través de imágenes satelitales ASTER un estudio del flujo energético de la superficie del salar que lo 8 tipos de costra.

Los estudios anteriormente mencionados son compilados en el trabajo de Fock, 2009 quién a partir de los mapas anteriores presenta un mapa de zonación superficial para 5 distintos tipos de sedimentos del Salar (Figura 5-1)

La mayor discrepancia en entre los mapas se presenta en el área descrita como delta del río San Pedro. Esta zona es descrita en el trabajo de DGA/GCF, 2010 como parte del núcleo salino, pero en los trabajos de Muñoz et al., 2004, Kampf et al., 2006 y Fock, 2009 lo clasifican como sedimentos aluviales asociados al delta del río San Pedro con presencia de cloruros. Esta discrepancia considera, en un análisis preliminar, un área de 115 km², donde es necesario verificar el tipo de sedimento y la tasa de evaporación. A partir de lo anterior, se considerará el mapa de Fock, 2009 para la zonación superficial de los distintos tipos de depósitos salinos, poniendo interés en la zona del delta del río San Pedro.

10.5.2 Nivel freático

Se realizó una revisión preliminar de antecedentes de la piezometría del salar, recolectados a partir del Plan de Seguimiento Ambiental Hidrológico de SQM (SQM, 2013), que cuenta con el monitoreo de 196 pozos distribuidos principalmente en el margen este y núcleo del salar. Además se revisó el trabajo de Salas et al., 2010 que presenta una piezometría para diciembre del 2008 en el margen este del salar.

10.5.3 Otros criterios

Se consideraron otros criterios complementarios para definir la ubicación de lisímetros. En primer lugar, se buscó caracterizar en detalle la zona sur este del salar, donde Mardones 1986, no realizó campañas de medición con lisímetros y presenta un especial interés hidrogeológico dado el escenario de explotación en esa zona. Además, se buscó ubicar un lisímetro en las cercanías del lisímetro LC-45 instalado por Mardones, con el fin de relacionar las mediciones efectuadas el año 1983 con las de este proyecto. Por último se consideraron los accesos a la zona y estar fuera de las áreas sensibles medioambientalmente (Reservas Nacionales y Zonas RAMSAR). En la se presenta un mapa con los caminos al salar de Atacama y las zonas sensibles medioambientalmente. Las zonas sensibles medioambientalmente se asocian a lagunas y humedales del salar de Atacama. Los tipos de suelo presente en esas zonas sensibles se distribuyen también fuera de estas, por lo que es posible monitorear el tipo de suelo sin afectar el área sensible.

10.5.4 Ubicación estación de monitoreo

A partir de los criterios definidos y de las dificultades encontradas en terreno, se definen 10 puntos de ubicación de monitoreo que incluye los lisímetros. En la se presenta la ubicación y se compran los distintos tipos de costras entre los estudios de Fock, 2009, Ramírez y Gardeweg 1982 y Mardones 1986, se detalla además el tipo de suelo esperado en ese punto. Luego de la primera campaña de terreno se determinó que instalar una estación de monitoreo en el núcleo del salar era poco viable dada la dureza del suelo. Además que la tasa de evaporación de las aguas subterráneas del núcleo determinadas en los estudios de Mardones 1986, Kampf 2002, es muy pequeña cercana a los 2 mm/año, esto debido a la profundidad del nivel freático y a la densidad de la salmuera.

Tabla 10-1 Ubicación estación de monitoreo (WGS84 / UTM zona 19S)

COD	Coordenadas (WGS84 / UTM 19S)		Unidad			Objetivo (tipo de suelo esperado)
	Norte (m)	Este (m)	Fock, 2009	Ramírez y Gardeweg, 1982	Mardones en DGA/GCF, 2010	
Lis-1	7372845	578419	Hcas (Carb-sulf)	Qs(sulfato)	A9-2 (limo salino)	Depósitos sulfato y carbonatos. Zona sur este del salar.
Lis-2	7384353	590459	H Sulfatos	Qs (sulfato)	A9-2 (limo salino)	Depósitos sulfato. Zona sur este del salar.
Lis-3	7394074	591764	Hsul2 (Sulfatos)	Qcls (cloruro-sulfato)	A7(costra salino limosa de yeso y halita)	En terreno se identificó esta costra como suelo de carbonato con características granulométricas y nivel freático diferentes al Lis-4
Lis-4	7393992	591612	H sulfatos	Qs (sulfato)	A3 (costra delgada sal granulada)	Depósitos de sulfatos
Lis-5	7375739	590716	Hacacl (Arcilla carbonato sulfato)	Qcls (cloruro-sulfato)	A9-2, A12(limo salino, vegas)	Caracterizar costra de carbonato en la zona sur del Salar y con características granulométricas diferentes a las encontradas en el Lis-1 y Lis-2
Lis-6	7424606	591475	Hacacl (aluvial, carb. a cloruros)	Qal (dep. aluvial)	A12 (vegas)	Zona marginal aluvial. Cercanía ubicación lisímetro LC-45 de Mardones.
Lis-7	7439456	581605	Hcas (carbonatos-sulfatos)	Qs (sulfato)	A5 (yeso limoso blando)	Depósitos de carbonatos y sulfatos
Lis-8	7417731	591656	Hamo (Vegas)	Ql	A12(vegas)	Caracterizar el margen este del Salar, zona de elevada evaporación por la presencia de vegas.
Lis-9	7452197	587058	H Sulfatos	Qal (dep. aluvial)	A8-2 (limo salino)	Depósitos de sulfatos
Lis-10	7443461	573502	Hasp2 (Abanico SanPedro)	Qs (sulfato)	A4(yeso limoso blando)	Depósitos del delta del río San Pedro

Se presenta la ubicación en planta de las 10 estaciones de monitoreo en la Figura 10-9.

La ubicación de los 20 piezómetros adicionales busca aportar con datos de nivel del agua subterránea en zonas donde existe poca información o donde se requiere complementar la información proveniente de los Plan de Seguimiento Ambiental de las empresas SQM, MEL y NX1 Peine. Además se consideraron las zonas sensibles medioambientalmente y los accesos. A continuación se presenta en la Tabla 10-2 y en la Figura 10-9 la ubicación propuesta de los piezómetros.

Tabla 10-2 Ubicación piezómetros propuestos

COD	Coordenadas (WGS84 / UTM 19S)	
	Norte (m)	Este (m)
1	7375311	590752
2	7377694	581492
3	7381167	582718
4	7388180	593067
5	7391448	595518
6	7393593	586058
7	7394921	592046
8	7415551	576998
9	7421067	568828
10	7424879	587961
11	7427467	573730
12	7431756	591637
13	7432505	579041
14	7437442	581901
15	7438769	571892
16	7442991	578769
17	7445817	583879
18	7453306	581564
19	7453681	576249
20	7455928	587756

Una vez en terreno se visitó los lugares propuestos y se intentó instalar los piezómetros, sin embargo, con las herramientas disponibles no fue posible perforar en varios de los puntos definidos previamente, por lo que el número de piezómetros instalados y la ubicación definitiva varía respecto de lo planteado originalmente (Tabla 10-3).

Tabla 10-3: Ubicación definitiva de piezómetros adicionales.

COD	Coordenadas (WGS84 / UTM 19S)	
	Este (m)	Norte (m)
P02	577977	7369049
P03	572401	7374970
P04	593374	7389036
P10(seco)	592321	7424627
P12	591589	7431659
P13	580336	7432214
P14	580091	7435769
P15	572635	7439502
P16(seco)	578528	7442574
P17	583057	7445792
P18(seco)	581564	7453307
P19(seco)	576235	7453810
P20	587620	7454575

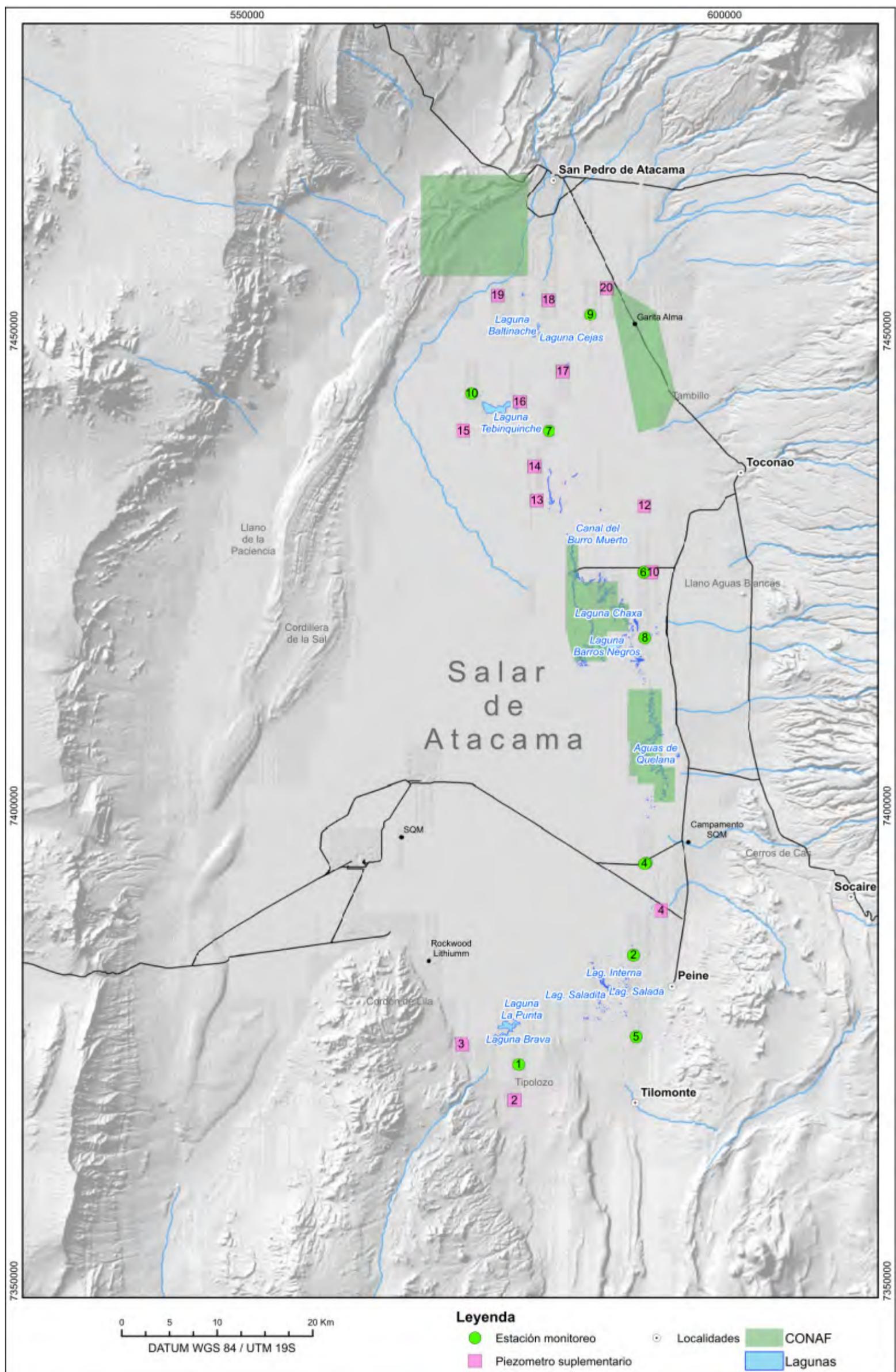


Figura 10-9 Ubicación estaciones de monitoreo

11. Actividades de terreno

11.1 Instalación de instrumentos

Se realizaron 5 campañas de terreno. En la Tabla 11-1, se presentan las fechas de las campañas y las actividades más relevantes.

Tabla 11-1 Campañas de terreno

Fechas	Actividades principales
8 al 15 de Septiembre	Traslado de equipo de perforación y materiales a utilizar, reconocimiento del área de estudio, verificación de accesos, identificación los lugares donde se instalarán las estaciones de monitoreo y piezómetros adicionales. Por último se construyeron cinco piezómetros.
3 al 12 de Noviembre	Construcción dos estaciones de monitoreo que incluyeron: lisímetro, piezómetro y se instaló el mástil del pluviómetro. Además se efectuó un reconocimiento y replanteamiento de la ubicación de dos estaciones de monitoreo. La campaña contó con la supervisión del inspector fiscal de la DGA.
18 al 26 de Noviembre	Construcción de tres estaciones de monitoreo (lisímetro, piezómetro y pluviómetro), se instrumentalizó una estación de monitoreo. Se construyeron cinco piezómetros adicionales.
2 al 10 de Diciembre	Construcción de tres estaciones de monitoreo y dos piezómetros.
16 al 24 de Diciembre	Construcción de dos estaciones de monitoreo, las cuales fueron reubicadas de su lugar original. Se instalaron también 2 pluviómetros
12 al 16 de Enero	Campaña de instrumentación de lisímetros, piezómetros y pluviómetros.

11.1.1 Lisímetros

Los lisímetros se instalaron de acuerdo al procedimiento mencionado anteriormente, y se equiparon con los transductores de presión marca Seba.

Para medir la evaporación proveniente del lisímetro se registra el descenso del nivel en el estanque por medio de un sensor de presión instalado en su interior. A partir del descenso del nivel se calcula el volumen de agua perdida en el tiempo. Notar que el descenso del nivel ocurre tanto en el estanque de agua como en el lisímetro. El cálculo de la evaporación se muestra en la ecuación 11-1, donde Δh corresponde al descenso de nivel en el tiempo Δt . A_e y A_l corresponden a las áreas del estanque y el lisímetro respectivamente. Por último S_y , corresponde a la porosidad drenable de la muestra de suelo ubicada al interior del lisímetro.

$$E_h = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot A_e + \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot A_l \cdot S_y \quad \mathbf{11-1}$$

Dado que las áreas del lisímetro y el estanque son iguales es posible escribir la ecuación 11-2 anterior de la siguiente forma

$$E_h = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot A \cdot (1 + S_y) \quad \mathbf{11-2}$$

Dado que la mayoría de los sedimentos corresponden a arcillas-sulfato-carbonatos, es posible estimar que la porosidad drenable presenta valores bajos del orden del 0-5% (Fetter, 2001)

Es importante considerar que la evaporación disminuye en función de la profundidad del nivel en forma exponencial, por lo que se recomienda calcular la tasa de evaporación utilizando una diferencia pequeña entre el nivel inicial y final y asignar ese valor a una profundidad promedio.

El lisímetro-9 fue equipado con sensor de presión y conductividad marca Seba (modelo Dipper PTEC). A partir de las mediciones de conductividad es posible estimar la variación de la densidad de la solución presente en el estanque en el tiempo. Con esto se busca estudiar las variaciones de densidad dentro del estanque que pudiesen afectar la estimación de evaporación.

11.1.1.1 Cálculo del nivel freático del estanque (n.f.)

Si bien el cálculo de la evaporación requiere sólo la variación de altura h , también resulta fundamental conocer el nivel freático al interior del estanque para así construir la curva

Evaporación v/s nivel freático. En la Figura 11-1 se muestran todas las medidas relevantes del estanque que se requieren para su estimación.

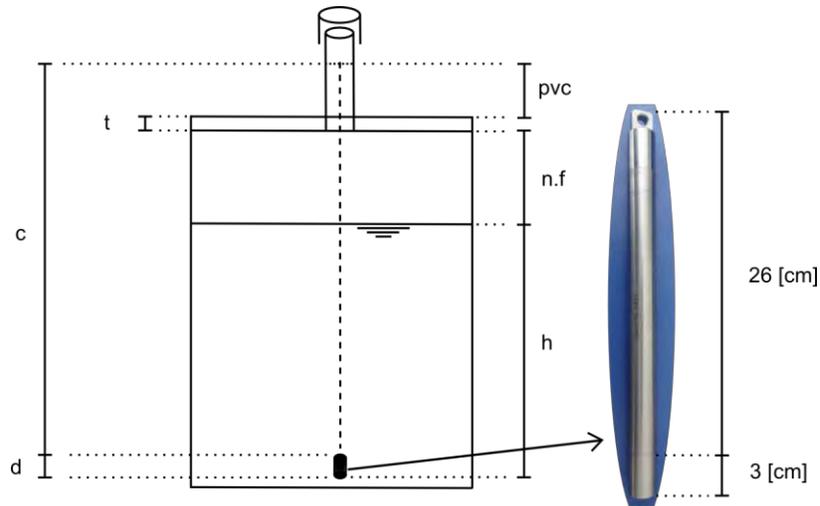


Figura 11-1: Medidas estanque.

El nivel freático se calcula según la ecuación,

$$n.f. = c + d - pvc - t - \alpha(h - p)$$

11-3

donde

<i>n.f.</i>	Nivel freático	[cm]
<i>c</i>	Largo de la cuerda	[cm]
<i>d</i>	Largo del dipper (29 [cm])	[cm]
<i>pvc</i>	Distancia entre la parte superior de la tapa del estanque y el cable de soporte del Dipper APT	[cm]
<i>t</i>	Espesor tapa del estanque (1 [cm])	[cm]
<i>α</i>	Factor que depende de la densidad del agua. Se debe calibrar para <i>n.f.</i> , <i>h</i> y <i>p</i> conocidos.	
<i>h</i>	Altura de presión registrada por el Dipper APT	[cm]
<i>p</i>	Compensación por variaciones de la presión atmosférica (Barodipper)	[cm]

Cabe destacar que en el caso de *h* y *p* los valores se obtienen en [hPa] desde el Dipper APT y Barodipper respectivamente, por cuanto se debe realizar la transformación a [cm]. En el Anexo 8 se indican las medidas antes descritas para cada uno de los lisímetros.

Se construyó una ficha por lisímetro, en la que se incorporó la información de instalación (Tabla 11-2).

Tabla 11-2 Lisímetro estación de monitoreo 1

Lisímetro-1			
Nombre	Lis-1	Este	578419
		Norte	7372845
		Cota	2296
Fecha Inicio Construcción	21-11-2014	Fecha término Construcción	22-11-2014
Fecha/hora instalación data logger	14-01-2015 11:30	Fecha/hora inicio data logger	17-12-2014 12:00
Altura lisímetro (muestra de suelo)	100 [cm]	Nivel freático estanque (<i>n. f.</i>)	31 [cm]
Cod. Data logger	D4L40117	Intervalo medición batería	96h:00m:00s
Intervalo medición presión	06h:00m:00s	Intervalo medición temperatura	06h:00m:00s
Parámetros de calidad			
Conductividad	6,05 [ms/cm]	pH agua estanque	8,31
Sólidos disueltos	3,88 [g/l]	Temperatura	18,05°C
Medidas			
c	97,5 [cm]	pvc	12,5 [cm]
Ecuación 11-3	$n. f. = 97,5 + 29 - 12,5 - 1 - \alpha(h - p)$		$n. f. = 113 - \alpha(h - p)$ [cm]
Observaciones			
<p>En el proceso de hincado del lisímetro se observó una compactación del suelo de aproximadamente 15 cm en 100 cm de hincado. La compactación podría deberse a que los primeros 30 cm de suelo corresponden a material blando y poco compacto. Se hincó el lisímetro hasta una profundidad aproximada de 115 cm con el fin de completar la columna de suelo de 100 cm.</p> <p>Debido a que el área presenta una profundidad del nivel freático somera es recomendable que el estanque de agua mantenga siempre un volumen de agua considerable, de lo contrario este podría ascender por efecto del empuje.</p>			
Fotos			
			

11.1.2 Piezómetros

En la primera campaña de terreno se realizaron 5 perforaciones de 2 m de profundidad con el fin de instalar piezómetros correspondientes a la red complementaria de monitoreo. De estas perforaciones, 3 presentaron el nivel freático a una profundidad menor a 2 m, por lo que se procedió a instalar los piezómetros. Por otro lado, se realizó una perforación de aproximadamente 1,5 m, correspondiente al piezómetro asociado a la estación de monitoreo 9, donde se encontró con un nivel de toba soldada que no fue posible perforar.

11.1.2.1 Cálculo del nivel freático del piezómetro (*n.f.*)

En la Figura 11-2 se muestran todas las distancias relevantes que se requieren para determinar el nivel freático en los piezómetros de las estaciones de monitoreo. El nivel freático se calcula según la ecuación,

$$n.f. = c + d - s.u. - \alpha(h - p)$$

11-4

donde

- | | | |
|-------------|--|------|
| <i>n.f.</i> | Nivel freático | [cm] |
| <i>c</i> | Largo de la cuerda | [cm] |
| <i>d</i> | Largo del dipper (29 [cm]) | [cm] |
| <i>s.u.</i> | Stick up: distancia entre el nivel de referencia del suelo y el punto desde donde cuelga el Dipper APT | [cm] |
| α | Factor que depende de la densidad del agua. Se debe calibrar para <i>n.f.</i> , <i>h</i> y <i>p</i> conocidos. | |
| <i>h</i> | Altura de presión registrada por el Dipper APT | [cm] |
| <i>p</i> | Compensación por variaciones de la presión atmosférica (Barodipper) | [cm] |

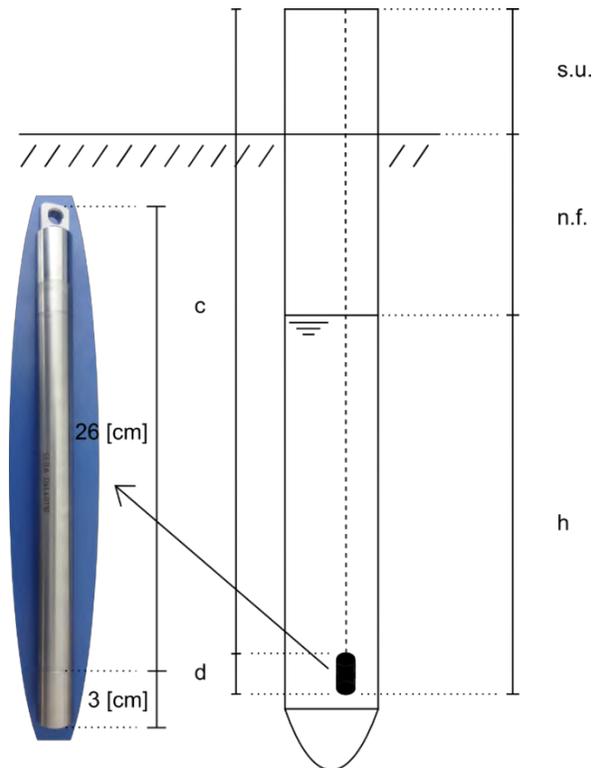
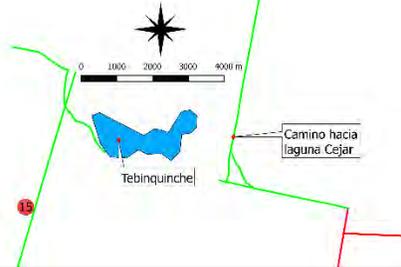


Figura 11-2 Dimensiones características piezómetro

Cabe destacar que en el caso de h y p los valores se obtienen en [hPa] desde el Dipper APT y Barodipper respectivamente, por cuanto se debe realizar la transformación a [cm]. En el Anexo 8 se indican las medidas antes descritas para cada uno de los piezómetros.

Se presenta en la Tabla 11-3 la ficha de uno de los piezómetros instalados. Las fichas de los piezómetros restantes se presentan en el Anexo 9.

Tabla 11-3 Piezómetro DGA-15

Nombre	DGA15	Este	572635	
		Norte	7439502	
		Cota	2324	
Características de diseño				
Fecha Inicio perforación	11-09-2014	Diámetro perforación	100	[mm]
Fecha término Construcción	11-09-2014	Profundidad perforación	220	[cm]
Stick up	87,5	[cm]	Diámetro habilitación	3"
Fecha instalación data logger		Profundidad habilitación	220	[cm]
Fecha programada inicio data logger		Profundidad nivel freático	75	[cm]
Cod. Data logger		Profundidad instalación DT		
Estratigrafía [cm]				
0-15	Costra de yeso y halita con sedimentos finos			
15-220	35% arcilla, 30% limo, 35% arena media. Color café			
Otros	Se observaron cristales de biotita de 0,5 [mm]			
Acceso				
			<p>Acceso a través de un camino que bordea la laguna Tebinquinche por su borde sur.</p>	
Fotos				
				

11.2 Campaña de geofísica

Se realizó una campaña de exploración geofísica con los métodos de tomografía electromagnéticas, durante los días 15 de Octubre al 2 de Noviembre del 2014. El objetivo propuesto por la Dirección General de Aguas para este estudio es identificar posibles fuentes de recarga profundas hacia el Salar de Atacama desde el este.

Se ha asumido que estas fuentes de recarga se asociarían a las cuencas altiplánicas ubicadas al este del salar de Atacama, como las cuencas de los salares Aguas Calientes 1, Pujsa, Loyoques y Aguas Calientes o la cuenca de las lagunas Trinchera, Chivato Muerto y Lejía.

Para lograr el objetivo propuesto, se construyó una sección de orientación principal nort-sur, aproximadamente desde la latitud del salar de Tara hasta la latitud de la laguna Lejía (sección L1). La ubicación exacta de esta sección se ha definido considerando los pozos existentes en el área de estudio y el espaciamiento entre los puntos de medición es aproximadamente 1,5 km. Como se indicó anteriormente, la geofísica se debe basar en secciones este-oeste, debido a la orientación de las estructuras. Por esta razón, de manera complementaria, se propone realizar cuatro secciones con esta orientación, cada una con 7 estaciones y con un espaciamiento de 1 km (secciones T1 a T4). El resultado de lo descrito anteriormente se presenta la Figura 11-3, y la lista completa de puntos en la Tabla 11-4. En el Anexo 3 se incluye el informe de geofísica.

Este estudio ha entregado información que aportó a la comprensión de la geología y de la hidrogeología del Salar de Atacama. La información aportada por la geofísica al modelo geológico se presenta en la sección 5.5.2.3 "Perfiles de Transiente Electromagnético (TEM) y Magnetotelúrica", y la interpretación hidrogeológica de esta información está contenida en el capítulo 7.2.5 "Interpretación de los resultados del levantamiento geofísico"

Tabla 11-4 Ubicación estaciones TEM

Estación	Este	Norte	Secciones	Estación	Este	Norte	Secciones
Punto 01	597295	7441000	L1	Punto 26	600501	7401745	L1
Punto 02	597295	7439500	L1	Punto 27	594295	7438000	T1
Punto 03	597295	7438000	L1; T1	Punto 28	595295	7438000	T1
Punto 04	597295	7436500	L1	Punto 29	596295	7438000	T1
Punto 05	597295	7435000	L1	Punto 30	598295	7438000	T1
Punto 06	597295	7433500	L1	Punto 31	599295	7438000	T1
Punto 07	597295	7432000	L1	Punto 32	600295	7438000	T1
Punto 08	597295	7430500	L1; T2	Punto 33	594295	7430500	T2
Punto 09	597247	7428736	L1	Punto 34	595295	7430500	T2
Punto 10	597200	7426972	L1	Punto 35	596295	7430500	T2
Punto 11	597153	7425209	L1	Punto 36	598295	7430500	T2
Punto 12	597145	7423656	L1	Punto 37	599295	7430500	T2
Punto 13	597137	7422103	L1	Punto 38	600295	7430500	T2
Punto 14	597130	7420551	L1; T3	Punto 39	594130	7420551	T3
Punto 15	597841	7419080	L1	Punto 40	595130	7420551	T3
Punto 16	598552	7417610	L1	Punto 41	596130	7420551	T3
Punto 17	599263	7416139	L1	Punto 42	598130	7420551	T3
Punto 18	599356	7414528	L1	Punto 43	599130	7420551	T3
Punto 19	599449	7412916	L1	Punto 44	600130	7420551	T3
Punto 20	599542	7411305	L1	Punto 45	596635	7409694	T4
Punto 21	599635	7409694	L1; T4	Punto 46	597635	7409694	T4
Punto 22	599808	7408104	L1	Punto 47	598635	7409694	T4
Punto 23	599981	7406514	L1	Punto 48	600635	7409694	T4
Punto 24	600154	7404924	L1	Punto 49	601635	7409694	T4
Punto 25	600328	7403335	L1	Punto 50	602635	7409694	T1

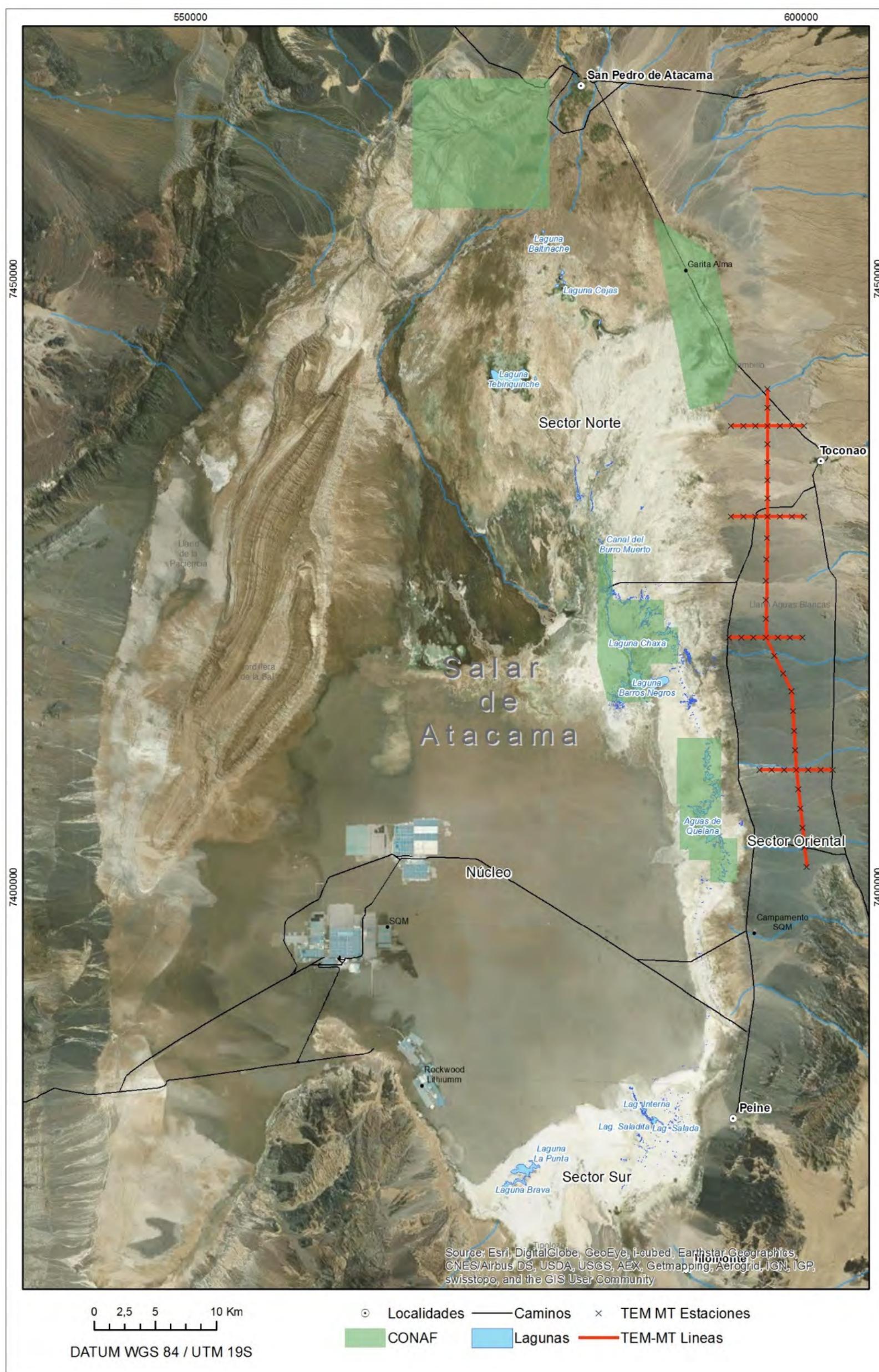


Figura 11-3 Ubicación estaciones TEM

11.3 Catastro pozos y SIG

Se realizó un catastro de los pozos incluidos en los PSAH de RWL, SQM y MEL. En la Figura 11-4, se presenta la ubicación de los pozos. La tabla de atributos contenida en el SIG, presenta profundidad de la perforación, habilitación, fecha de construcción, y otros, en la medida que estén disponibles. En la Tabla 11-5, se presenta la información contenida en el SIG. Los archivos del SIG se encuentran en el CD del informe del presente estudio

Tabla 11-5 SIG

Carpeta	Archivo	Origen
Hidroquímica	Hidroquímica BD	Digitalizado de Díaz del Río et al., 1973; Hauser, 1997; RioChilex, 1997; Risacher et al., 1999; EIA RWL, 2009 y BNA-DGA.
	Cuña salina	Modificado de Salas, 2010, Fock, 2010 y EIA RWL 2009.
Geofísica	TEM Estaciones	Elaboración propia
	TEM Perfiles	Elaboración propia
Derechos de Agua (GCF)	Derechos de Agua (GCF)	DGA/GCF, 2010
Estación monitoreo	Estación monitoreo	Elaboración propia
	Ubicación piezómetro	Elaboración propia
	Lisímetros Mardones 1986	Digitalizado de Kampf, 2002
Pozos PSA	Pozos PSAH SQM	PSAH SQM
	Pozos DGA	PSAH SQM
	Pozos PSAH MEL	PSAH MEL
	Pozos RWL	RWL
Toponimia, caminos, otros	Localidades	IGM
	Toponimia_icass	Elaboración propia
	CONAF	IGM
	Caminos	IGM
	Nombres geográficos Antofagasta	IGM
	Vegas	DGA
	Comunidades unidad norte	CONADI
	Provincias Antofagasta	IGM
Hidrología	Lagunas	Modificado de DGA
	Red hidrográfica	DGA
	Cuenca salar	DGA
	Salares	DGA
Geología	Geología Salar	Modificado de Bevacqua 1990, Ramirez y Gardeweg 1982 y Fock, 2010.
	Geología millón SERNAGEOMIN	SERNAGEOMIN
Raster	Landsat	USGS
	Kampf_2006	Georeferenciado de Kampf, 2006
	Relieve	A partir de SRTM
	SRTM	USGS

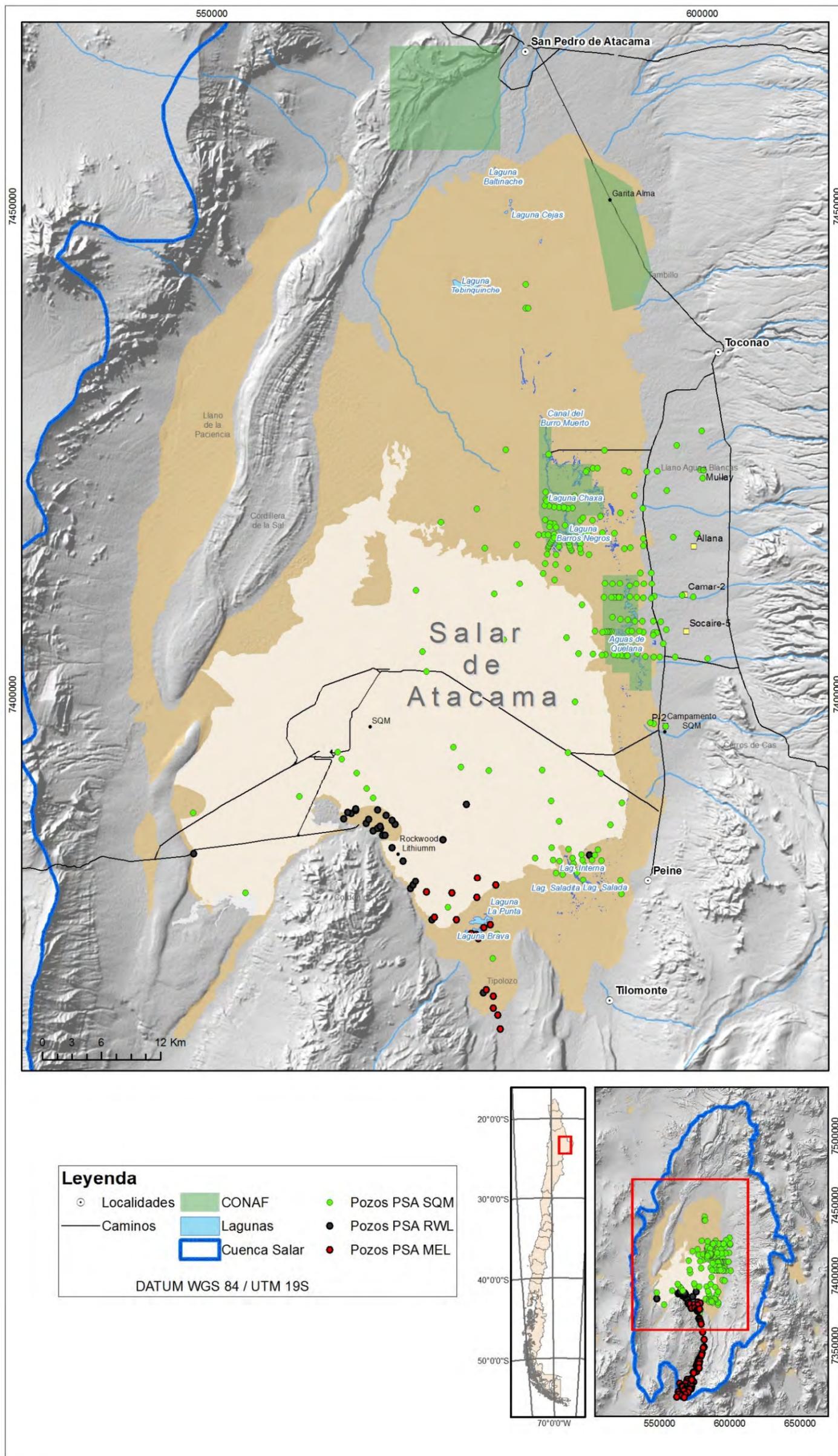


Figura 11-4 Catastro pozos

11.4 Conclusiones

Las actividades de terreno permitieron identificar algunos aspectos relevantes que se deben considerar en este tipo de proyectos, no sólo para el diseño, construcción e instalación de instrumentos, sino que también para la mantención de los lisímetros ya instalados, y la forma de enfrentar nuevas iniciativas para el estudio de la evaporación en la cuenca del Salar de Atacama.

11.4.1 Mantención estaciones de monitoreo

Relación nivel freático y agua en estanque:

En la instalación del lisímetro N°7 ocurrió que durante la etapa de reconstitución del lugar el estanque ascendió por efecto del empuje del agua. El nivel freático en el lugar se encontraba a unos 35 [cm] de profundidad y se decidió iniciar la reconstitución con el estanque vacío. Esto generó que por efecto de la diferencia de densidades el agua ejerciera una fuerza vertical sobre el estanque, la cual lo desplazó de su posición. Gracias a esto se advirtió la necesidad de monitorear periódicamente el nivel de agua en los estanques, teniendo especial cuidado en aquellos donde el nivel freático se encuentra más somero para así evitar que ocurra la misma situación.

Otro aspecto importante a considerar es el agua que se utilizará para rellenar los estanques de los lisímetros. Durante la instalación se utilizó el agua que afloró desde la zanja excavada, a excepción de los lisímetros N°3 y N°10 donde no fue posible extraer agua del lugar. En muchas ocasiones el agua presentó elevadas cargas de sólidos suspendidos, por lo que ésta se limpió mediante filtrado o decantación.

Los lisímetros N°4 y N°9 cuentan con zanjas con afloramiento de agua, por lo que ésta puede ser extraída fácilmente, sin embargo, se recomienda obtener el agua directamente desde los piezómetros para así evitar concentraciones elevadas de salinidad u otro parámetro que pueda distorsionar la calidad natural del agua. En el caso que el agua del piezómetro contenga una elevada carga de sedimentos, se recomienda limpiarla mediante decantación por un periodo de al menos 12 horas. Finalmente es recomendable purgar el piezómetro previo a la obtención del agua para el relleno de los estanques.

Relleno de estanque:

Se debe considerar que los lisímetros instalados comenzaron a medir en Enero de 2015, es decir en plena época de verano. Se recomienda que éstos continúen funcionando hasta que el nivel de los estanques descienda lo más posible y así cubrir de forma óptima la curva de evaporación v/s profundidad del nivel freático. El siguiente relleno de agua debiera realizarse durante los meses de invierno para así asegurar el registro de las variaciones estacionales.

11.4.2 Consideraciones para proyectos futuros

Resulta necesario definir claramente los objetivos que se persiguen con la instalación de instrumentos como lisímetros, piezómetros o pluviómetros, así como también invertir tiempo en definir de forma correcta la ubicación de cada uno de ellos en pro de los objetivos de cada proyecto.

Un ejemplo claro de lo anterior es la instalación de piezómetros ya que el monitoreo de aguas subterráneas podría perseguir diversos objetivos. Por ejemplo si se quiere estimar el flujo subterráneo a través de una sección de paso determinada, se necesitaría medir un gradiente hidráulico. Para esto los piezómetros deben ser ubicados en línea paralela al flujo subterráneo, similar a los pozos de monitoreo de los PSA que se encuentran en el borde este del Salar. Por otro lado si el objetivo es monitorear el nivel freático en un sector donde un ecosistema específico depende del agua subterránea, entonces la estrategia de ubicación será diferente.

Sobre la instalación de lisímetros, se recomienda que la parte superior de éstos sobresalga levemente de la superficie del terreno con el objetivo de evitar el ingreso de agua por flujo lateral durante los eventos de precipitación. Si con los lisímetros instalados llegase a ocurrir esta situación, el volumen de agua ingresado por flujo lateral puede ser estimado con el aumento de volumen en el estanque registrado por el Dipper APT, menos el volumen ingresado por precipitación.

Una de las mayores dificultades para el hincado de los lisímetros fue la presencia de estratos en profundidad de alta dureza. Encontrarse con este tipo de suelos durante el hincado podría provocar la rotura del lisímetro generando evidentes pérdidas económicas y de tiempo. Para evitar este tipo de complicaciones es fundamental realizar una acabada campaña de reconocimiento que incluya perforación del suelo en cada uno de los sitios

predefinidos para la instalación de lisímetros, cuya ubicación definitiva debiera estar acordada con la autoridad teniendo disponible dicha información. De esta forma se minimizan cambios de ubicación durante la instalación definitiva, facilita la planificación de las campañas de terreno, permite anticiparse a situaciones imprevistas y posibilita la reubicación de lisímetros con anticipación en caso de ser necesario y así respetar los objetivos del proyecto.

Respecto de la ubicación de los lisímetros, se recomienda definir cuidadosamente los criterios que definirán dónde serán instalados. En este proyecto el criterio principal fue el de representar distintos tipos de costra, además de considerar el nivel freático de cada lugar. Sin embargo en terreno se observó que en ocasiones para un mismo tipo de costra la granulometría puede ser completamente distinta. Por ejemplo el lisímetro N°2 se encuentra en una costra de sulfato con una granulometría dominada por arena media, mientras que la costra del lisímetro N°4 también es de sulfato pero dominada por una granulometría de suelo fino. Para un mismo tipo de costra y un mismo nivel freático ambos lisímetros presentarán diferente tasa de evaporación.

En relación a lo anterior se recomienda estudiar la factibilidad de que en futuros estudios se incluya la granulometría como criterio a considerar para definir la ubicación de lisímetros, o bien otro criterio que permita caracterizar de forma correcta la heterogeneidad del suelo en el Salar de Atacama. Adicionalmente, independiente del criterio utilizado, es importante que se incorpore una caracterización acabada del suelo donde se instalan los lisímetros. Algunas medidas para aquello son: solicitar muestras de suelo de cada ubicación, enviar muestras de suelo a laboratorio para determinar su granulometría o exigir la presencia de un geólogo (o profesión afín) en terreno al menos para la campaña de reconocimiento.

Por otra parte, se recomienda probar alternativas de implementación de lisímetros y verificar las diferencias en evaporación según diseño y protocolo de instalación utilizado. Por ejemplo, se pueden hincar 2 lisímetros en un mismo lugar, donde uno de ellos es instalado de acuerdo al protocolo seguido en este proyecto, mientras que el otro se traslade a un lugar resguardado, de fácil acceso y condiciones meteorológicas similares. Si al comparar la evaporación de ambos lisímetros no se presentan grandes diferencias, entonces podría surgir como estrategia movilizar los lisímetros a lugares que faciliten su vigilancia y disminuyan los costos logísticos para su monitoreo. Esto significaría ahorros considerables en tiempo y presupuesto que permitan la instalación de un mayor número de lisímetros.

Por último, para una mejor estimación de la evaporación desde el agua subterránea, se recomienda utilizar lisímetros de carga constante. Esto permitiría comparar tasas de evaporación según la profundidad del nivel freático para una misma condición meteorológica. Esta modificación es factible de implementar en los lisímetros ya instalados. También se recomienda evaluar la factibilidad de implementar lisímetros de balanza, con los cuales se estima el volumen de agua evaporado en base a las variaciones tanto en el estanque como en la muestra de suelo. Esta metodología es de mayor precisión que la implementada en este proyecto donde el volumen evaporado se estima con sensores de presión.

11.4.3 Trabajo con comunidades

La presencia de las comunidades Atacameñas en el Salar de Atacama es un punto vital a considerar para el desarrollo de este tipo de proyectos. Estas se encuentran muy bien organizadas y de acuerdo al convenio 169 se les debe solicitar autorización tanto para la instalación de instrumentos como el acceso a sus terrenos una vez que se quieran retirar los datos. Por la experiencia de terreno se logró advertir que los miembros de las comunidades se muestran a favor de este tipo de iniciativas, mostrando especial interés en conocer el funcionamiento de las instalaciones como también poder contar con la información recogida. Este sentimiento de pertenencia se logró advertir en particular con la comunidad de Coyo, quienes administran el sitio turístico de la laguna Tebinquinche, punto de acceso al lisímetro N°10.

La presencia de las comunidades se debe considerar como un punto a favor para el funcionamiento en el largo plazo de las estaciones de monitoreo. Para aquello se recomienda entregar la mayor información posible, indicando la ubicación de cada una de las estaciones, para qué sirven y cómo funcionan. Adicionalmente se puede colaborar en actividades de vigilancia para la protección de los sensores.

Finalmente se recomienda incluir en cada punto de monitoreo una placa informativa sobre el proyecto, indicando que se trata de una investigación científica para el estudio de los recursos hídricos del Salar de Atacama. Se puede incluir una descripción de cada elemento de las estaciones de monitoreo, así como también indicar que se trata de un estudio del gobierno, en específico de la Dirección General de Aguas y en colaboración con las comunidades indígenas. Esto permitirá disuadir a las personas que encuentren alguna de las estaciones de monitoreo de efectuar daños sobre estas.

12. Conclusiones y Recomendaciones

Se revisaron los antecedentes de estudios anteriores en el Salar de Atacama. Se analizó las metodologías empleadas para la estimación de recursos hídricos por los distintos estudios.

Se realizó un análisis de los mecanismos de recarga y descarga del salar, poniendo énfasis en los mecanismos de evaporación, destacando la evaporación desde el agua subterránea, desde cuerpos superficiales y la evapotranspiración.

A partir del análisis de antecedentes, recopilación de información geológica e hidrogeológica del salar, se instalaron de 10 estaciones de monitoreo ubicadas en el Salar de Atacama. La ubicación de estas fue planteada con el fin de monitorear la evaporación proveniente del agua subterránea, buscando caracterizar los diferentes tipos de suelo y costras del salar. Cada estación de monitoreo cuenta con un lisímetro, un piezómetro, un pluviómetro y un sensor de temperatura.

Tanto lisímetros como piezómetros fueron equipados con sensores de presión Dipper APT de la marca SEBA Hydrometrie, los cuales registran el nivel de agua cada 6 horas. En el caso del pluviómetro se utilizó el modelo RG3-M de la marca HOBO, el cual cuenta además con un sensor de temperatura. El registro de la información para el pluviómetro se realiza sólo cuando ocurren eventos de precipitación con una precisión de 0,2 [mm], mientras que el sensor de temperatura registra a intervalos de 1 hora.

Adicionalmente se construyeron 13 piezómetros suplementarios. Cabe destacar que antes de la realización de este proyecto la DGA no contaba con monitoreo de las aguas subterráneas en la cuenca del Salar de Atacama.

Se realizó una prospección geofísica en el margen oriental del Salar de Atacama. La prospección contó de 100 estaciones geofísicas, 50 de ellas corresponden al método MT mientras que la otra mitad son TEM, situándose prácticamente coincidentes espacialmente, distribuyéndose en 5 perfiles, 4 transversales de aproximadamente 6 kilómetros (T1 a T3) y 8 kilómetros el T4, mientras que el perfil longitudinal (denominado L1) se extiende por más de 40 kilómetros., los que fueron interpretados en unidades hidrogeológicas con la información estratigráfica disponible de los pozos del sector.

A partir de lo anterior, es decir, la revisión de antecedentes, el análisis de las metodologías implementadas en otros trabajos y la revisión de estudios científicos, se presenta en la Tabla 12-1 un resumen de recomendaciones con el fin de mejorar y disminuir la incertidumbre en la estimación de recursos hídricos del salar.

Para la realización de un balance hídrico es necesario conocer los componentes del balance de forma independiente. Una de la mayor incertidumbre es estimar la recarga lateral al salar de Atacama. Esta ha sido calculada en los trabajos de Dalannais 1979.

Por otra parte, se recomienda probar alternativas de implementación de lisímetros y verificar las diferencias en evaporación según diseño y protocolo de instalación utilizado. Si se verifica que alternativas más económicas pueden ser igual de eficaces, esto puede significar ahorros considerables en tiempo y presupuesto que permitan la instalación de un mayor número de lisímetros.

Por último se recomienda, para una mejor estimación de la evaporación desde el agua subterránea utilizar lisímetros de carga constante. Esta modificación es posible realizarla a los lisímetros ya instalados en el Salar. Idealmente se debiese contar con un número de lisímetros de carga constante ubicados en un mismo lugar midiendo al mismo tiempo. Con esto es posible fijar la altura del nivel de agua dentro de los lisímetros de las mismas características y así determinar la curva de evaporación profundidad con mejor precisión. También se recomienda evaluar la factibilidad de implementar lisímetros de balanza, con los cuales se estima el volumen de agua evaporado en base a las variaciones tanto en el estanque como en la muestra de suelo. Esta metodología es de mayor precisión que la implementada en este proyecto donde el volumen evaporado se estima con sensores de presión.

Es necesario estudiar otros posibles mecanismos de recarga. “Ya que con los actuales el valor que se obtiene es cada vez más difícil de ser mejorado”, por ejemplo se recomienda estudiar la influencia de la granulometría en la evaporación, ya que si bien el análisis se ha centrado en las unidades geológicas que se encuentran en el salar, una misma unidad puede presentar distintas granulometrías según dónde se desee medir la evaporación.

Un aspecto importante que incide en la sustentabilidad en el tiempo de un sistema de estaciones de monitoreo en el Salar de Atacama es el involucramiento de la comunidad, debido al alto nivel de organización de las comunidades atacameñas, en que la protección

de los recursos hídricos es sin duda un tema de mayor importancia para ellas. Durante los trabajos realizados como parte de este estudio se mantuvo contacto con dirigentes, pero se recomienda para nuevos proyectos un mayor énfasis en la participación efectiva de estas organizaciones. La presencia de las comunidades se debe considerar como un punto a favor para el funcionamiento en el largo plazo de las estaciones de monitoreo. Para aquello se recomienda entregar la mayor información posible, indicando la ubicación de cada una de las estaciones, para qué sirven y cómo funcionan. Adicionalmente se puede colaborar en actividades de vigilancia para la protección de los sensores.

Tabla 12-1 Resumen recomendaciones

Elemento del balance hídrico	Instrumentos / mediciones	Proveniencia de la información	Recomendaciones
Descarga			
Evaporación desde lagunas	Evaporímetro de bandeja, densidad agua lagunas, área superficie lacustre (estacional)	PSAH SQM, PSA MEL y PSA RWL.	Obtención de las series de tiempo de evaporación del PSAH de SQM en formato tabla.
Evaporación agua subterránea	Lisímetros, domos, nivel freático	Lisímetros presente informe.	Complementar información lisímetros con medición de domo en otros puntos. Incluir lisímetros de carga constante y/o de balanza (Anexo 5). Profundidad nivel freático proveniente de PSAH de SQM digitalizado, series temporales. Mejorar la descripción de la geología superficial. Caracterización y monitoreo de nivel de la zona SW del Salar. Realizar análisis de imagen satelital utilizando la metodología de Kampf et al., 2006, con el fin de identificar las zonas de evaporación en distintas estaciones.
Evapotranspiración	Superficie vegas, vegetación.	Imagen satelital	Realizar NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada) a partir de imagen satelitales invierno/verano con el fin de determinar su variabilidad estacional.
Extracciones por bombeo	Caudal otorgado/disponible	Catastro	Digitalizar extracciones en pozos Mullay, Allana, Socaire, y otras extracciones.
Recarga			
Precipitación	Pluviómetros	PSAH	PSAH de SQM datos precipitación en tablas. Pluviómetros en parte alta de la cuenca para mejorar modelos precipitación-escorrentía.
Caudales	Aforos superficiales	PSAH	Datos en tabla, incluir otros
Recarga lateral	Parámetros hidráulicos, geometría acuífero	Danalais 1979, Estudios geofísica	Estudio geofísica margen norte, estudio margen norte. Pozos o punteras margen norte para cálculo de gradiente.
Recarga profunda			Realizar balance hídrico en sectores margen este, con recarga y descarga independiente con el fin de determinar diferencias.

Elemento del balance hídrico	Instrumentos / mediciones	Proveniencia de la información	Recomendaciones
Variación en volumen embalsado			
Volumen acuífero núcleo	Nivel freático, caudal bombeo	PSAH	Tablas, incluir más pozos de monitoreo. Datos de bombeo. Dada la heterogeneidad de los depósitos del salar, es muy difícil obtener una buena aproximación de la variación de volumen almacenado.

13. Referencias

- Aron, F., González, G., Veloso, E., & Cembrano, J. (2008). Architecture and style of compressive Neogene deformation in the eastern-southeastern border of the Salar de Atacama Basin (22°30'-24°15'S): A structural setting for the active volcanic arc of the Central Andes. Niza: 7th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG 2008), Extended Abstracts. Pág. 52-55.
- Arriagada, C. (2003). Rotations tectoniques et deformation de l'avant arc des Andes Centrales au cours du Cenozoique. Thesis. University of Rennes and University of Chile.
- Arriagada, C., Cobbolds, P. R., & Roperch, P. (2006). Salar de Atacama basin: A record of compressional tectonics in the central Andes since the mid-Cretaceous. *Tectonics*(25), TC1008, doi:10.1029/2004TC001770.
- Baker, M. C. (1977). Geochronology of upper Tertiary volcanic activity in the Andes of North Chile. *Geol. Rundsch*, 66(2), 455-465.
- Bevacqua, P. (1992). Geomorfología del Salar de Atacama y estratigrafía de su núcleo y delta, Segunda Región de Antofagasta, Chile. Antofagasta: Memoria para optar al título de geólogo, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte. 284 pág.
- Bowen, I. S. (1926). The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review*, 27(6), 779-787. (White, 1932; Dolan, 1984; Hays, 2003; Gribovszki, 2008; Lohedi, 2008 y Soylyu, 2012
- Blanco, N., Mpodozis, C., Gardeweg, M., & Jordan, T. (2000). Sedimentación del Mioceno Superior - Plioceno en la Cuenca del Salar de Atacama: Estratigrafía de la Formación Vilama, II Región de Antofagasta. Puerto Varas: Actas IX Congreso Geológico Chileno, Vol. 1, p. 446-447.

- Breitkreuz, C. (1995). The Late Permian Peine and Cas Formation at the eastern margin of the Salar de Atacama, Northern Chile: stratigraphy, volcanic facies, and tectonics. *Revista Geológica de Chile*, 22(1), 3-23.
- Brüggen, H. (1942). Geología de la Puna de San Pedro de Atacama y sus formaciones de areniscas y arcillas rojas Santiago. 2. pp.342-367. 2, pp. 342-367. Santiago, Chile.: Proceedings 2° Congreso Panamericano de Ingeniería de Minas y Geología.
- Brüggen, H. (1950). Fundamentos de la Geología Chilena. Santiago, Chile.: Instituto Geográfico Militar.
- Cembrano, J., Lavenu, A., & Yañez, G. (2007). Neotectonics. In T. Moreno, & W. Gibbons (Eds.), *The Geology of Chile* (pp. 231-395). Londres: The Geological Society of London.
- Cornellá, O., Salas, J., Aravena, R., Guzmán, E., & Guimerá, J. (2009). Hidrogeología Del Los Sistemas Lagunares Del Margen E Del Salar De Atacama. *Actas XII Congreso Geológico Chileno*, (p. Publicación Digital). Santiago.
- Dalannais, L. (1979). Hidrogeología del borde oriental del salar de Atacama. Antofagasta: Tesis de Grado, Universidad del Norte, Departamento de Geología, 157p.**
- DGA 1999, Evaluación de la Disponibilidad de Recursos Hídricos para constituir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al Salar de Atacama, II región, Minuta 60, 27p.
- DGA/DICTUC, 2008. Levantamiento Hidrogeológico para el Desarrollo de Nuevas Fuentes de Agua en Áreas prioritarias de la Zona Norte de Chile, Regiones XV, I, II y III. Santiago Diciembre 2008.
- DGA/GCF Ingenieros, 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, pp 277.
- Ding R., Kang S., Li F., Zhang Y., Tong L., Sun Q., Evaluating eddy covariance method by large-scale weighing lysimeter in a maize field of northwest China, *Agricultural Water Management*, Volume 98, Issue 1, 1 December 2010, Pages 87-95, ISSN 0378-3774, <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2010.08.001>.

- Díaz del Río, G., Bonilla, R., & Peralta, F. (1972). *Geología de superficie, sub-superficie y geoquímica del salar de Atacama*. Santiago: Informe CORFO, Departamento de Recursos Hidráulicos, 162p.
- Dingman, R. J. (1963). Cuadrángulo Tulo, Provincia de Antofagasta, Escala 1:50.000. Santiago, Chile: Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile N° 11, 35 p.
- Dingman, R. J. (1965). Cuadrángulo San Pedro de Atacama, Provincia de Antofagasta, Escala 1:50.000. Santiago, Chile: Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile N° 14, 29 p.
- EDRA. (1997). *Evaluación Hidrogeológica Acuífero Sector Norte Salar de ATacama*. Santiago: Compañía Minera Riochilex.
- Fahle, M., and O. Dietrich (2014), Estimation of evapotranspiration using diurnal groundwater level fluctuations: Comparison of different approaches with groundwater lysimeter data, *Water Resour. Res.*, 50, 273–286, doi:10.1002/2013WR014472.
- Fetter, C.W. 2001 *Applied Hydrogeology*. 4th Edition, Pearson, Higher Education, New Jersey, 598 pp.
- Flint, S., Turner, P., Jolley, E., & Hartley, A. (1993). Extensional tectonics in convergent margin basins: An example from the Salar de Atacama, Chilean Andes. *Geological Society of America Bulletin*(105), 603-617.
- Fitts, C., 2002. *Groundwater Science*. Elsevier Science Ltd., Kidlington, 450 p.
- Flumignan, D. L.; Faria, R. T. and Lena, B. P., 2012. Test of a microlysimeter for measurement of soil evaporation. *Eng. Agríc.* [online], vol.32, n.1, pp. 80-90. ISSN 0100-6916.
- 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*. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, 9 edición, pp 106.

- González, G., Cembrano, J., Aron, F., Veloso, E., & Shyu, B. (2009). Coeval compressional deformation and volcanism in the central Andes, case studies from northern Chile (23° S- 24° S). *Tectonics*, 28(TC6003), doi: 10.1029/2009TC002538.
- González, J., Niemeyer, H., Benedetto, J., & Brussa, E. (2007). The Ordovician Quebrada Grande Formation, Cordón de Lila (Antofagasta Region, northern Chile): stratigraphic and paleogeographic significance. *Revista Geológica de Chile*, 34(2), 277-290.
- Grilli, A. y Vidal, F., 1986. Evaporación desde salares: Metodología para evaluar los recursos hídricos renovables. Aplicación a las regiones I y II. *Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica*, Vol. 1, Año 1, No 2, 20 p.
- Guest, J. E. (1968). Banded pumice in a Chilean ignimbrite. *Geological Magazine*, 105(2), 177-184.
- Guest, J. E. (1969). Upper Tertiary ignimbrites in the Andean Cordillera of part of the Antofagasta province, northern Chile. *Geological Society American Bulletin*, 80(1), 337-362.
- Hernandez, F., 2012 Evaluación Experimental y Numérica de la Evaporación desde Aguas Subterráneas Someras. Aplicación a Suelos Salinos de la Cuenca del Salar de Huasco. Tesis de doctorado Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, 186 pp.
- Hoffstetter, B., Fuenzalida, H., & Cecioni, G. (1957). Chile in *Lexique Stratigraphique International*. París: Centre de Rech. Sci. Vol. 5 Fasc. 7. 444 pág.
- Hollingworth, S., & Rutland, R. (1968). Studies of andean uplift part I-post-cretaceous evolution of the San Bartolo Area, North Chile. *Geological Journal*, 6(1), 49-62.
- Johnson, E., Yáñez, J., Ortiz, C. and Muñoz, J. (2010) 'Evaporation from shallow groundwater in closed basins in the Chilean Altiplano', *Hydrological Sciences Journal*, 55: 4, 624 — 635. DOI: 10.1080/02626661003780458
- Jordan, R. E., Mpodozis, C., Muñoz, N., Blanco, N., Pananont, P., & Gardeweg, M. (2007). Cenozoic subsurface stratigraphy and structure of the Salar de Atacama Basin, northern Chile. *Journal of South American Earth Sciences*(23), 122-146.

- Jordan, T. E., Muñoz, N., Hein, M., Lowenstein, T., Godfrey, L., & Yu, J. (2002). Active faulting and folding without topographic expression in an evaporite in an evaporite basin, Chile. *Geological Society of America Bulletin*(114), 1406-1421.
- Kampf, S., 2002. Evaporation and land surface energy budget at the Salar de Atacama, northern Chile. MSc Thesis, University of Nevada, Reno, USA.
- Kampf S., Tyler S., Ortiz C., Muñoz J., Adkins P., 2005. Evaporation and land surface energy budget at the Salar de Atacama, Northern Chile. *Journal of Hydrology*; 310: 236–52
- Kampf S., Tyler S., 2006. Spatial characterization of evaporation and land surface energy fluxes at the Salar de Atacama, Northern Chile using ASTER image classification. *Advances in Water Resources* 29, pp 336-354.
- Kuhn, D. (2002). Fold and thrust belt structures and strike-slip faulting at the SE margin of the Salar de Atacama Basin, Chilean Andes. *Tectonics*, 21(4), 10.1029/2001TC901042.
- Lahsen, A. (1969). Geología del área comprendida entre El Tatio y los cerros de Ayquina. Santiago: Comité para el aprovechamiento de la Energía Geotérmica, CORFO.
- Lahsen, A., & Munizaga, F. (1979). Nuevos antecedentes cronológicos del volcanismo cenozoico superior de los Andes del norte de Chile, entre los 19°00' t los 22°30'. *Lat S. Congreso Geológico Chileno*, 1(2), F61-F86.
- Mardones, L., 1986, Características geológicas e Hidrogeológicas del Salar de Atacama. El litio, un nuevo recurso para Chile: Editorial Universitaria, pp. 181-216.
- Marinovic, N., & Lahsen, A. (1984). Hoja Calama : Region de Antofagasta, escala 1:250.000. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, N° 58, 140 pág.
- Marinovic, N., Díaz, F., Rámirez, C., & Travisany, V. (1976). Prospección y evaluación de elementos polimetálicos en la alta cordillera de la II Región. Reconocimiento geológico, escala 1:250.000. Santiago: Instituto de Investigaciones Geológicas.

- May, G., Hartley, A., Chong, G., Stuart, F., Turner, P., & Kape, S. (2005). Eocene to Pleistocene lithostratigraphy, chronostratigraphy and tectono-sedimentary evolution of the Calama Basin, northern Chile. *Revista Geológica de Chile*, 32(1), 33-58.
- Moraga, A., Chong, G., Fortt, M., & Henriquez, H. (1974). Estudio geológico del Salar de Atacama, provincia de Antofagasta. : Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín N° 29, 56 pág.
- Mpodozis, C., Arriagada, C., Basso, M., Roperch, P., Cobbold, P., & Reich, M. (2005). Late Mesozoic to Paleogene stratigraphy of the Salar de Atacama Basin, Antofagasta, northern Chile: implications for the tectonic evolution of the Central Andes. *Tectonophysics*(399), 125-154.
- Mpodozis, C., Blanco, N., Jordan, T., & Gardeweg, M. (2000). Estratigrafía y deformación del Cenozoico tardío en la región norte de la cuenca del Salar de Atacama: La zona de Vilama-Pampa Vizcachitas. Puerto Varas: Actas IX Congreso Geológico Chileno, Vol. 2, p. 598-603.
- Muñoz, N., Charrier, G. R., & Jordan, T. E. (2002). Interactions between basement and cover during the evolution of the Salar de Atacama Basin, northern Chile. *Revista Geológica de Chile*(29), 55-80.
- Muñoz JF, Ortiz C, Mardones L, De Vidts P. Funcionamiento hidrogeológico del acuífero del núcleo del Salar de Atacama, Chile. *Rev Ingen Hidrául México* 2004; XIX(3): 69–81.
- MINSAL. 1988. Hydrology, Salar de Atacama, Appendix V: Evaporation study. Report #: MT-07-88.
- Minera Escondida 2013, Informe Plan de Alerta Temprana (PAT) 2013.
- Naranjo, J., & Paskoff, R. (1982). Estratigrafía de las unidades sedimentarias Cenozoicas de la cuenca del Río Loa en la Pampa del Tamarugal, Región de Antofagasta, Chile. *Revista Geológica de Chile*, 13-14(1), 79-85.
- Naranjo, J., Ramírez, C., & Paskoff, R. (1994). Morphostratigraphic evolution of the northwestern margin of the Salar de Atacama basin (23°S-68°W). *Revista Geológica de Chile*, 21(1), 91-103.

- Pananont, P., Mpodozis, C., Blanco, N., Jordan, T. E., & Brown, L. D. (2004). Tectonic Evolution of the Northwest of the Salar de Atacama Basin, Northern Chile. *Tectonics*, TC6007, 10.1029/2003TC001595.
- Philip, J., 1957. Evaporation and moisture and heat fields in the soil. *J. Atmos. Sci.* 14, 354-366.
- Ramírez, C. (1979). Edades potasio-argón de rocas volcánicas cenozoicas en la zona de SAN Pedro de Atacama - El Tatio, Región de Antofagasta. Arica: II Congreso Geológico Chileno, Volumen 1, pág. F31-F41.
- Ramírez, C. (1979). Geología del Cuadrángulo Río Grande y sector suroriental del Cuadrángulo Barros Arana, Provincia El Loa, II Región. Santiago, Chile: Memoria para optar al título de geólogo, Dpto. de Geología, Fac. de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 139 pág.
- Ramírez, C., & Gardeweg, M. (1982). Hoja Toconao, Región de Antofagasta: Santiago. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile N° 58 (1:250.000), 121 pág.**
- Rutland, R., Guest, J., & Grasty, R. (1965). Isotopic age and Andean uplift. *Nature*(208), 667-678.
- Salas, J., Aravena, R., Guzmán, E., Cornellá, O., & Guimerá, J. (2009). Modelo De Evolución Hidroquímica E Isotópica De La Recarga Del Salar De Atacama: Soncor Y Aguas De Quelana. *Actas XII Congreso Geológico Chileno*, (p. Publicación Digital). Santiago.
- Sanchez, J. (1970). Geología de la Area Geotérmica de los Geysers del Tatio, Provincia de Antofagasta. Santiago, Chile: Memoria para optar al título de geólogo, Dpto. de Geología, Fac. de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 81 pág.
- SCM NX UNO de Peine. (2008). Capítulos Hidrogeología Estudio de Impacto Ambiental SCM NX UNO de Peine. Santiago: SCM NX UNO de Peine.
- SERNAGEOMIN. (2003). Mapa Geológico de Chile, Versión Digital. Santiago: Publicación Geológica Digital, N°4. Santiago, Servicio Nacional de Geología y Minería.

- SQM. (2005). EIA SQM S.A. Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama. Santiago: Estudio de Impacto Ambiental.
- SQM, 2013. Informe N°12 del Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico. Proyecto Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama. Informe de Monitoreo Semestral Actualizado a Diciembre 2012, preparado por Geohidrología Consultores, Santiago, Chile, pp 419.
- SQM/MEL/CMZ/SCL, 2003. Proyecto de Estudio y Monitoreo del Recurso Hídrico de la Cuenca del Salar de Atacama. Antofagasta, Mayo 2003, 309 pp.
- Stannard, D.I., and Weltz, M.A., 2006. Partitioning evapotranspiration in sparsely vegetated rangeland using a portable chamber: Water Resources Research, v. 42, W02413, doi:10.1029/2005WR004251, 13 pgs.
- Stannard, D. I., 1988, Use of a hemispherical chamber for measurement of evapotranspiration: U.S. Geological Survey Open-File Report 88-452, 18 p.
- Travisany, V. (1978). Mineralización cuprífera en areniscas de la Formación San Pedro en el Distrito San Bartolo. Tesis. Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- Youngman, K. (1984). Hydrothermal alteration and fluid-rock interaction in the El Tatio geothermal field, Antofagasta province, Chile. Auckland: MSc Thesis, University of Auckland, New Zeland.

ANEXOS

Anexo 1: Fichas revisión de antecedentes

1.1 CORFO (HARZA), 1977

TIPO DE DOCUMENTO	Estudio
TÍTULO	Proyecto CHI 535. Investigación de recursos hidráulicos en el Norte Grande. Hidrogeología de la región del Salar de Atacama
AUTOR	Harza Engineering Company International
FUENTE PUBLICACIÓN	CORFO, DGA
LUGAR	Santiago, Chile
FECHA	Mayo 1977
PÁGINAS	146
REFERENCIA	Harza Engineering Company International 1978, Desarrollo de los recursos de agua en el norte grande Chile. Proyecto CHI-69/535 CORFO-D.G.A-CCC-P.N.U.D. para las Naciones Unidas ONU, 146 pp.
REGIÓN	II Región
ÁREA DE ESTUDIO	Salar de Atacama
RELEVANCIA	
<p>El estudio busca determinar las fuentes de agua sustentable en el Norte grande. Realiza en primer lugar una descripción de la geología, geomorfología, unidades subsuperficie y tectónica de la cuenca del Salar de Atacama.</p> <p>Proporciona un modelo conceptual de la recarga y descarga del salar de atacama. Enfatizando en las zonas de recarga provenientes de la Cordillera de Los Andes y del norte del salar por aguas que se infiltran del rio San Pedro.</p> <p>El trabajo incluye la perforación de pozos en el margen este del salar. Se incluyen las pruebas de bombeo y determinación de parámetros hidráulicos de los acuíferos, curvas piezométricas y mapas de isoconcentraciones para Cl, sólidos disueltos, razón Mg/Ca, HCO₃/Cl, SO₄/Cl.</p> <p>Realizan un mapeo de la cuña salina, en base a los mapas hidroquímicos realizan una extrapolación la interfase para toda la extensión del Salar</p> <p>Se recomienda realizar un control de la cuña salina mediante inyección de agua o barreras impermeables con el fin de disminuir el riesgo de intrusión salina causada por el bombeo al Este de la cuña.</p> <p>Por último presenta en los anexos una piezometría salar, mapa de la ubicación de la cuña salina, mapas isoconcentraciones (Cl, sólidos disueltos, razón Mg/Ca, HCO₃/Cl, SO₄/Cl).</p> <p>Este estudio se utilizara en el presente proyecto para:</p> <ul style="list-style-type: none">• Comparación piezometría 1977 con actual• Posición de la cuña salina• Antecedentes de la estratigrafía de pozos• Definición de unidades hidrogeológicas• Parámetros hidráulicos margen oriental del salar	

1.2 DGA, 1986

TIPO DE DOCUMENTO	Artículo Científico
TÍTULO	Evaporación desde salares: Metodología para evaluar los recursos hídricos renovables. Aplicación a las regiones I y II.
AUTOR	Alejandro Grilli D-F., Fernando Vidal J
FUENTE PUBLICACIÓN	Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica
LUGAR	Santiago, Chile
FECHA	1986
PÁGINAS	20
REFERENCIA	Grilli, A. y Vidal, F., 1986, Evaporación desde salares: Metodología para evaluar los recursos hídricos renovables. Aplicación a las regiones I y II. Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, Vol. 1, Año 1, No 2, 20 p.
REGIÓN	I y II región
ÁREA DE ESTUDIO	Pampa del Tamarugal y Salar de Atacama
RELEVANCIA	
<p>El estudio analiza conceptualmente las ecuaciones y los fenómenos físico-químicos que controlan la evaporación. Compila experiencias de estimación de evaporación en Chile donde se destaca la estimación de efluentes del salar vía evaporación:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Utilizando tanques de evaporación tipo A por la DGA - Lisímetros: en Pampa del Tamarugal, Toro (1967) y Salar de Atacama, Mardones (1986) - Fraccionamiento isotópico: Grilli y Aravena (1985) Pampa del Tamarugal. - Estimación de afluentes al Salar - Balance hídrico de las cuencas aportantes <p>Además entrega dos curvas de evaporación para el Salar de Atacama según profundidad, diferenciando según costra de cloruros y sulfatos y limos.</p> <p>Presenta resultados de una estimación de la evaporación del salar de Atacama. Por medio del método de balance hídrico estima una evaporación de 4770 l/s. a partir de una estimación directa datos de evaporación medidos estima una evaporación de 5000 l/s, para un área de 2548 km².</p> <p>El balance hídrico es simplificado, no incluye diversos factores como evaporación en las lagunas y zonación superficial de evaporación en el salar.</p> <p>Este estudio se utilizara en el presente proyecto para:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Evaluación de distintos métodos de evaporación • Evaluación distintas metodologías de balance hídrico • Comparación estimación recurso hídrico. 	

1.3 RioChilex, 1999

TIPO DE DOCUMENTO	Estudio
TÍTULO	Evaluación hidrogeológica acuífero sector norte Salar de Atacama
AUTOR	Exploración y Desarrollo de Recursos de Agua S.A. (EDRA)
FUENTE PUBLICACIÓN	RioChilex
LUGAR	Santiago, Chile
FECHA	Enero 1999
PÁGINAS	103
REFERENCIA	Rio Chilex, 1999. Evaluación hidrogeológica acuífero sector norte Salar de Atacama informe realizado por Exploración y Desarrollo de Recursos de Agua, Santiago, Chile.
REGIÓN	II Región
ÁREA DE ESTUDIO	Salar de Atacama
RELEVANCIA	
<p>Realiza un estudio de la evaporación en el sector norte del Salar, entre San Pedro y Toconao. Clasifica la superficie en nueve distintos tipos de suelo donde se estima la evaporación. La tasa de evaporación las determina a partir de otros estudios. (CORFO MINSAL-DGA)</p> <p>Se realiza un estudio de evaporación que estima una evaporación de 3197 l/s para el área entre San Pedro y Toconao. Concluye que la descarga se equilibra con la recarga en un largo plazo para la zona norte.</p> <p>Concluye que la recarga potencial estimada es de 3000 l/s, el tamaño del acuífero y la desconexión del acuífero superior confinado del acuífero superior indica que una explotación de caudales de más de 900l/s es sustentable.</p> <p>Presenta mapa geológico escala 1:250.000. Describe en mayor detalle el cálculo de la evapotranspiración en el Anexo A que no se encuentra publicado.</p> <p>Este estudio se utilizara en el presente proyecto para:</p> <ul style="list-style-type: none">• Hidrogeología sector norte• Parámetros hidráulicos sector norte	

1.4 DGA, 1999 (Minuta 60)

TIPO DE DOCUMENTO	Minuta
TÍTULO	Evaluación de la Disponibilidad de Recursos Hídricos para constituir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al Salar de Atacama, II región.
AUTOR	
FUENTE PUBLICACIÓN	Dirección General de Aguas
LUGAR	
FECHA	Mayo, 1999
PÁGINAS	27
REFERENCIA	DGA 1999, Evaluación de la Disponibilidad de Recursos Hídricos para constituir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al Salar de Atacama, II región, Minuta 60, 27p.
REGIÓN	II Región
ÁREA DE ESTUDIO	Salar de Atacama
RELEVANCIA	
<p>La minuta presenta los resultados de la investigación tienen como objetivo determinar la disponibilidad de recursos hídricos para constituir derechos de agua en el Salar de Atacama. Se realiza un balance hídrico en la cuenca del Salar para régimen natural, separando la cuenca en seis zonas. El balance de hídrico considera la precipitación menos la evaporación potencial igual a la escorrentía y el flujo subterráneo. Balance simplificado, no considera la evaporación desde las aguas subterráneas entre otros. A partir de esto desprende que después del proceso evaporativo sobre las cuencas aportantes queda solamente el 3,94 m³/s de las precipitaciones para aportar a la recarga del Salar que constituye el caudal renovable del sistema.</p> <p>Indica que el sector de Tilopozo-Negrillar y Monturaqui es el único sector donde existe una sobreexplotación de las aguas.</p> <p>Concluye que la descarga por evaporación del salar corresponde a 5,32 m³/s. Por otro lado, en el escenario actual de uso, hay un caudal de escorrentía afluente al Salar de 2,54 m³/s, y no de 3,94 m³/s, como en el régimen "natural".</p> <p>Este estudio se utilizara en el presente proyecto para:</p> <ul style="list-style-type: none">• Comparación cálculo de evaporación• Se analizan subcuencas del salar autorizadas en esta minuta	

1.5 DGA, UCN e IRD, 1999

TIPO DE DOCUMENTO	Estudio
TÍTULO	Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III regiones –Chile
AUTOR	François Risacher, Hugo Alonso y Carlos Salazar
FUENTE PUBLICACIÓN	DGA, UCN e IRD
LUGAR	Santiago, Chile
FECHA	Enero, 1999
PÁGINAS	89
REFERENCIA	Risacher, F., Alonso, H. y Salazar, C. 1999. Geoquímica de aguas en cuencas cerradas, I, II, III Regiones, Chile. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Reporte Técnico S.I.T. Nº 51, Santiago, Chile
REGIÓN	I, II y III regiones
ÁREA DE ESTUDIO	Cuencas I, II y III región.
RELEVANCIA	
<p>El estudio define y describe los tipos y funcionamiento de los salares de la I, II y III región de Chile, poniendo énfasis en la evolución por evaporación hidroquímica de las aguas. Este estudio no incluye información nueva del Salar de Atacama sino que si no que cita el estudio de los mismos autores realizados el año 1996.</p> <p>El capítulo correspondiente al Salar de Atacama, presenta las composiciones principales de las principales aguas de aporte. Describe que todas las aguas de aporte siguen las vías sulfatadas. El aporte más concentrado sigue la vía cálcica; pero que podría estar contaminado por la cuña salina. Las vías sulfatadas son coherentes con la geología volcánica de la parte oriental de la cuenca y también con la composición sulfatada de las salmueras de la mitad oriental del núcleo. Al contrario, discrepan con la composición cálcica de las salmueras del sector occidental del núcleo. Esta composición cálcica refleja la litología, en gran parte sedimentaria, de la Cordillera de Domeyko. No se cuentan con muestras de aportes de la cordillera de Domeyko, pero a partir de análisis realizado por Moraga el 1974 en el margen este en lugar con litología similar a Domeyko, suponen son aguas parecidas a las que lixiviaron la Cordillera de Domeyko. Estas aguas pertenecen todas a la vía cálcica.</p> <p>Se destaca que el estudio realiza un levantamiento de datos de hidroquímica de gran número de cuencas. Por otro lado, carece de información sedimentológica, biológica o mineralógica de los salares.</p> <p>Este estudio se utilizara en el presente proyecto para:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Introducción hidroquímica 	

1.6 SQM, 2004

TIPO DE DOCUMENTO	Estudio
TÍTULO	Evaluación de Impacto Ambiental, Cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama
AUTOR	Igsa Consultores
FUENTE PUBLICACIÓN	SQM
LUGAR	Santiago, Chile
FECHA	2004
PÁGINAS	
REFERENCIA	Igsa Consultores/SQM, 2004. Evaluación de Impacto Ambiental, Cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama, Santiago, Chile.
REGIÓN	II Región
ÁREA DE ESTUDIO	Salar de Atacama
RELEVANCIA	
<p>El estudio corresponde a la Evaluación de Impacto Ambiental de SQM, Cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama. Donde el Capítulo 5: "Caracterización del área de influencia", trata temas relevantes para este estudio. Se destaca el subcapítulo 5.6: "Hidrología, hidrogeología y comportamiento hidráulico de las lagunas marginales del salar" y el subcapítulo 5.7: "Comportamiento físico y químico de las lagunas".</p> <p>En los subcapítulos 5.6 y 5.7 se busca caracterizar la hidrología e hidrogeología enfocada en establecer el funcionamiento hidráulico del sistema lacustre existente en el margen oriental del núcleo del Salar de Atacama. Se estudia específicamente los sistemas lagunares del margen este como lo son el Sistema Soncor compuesto por Burro Muerto, Puilar, Chaxas y Barros Negros; el sistema aguas de Quelana y el sistema Peine compuesto por las lagunas Salada, Interna y Saladita. Provee un balance hídrico para las lagunas Barros Negros y Aguas de Quelana.</p> <p>Se destaca que el estudio presenta una curva de evaporación según profundidad para el Sistema Aguas de Quelana. Por otro lado, no presenta un modelo conceptual del Sistema Peine.</p> <p>Este estudio se utilizara en el presente proyecto para:</p> <ul style="list-style-type: none">• Modelo conceptual del salar• Comparar curvas de evaporación v/s profundidad• Parámetros hidráulicos salar	

1.7 Cape-Idepe, 2004

TIPO DE DOCUMENTO	Estudio
TÍTULO	Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad
AUTOR	Cade-Idepe
FUENTE PUBLICACIÓN	Cade-Idepe
LUGAR	Santiago, Chile
FECHA	Diciembre 2004
PÁGINAS	84
REFERENCIA	CADE-IDEPE, 2004. <i>Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de agua según calidad, Cuenca del Salar de Atacama, Santiago:</i> Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, 84 p.
REGIÓN	II Región
ÁREA DE ESTUDIO	Cuenca Salar de Atacama
RELEVANCIA	
<p>Recopila información al respecto de las características geológicas del suelo, flora y fauna, y usos de suelo. Luego, analiza los afluentes Río San Pedro, Río Vilama, Quebrada Jerez, Quebrada Talabre, Quebrada Camar y Quebrada Peine. Realiza una revisión de la tendencia de parámetros de calidad de agua (conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, pH, RAS, cloruro, sulfato, boro, cobre, hierro, manganeso, molibdeno, aluminio y arsénico), en donde propone un programa de monitoreo.</p> <p>El trabajo incluye una base de datos integrada con los resultados de los análisis obtenidos. No se cuenta con dicha base de datos.</p> <p>Si bien se realiza una interpretación para cada uno de los parámetros físico químicos y elementos analizados, no presentan los gráficos con las series de tiempo.</p> <p>Este estudio se utilizara en el presente proyecto para:</p> <ul style="list-style-type: none">• Introducción hidroquímica	

1.8 NX1 EIA, 2008

TIPO DE DOCUMENTO	Estudio
TÍTULO	Evaluación de impacto ambiental. Planta de producción de sales de potasio.
AUTOR	CPH consultores y asociados.
FUENTE PUBLICACIÓN	NX 1 Peine.
LUGAR	Santiago
FECHA	Presentado en 2008.
PÁGINAS	
REFERENCIA	CPH Consultores / NX1 Peine, 2008. Evaluación de impacto ambiental. Planta de producción de sales de potasio. Santiago, Chile.
REGIÓN	II Región
ÁREA DE ESTUDIO	Salar de Atacama
RELEVANCIA	
<p>Corresponde el estudio de evaluación de impacto ambiental para la instalación de la planta de producción de sales de potasio ubicada en el margen oeste del Salar de Atacama Utiliza la evaporación medida por Mardones donde se presenta en la ubicación de los puntos de medición de evaporación.</p> <p>Determina que en los sectores periféricos del salar se evapora un total de 1855(l/s) incluyendo acuífero, vegas y lagunas. Además determina que el aporte neto al núcleo es de 3259 (l/s)</p> <p>En la Adena III, Antecedentes hidrogeológicos existencia zona de baja conductividad hidráulica Salar de Atacama, se destaca en el modelo conceptual propuesto:</p> <p>a) Flujo subterráneo y superficial, en parte, que alimenta las lagunas ubicadas en el margen oriental del Salar y proviene de las precipitaciones que caen sobre las zonas altas del norte y oriente de la cuenca.</p> <p>b) Existencia de una cuña salina que separa el acuífero de agua dulce, que se desarrolla en la zona marginal del Salar, de los acuíferos de salmuera del núcleo.</p> <p>c) Zona de baja permeabilidad, que determina la presencia y mantenimiento de humedales en las zonas de descarga del agua subterránea.</p> <p>Realiza una modelación numérica del salar, donde el modelo numérico de simulación hidrogeológica implementa los elementos presentes en el modelo conceptual actual del salar de Atacama. Menciona además que para la modelación de DICTUC (2004) la zona de baja conductividad hidráulica se representó como una condición de borde denominada "Wall" que consistió en una franja de cierto espesor y conductividad hidráulica sin utilizar celdas completas.</p> <p>En el modelo que se desarrolla en el presente estudio, la zona de baja conductividad hidráulica se representó mediante dos franjas, que abarcan los borde Norte, Este y Sur del salar con celdas completas con conductividades de 0,01 m/d y 5 m/d. A partir de lo anterior obtienen una representación de la desconexión hidráulica con un ajuste aceptable de niveles calculados y observados en la calibración permanente y posterior validación en transiente. Finalmente se destaca que se puede establecer que la zona de baja conductividad hidráulica se ha representado en dos modelos de simulación hidrogeológica desarrollados por diferentes proyectos, obteniéndose en ambos resultados satisfactorios en cuanto a la representación del comportamiento hidráulico del acuífero del Salar de Atacama.</p> <p>Este estudio se utilizara en el presente proyecto para:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Modelo conceptual del salar 	

1.9 DICTUC, 2009

TIPO DE DOCUMENTO	Estudio
TÍTULO	Levantamiento Hidrogeológico para el Desarrollo de Nuevas Fuentes de Agua en Áreas Prioritarias de la Zona Norte de Chile, Regiones XV, I, II y III.
AUTOR	DICTUC
FUENTE PUBLICACIÓN	Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC)
LUGAR	Santiago, Chile
FECHA	2009
PÁGINAS	
REFERENCIA	DICTUC 2008. Levantamiento Hidrogeológico para el Desarrollo de Nuevas Fuentes de Agua en Áreas Prioritarias de la Zona Norte de Chile, Regiones XV, I, II y III. Informe Final. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, Chile.
REGIÓN	XV, I, II y III Región
ÁREA DE ESTUDIO	I región, Salar del Huasco. II Región: Salares El Laco y Aguas Calientes 2, Laguna Tuyajto y Pampas Puntas Negras, Las Tecas y Colorada. III Región: Salares de Maricunga y Pedernales
RELEVANCIA	
<p>Corresponde a un estudio de levantamiento hidrogeológico para la zona norte, donde no se incluye el Salar de Atacama. El estudio cuenta con distintos volúmenes donde se destacan:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Informe Final Parte V: Hidrogeoquímica e Isotopía Regional del Altiplano de Chile. -Informe Final Parte VI: Implementación de Estaciones Meteorológicas. Descripción equipos utilizados y configuración. -Informe VII: Medición de la Evaporación mediante el Método del “Domo” <p>Comparación distintas técnicas de medición de evaporación. Incluye lisímetro de carga variable, lisímetro de carga constante y domo.</p> <p>Se destaca que el estudio compara la medición de evaporación del domo con el proyecto Collahuasi – GP Consultores 2008 y Geoaguas 2007. El proyecto Collahuasi-GP Consultores consideró la construcción, instalación y monitoreo de 12 lisímetros de carga constante con suelos inalterados representativos de 4 zonas del salar del Huasco. En cada una de las zonas definidas se simulaban tres posiciones para el nivel de saturación. El mes de enero del año 2007, la empresa Geoaguas Consultores instaló 3 lisímetros de carga variable en las cercanías de la Laguna Tuyajto, ubicada en el sector oeste de la cuenca homónima. El estudio concluye que la metodología medición evaporación con “domo”. Provee los resultados de la medición de evaporación de 49 puntos en el salar del Huasco, Laguna Tuyajtu, Salar de El Laco, Salar de Aguas Calientes, Salar de Pedernales y Salar de Maricunga. Indica que los resultados efectuados con el domo entregan valores comparables con los registros realizados mediante metodologías alternativas como lisímetros y microlisímetros.</p> <p>Determina la curva evaporación/profundidad napa, donde indica que la curva Morel-Seytoux para el ajuste de la evaporación en función de la profundidad de la napa es la que presenta el mejor grado de ajuste con los datos normalizados de las mediciones en terreno.</p> <p>Este estudio se utilizara en el presente proyecto para:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar la metodología de medición de evaporación con el domo y comparación con otros instrumentos que miden evaporación 	

1.10 GCF, 2010

TIPO DE DOCUMENTO	Estudio
TÍTULO	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.
AUTOR	GFC Ingenieros, Guillermo Cabrera
FUENTE PUBLICACIÓN	DGA
LUGAR	Santiago, Chile
FECHA	Enero 2010
PÁGINAS	277
REFERENCIA	GFC Ingenieros, 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, 277pp.
REGIÓN	II Región
ÁREA DE ESTUDIO	Cuenca Salar de Atacama
RELEVANCIA	
<p>Este estudio tiene como objetivo la reevaluación de la información básica generada en la Minuta N°60, utilizando la información hidrológica más reciente. Además de esto, busca delimitar zonas con sistemas ambientalmente sensibles en el Salar de Atacama.</p> <p>Se destacan los resultados del estudio:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Delimita subcuencas de la cuenca del Salar de Atacama a partir de métodos SIG, con el cual modifica las subcuencas presentadas en la Minuta 60 de la DGA. - Identifica las zonas ambientales sensibles (vegas, bofedales y cultivos). - Realiza un estudio hidrológico donde genera relaciones de la precipitación, la evaporación y la temperatura versus la altura a nivel mensual, las que constituyen la base para la aplicación de los balances hídricos a nivel de cuenca y de subcuencas. - Corrige la zonación superficial del salar propuesta por Mardones. La mayor corrección está dada por la superficie de las vegas que han sido analizadas en el presente informe. Corresponde a una corrección gráfica donde menciona que el error puede haber sido propagado en las distintas citaciones al trabajo de Mardones, que finalmente afecta el área de estas zonas. No realiza descripción de la costra. Inspecciona las diferencias de nivel freático en las zonas de medición de Mardones, contrastándola con los resultados obtenidos por Mardones en 1983-1984. De acuerdo a los valores entregados el nivel varía aproximadamente entre 0,2 y 1 m. A partir de lo anterior estima una descarga por evaporación del salar de 5,84m³/s, pero dada la incertidumbre de la cifra propone utilizar el promedio entre esta y la propuesta por Mardones, quedando así la descarga por evaporación en 5,6 m³/s. <p>Este estudio se utilizara en el presente proyecto para:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se utilizaran las sub-cuencas definidas en este trabajo • Se utilizarán las áreas re-definidas a partir de Mardones 1986, con el fin de comparar con las definidas en este proyecto. • Se analizara la metodología empleada para el balance hídrico 	

1.11 DGA, 2012 (PAT)

TIPO DE DOCUMENTO	Informe técnico
TÍTULO	Análisis Preliminar de Planes de Alerta Temprana con Condicionamiento de Derechos
AUTOR	División de Estudios y Planificación SDT N° 335
FUENTE PUBLICACIÓN	Dirección General de Aguas
LUGAR	Santiago, Chile
FECHA	Diciembre 2013
PÁGINAS	54
REFERENCIA	DGA 2013, Análisis Preliminar de Planes de Alerta Temprana con Condicionamiento de Derechos, Dirección General de Aguas, Santiago, Chile, 54 p.
REGIÓN	II Región
ÁREA DE ESTUDIO	Pampa Puno, Elvira, Los Morros, Salar de Ollagüe, Monturaqui-Negrillar-Tilopozo y Calama.
RELEVANCIA	
<p>El objetivo del estudio es recopilar información disponible de los Planes de Alerta Temprana (PAT) que condicionan derechos para realizar un análisis y diagnóstico preliminar del estado actual de ellos.</p> <p>El estudio inspecciona los seis PAT aprobados por la DGA que condicionan los derechos de aprovechamiento otorgados (PATs asociados a derecho). Estos se ubican en la Región de Antofagasta: Pampa Puno, Elvira, Los Morros, Salar de Ollagüe, Monturaqui- Negrillar-Tilopozo y Calama.</p> <p>El PAT de interés corresponde al del acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo, ubicado al sur este del Salar de Atacama:</p> <p>Se han constituidos derechos de aguas subterráneas y se establece que podrán ser utilizados si:</p> <ol style="list-style-type: none">i. Los impactos generados por el bombeo y el post-bombeo producto de la explotación no generen una disminución más allá de 25 cm en el nivel de agua en el sector Tilopozo.ii. La explotación no genere una disminución de más del 6% en el flujo pasante a través del acuífero y que descarga en el sector de Tilopozo.iii. No podrá explotarse del acuífero un caudal medio mensual superior a 1.800 L/s. <p>Además el PAT cuenta con cuatro fases:</p> <ol style="list-style-type: none">i. Monitoreo del comportamiento del acuífero y áreas sensiblesii. Predicción y evaluación de impactoiii. Medidas de correccióniv. Revisión y actualización periódica del PAT <p>Se presentan las variables de monitoreo, que incluyen: nivel de agua, extracciones de agua (bombeo), calidad química aguas superficiales y subterráneas, cuña salina, conos de depresión, nivel lagunas y humedales y área de lagunas y vegas. No se entregan registros de los datos de monitoreo.</p> <p>Este estudio se utilizara en el presente proyecto para:</p> <ul style="list-style-type: none">• Modelo conceptual acuífero Negrillar-Monturaqui y datos de monitoreo.	

1.12 SCL, 2009 Rockwood lithium

TIPO DE DOCUMENTO	Informe
TÍTULO	Evaluación de Impacto Ambiental, Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama
AUTOR	Sociedad Chilena del Litio Ltda. / GCF consultores / SGA / Gestión Ambiental consultores
FUENTE PUBLICACIÓN	
LUGAR	Santiago, Chile
FECHA	Mayo 2009
PÁGINAS	
REFERENCIA	Evaluación de Impacto Ambiental
REGIÓN	II Región
ÁREA DE ESTUDIO	Salar de Atacama
RELEVANCIA	
<p>El informe corresponde a la evaluación de impacto ambiental. Se destaca el Capítulo 5 Línea base ambiental con los anexos: Anexo 5.1. Análisis de la Variación en la Superficie de las Lagunas Salada, Saladita, Interna, La punta y la Brava, Anexo 5.2. Modelo de Simulación Flujo Sistema Salar de Atacama, Anexo 5.3 corresponde a Hidrología e Hidrogeología de la zona.</p> <p>Describe conceptualmente y numéricamente el funcionamiento hidrogeológico del Salar.</p> <p>Este estudio se utilizara en el presente proyecto para:</p> <ul style="list-style-type: none">• Modelo conceptual del salar• Datos de monitoreo de nivel y estaciones meteorológicas	

1.13 DGA, 2013

TIPO DE DOCUMENTO	Informe Técnico
TÍTULO	Análisis de la Oferta Hídrica del Salar de Atacama
AUTOR	División de Estudios y Planificación: Michael Finger, Miguel Ángel Caro H, Andrea Osses Vargas y Adrián Lillo Zenteno.
FUENTE PUBLICACIÓN	Dirección General de Aguas
LUGAR	Santiago, Chile
FECHA	Abril, 2013
PÁGINAS	40
REFERENCIA	DGA 2013, Análisis de la Oferta Hídrica del Salar de Atacama, Dirección General de Aguas, Santiago, Chile, 40 p.
REGIÓN	II Región
ÁREA DE ESTUDIO	Salar de Atacama
RELEVANCIA	
<p>El informe corresponde a una recopilación de antecedentes y un análisis crítico de las metodologías empleadas para el cálculo de la descarga del Salar de Atacama. El estudio actualiza el balance hídrico del salar y presenta mapa de zonas de evaporación modificado de Mardones, estimando la evaporación a partir de estas nuevas zonas.</p> <p>El modelo conceptual no considera las estaciones meteorológicas presentes en los planes de seguimiento ambiental (ej: Estación Chaxa y Estación Salar del PSAH SQM), que podrían contribuir a mejorar la estimación de precipitación.</p> <p>Estima un valor de la evaporación neta de 5,178 m³/s. a partir del caudal pasante al salar.</p> <p>Este estudio se utilizara en el presente proyecto para:</p> <ul style="list-style-type: none">• Discusión metodologías empleadas para el balance hidrico.	

1.14 Mardones, 1986

TIPO DE DOCUMENTO	Estudio (Capítulo, libro)
TÍTULO	Características geológicas e Hidrogeológicas del Salar de Atacama
AUTOR	Mardones, L.
FUENTE PUBLICACIÓN	Editorial Universitaria
LUGAR	Santiago, Chile
FECHA	1986
PÁGINAS	181-216
REFERENCIA	Mardones, L. 1986, Características geológicas e Hidrogeológicas del Salar de Atacama. El litio, un nuevo recurso para Chile: Editorial Universitaria, 1986, pp. 181-216.
REGIÓN	II Región
ÁREA DE ESTUDIO	Salar Atacama
RELEVANCIA	
<p>El estudio realizado por Mardones 1986, presenta los resultados de la campaña de medición de la evaporación del año 1983 a 1984. La evaporación es medida en siete ubicaciones en distintas áreas del salar a través de lisímetros. En alguno de estos puntos realiza hasta cinco mediciones en distintas épocas del año y/o con distinto nivel freático. A partir de estos puntos de medición Mardones define 15 áreas de evaporación que dependen del tipo de costra superficial, evaporación medida y nivel freático. Asigna a cada una de estas áreas una tasa de evaporación. La ubicación exacta de estos puntos no se presenta.</p> <p>Mardones concluye que la evaporación depende de cuatro factores:</p> <ul style="list-style-type: none"> - la densidad del agua - la profundidad del nivel freático - tipo de sedimento - tipo costra superficial <p>Concluye que la evaporación ocurre principalmente en la zona marginal y especialmente en la interface entre el agua proveniente del este de la y la del salar en la cuña salina.</p> <p>Otros aspectos del trabajo:</p> <ul style="list-style-type: none"> - No presenta metodología de medición de evaporación directa ni descripción de lisímetros utilizados. - Descripción de la superficie del salar pobre. Solo describe tres tipos de superficies: Material detrítico, eflorescencia y costras salinas, y costra Núcleo de Cloruros. Incorpora el área del delta del rio San Pedro al Núcleo del Salar, cuando otros trabajos lo consideran fuera de estos (Ej: Ramírez y Gardeweg, 1982, Bevaqua 1991 y Muñoz, 2004). - Realiza una extrapolación discreta del nivel de agua para determinar la evaporación desde el acuífero. <p>Este estudio se utilizara en el presente proyecto para:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Analizar mecanismos de evaporación • Analizar metodología del cálculo de la descarga por evaporación del salar • Comparación con las zonas de evaporación de este estudio v/s otros 	

1.15 Bevacqua, 1991

TIPO DE DOCUMENTO	Estudio-Tesis
TÍTULO	Geomorfología del Salar de Atacama y estratigrafía de su núcleo y delta, Segunda Región de Antofagasta
AUTOR	Bevacqua, P.
FUENTE PUBLICACIÓN	Universidad Católica del Norte
LUGAR	Antofagasta, Chile
FECHA	1991
PÁGINAS	284
REFERENCIA	Bevacqua, P. 1991. Geomorfología del Salar de Atacama y estratigrafía de su núcleo y delta, Segunda Región de Antofagasta, Chile. Memoria de Título (Inédito), Univesidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, 284 p. Antofagasta.
REGIÓN	II Región
ÁREA DE ESTUDIO	Salar de Atacama
RELEVANCIA	
<p>Realiza una descripción geológica de las costras superficiales del salar de Atacama. Las descripciones realizadas son acabadas y detallistas las que son presentadas en un mapa. Además compara las definiciones del estudio con los estudios anteriores. No realiza análisis hidroquímicos ni geoquímicos.</p> <p>Este estudio se utilizara en el presente proyecto para:</p> <ul style="list-style-type: none">• Caracterización geológica superficial de los depósitos evaporíticos del salar.	

1.16 Aravena, 1999

TIPO DE DOCUMENTO	Artículo Científico
TÍTULO	Isotopic composition and origin of the precipitation in Northern Chile
AUTOR	Aravena R., Suzuki O., Peña H., Pollastri A. Fuenzalida H. y Grilli A.
FUENTE PUBLICACIÓN	Applied Geochemistry
LUGAR	
FECHA	1999
PÁGINAS	12
REFERENCIA	Aravena R.; Suzuki O.; Peña H.; Pollastri A.; Fuenzalida H.; Grilli, A. 1999. Isotopic composition and origin of the precipitation in Northern Chile. Applied Geochemistry 14: 411-422
REGIÓN	I y II región
ÁREA DE ESTUDIO	I y II Región
RELEVANCIA	
<p>El artículo presenta los resultados de un estudio de la composición isotópica oxígeno y deuterio de la precipitación en la I y II región.</p> <p>Concluye que los valores empobrecidos en O18 en las zonas de mayor altitud del altiplano se relacionan con procesos que afectan las masas de aire originadas en el océano Atlántico, al otro lado de la cuenca Amazonas, donde ascienden debido a la cordillera de los Andes y precipitan en el altiplano. Además se postula una segunda fuente de humedad asociada a masas de aire provenientes de pacífico que contribuyen con precipitaciones enriquecidas en O18 para las zonas de menor altitud. Entrega una curva meteórica para el norte de Chile.</p> <p>Este estudio se utilizara en el presente proyecto para:</p> <ul style="list-style-type: none">• Introducción capítulo hidrología	

1.17 Bobst, 2001

TIPO DE DOCUMENTO	Artículo Científico
TÍTULO	A 106ka paleoclimate record from drill core of the Salar de Atacama, northern Chile.
AUTOR	Andrew Bobst, Tim Lowenstein, Teresa Jordan, Lenda Godfrey, Teh-Lung Ku y Shangde Lou.
FUENTE PUBLICACIÓN	Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology
LUGAR	Binghamton, Estados Unidos.
FECHA	Mayo 2001
PÁGINAS	22
REFERENCIA	Bobst, A.L., Lowenstein, T.K., Jordan, T.E., Godfrey, L.V., Hein, M.C., Ku, T.-L., Luo, S., 2001. A 106 ka paleoclimate record from drill core of the Salar de Atacama, northern Chile. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 173, 21–42
REGIÓN	II Región
ÁREA DE ESTUDIO	Salar de Atacama
RELEVANCIA	
<p>El estudio consta de la realización de dataciones radiométricas en un pozo ubicado en el núcleo del salar de Atacama. Determina una edad de 106 ka para evaporitas ubicadas a 100 m de profundidad. A partir de lo anterior, calcula tasas de depositación e identifica períodos más húmedos los que son correlacionados con distintos estudios paleoclimáticos.</p> <p>Como parte de la metodología empleada, el estudio describe distintos tipos de costaras y depósitos superficiales. Provee un mapa modificado de Bevacqua 1991 con la zonación superficial de los depósitos.</p> <p>Es importante desatacar que el trabajo considera un solo pozo ubicado en el salar al oeste de la falla del salar. Trabajos posteriores realizan una correlación en pozos profundos al lado este y oeste de la falla para comparar las tasas de depositación (Lowenstein 2003).</p> <p>Este estudio se utilizara en el presente proyecto para:</p> <ul style="list-style-type: none">• Caracterización geología del núcleo del salar	

1.18 Tejada, 2003.

TIPO DE DOCUMENTO	Artículo Científico
TÍTULO	Numerical Modeling of Saline Intrusion in Salar de Atacama
AUTOR	Ignacio Tejada; Rodrigo Cienfuegos; José F. Muñoz; and Mario Durán ⁴
FUENTE PUBLICACIÓN	Journal of Hydrologic Engineering
LUGAR	Santiago, Chile.
FECHA	Enero-Febrero 2003
PÁGINAS	10
REFERENCIA	Tejada, I., Cienfuegos, R., Muñoz, J. y Durán, M. 2003. Numerical modeling of saline intrusion in Salar de Atacama. Journal of Hydrologic Engineering, Jan/Feb, 25-34.
REGIÓN	II Región
ÁREA DE ESTUDIO	Salar Atacama
RELEVANCIA	
<p>Presenta los resultados de modelaciones numéricas de aguas subterráneas que incluyen el transporte de solutos en el Salar de Atacama. La modelación es realizada en dos dimensiones y considera densidad variable. La evaporación es considerada en función de la profundidad del nivel freático, donde presenta tres distintas ecuaciones que dependen del tipo de costra superficial. Concluye que el estudio deja en evidencia que la evaporación en cuencas endorreicas tiene un efecto considerable en el flujo de agua subterráneo así como en la distribución de los sólidos disueltos del acuífero.</p> <p>Este estudio se utilizara en el presente proyecto para:</p> <ul style="list-style-type: none">• Evaluación software de densidad variable	

1.19 Muñoz, 2004

TIPO DE DOCUMENTO	Artículo Científico
TÍTULO	Funcionamiento hidrogeológico del acuífero del núcleo del Salar de Atacama, Chile
AUTOR	José Muñoz, Cristián Ortiz y Leonardo Mardones
FUENTE PUBLICACIÓN	Ingeniería hidráulica en México
LUGAR	Santiago, Chile
FECHA	Julio 2004
PÁGINAS	12
REFERENCIA	Muñoz J. F. y Ortiz C.A., 2004. Funcionamiento hidrogeológico del acuífero del núcleo del Salar de Atacama, Chile. Ingeniería hidráulica en México, XIX (3), 69-81.
REGIÓN	II Región
ÁREA DE ESTUDIO	Salar Atacama
RELEVANCIA	
<p>El presente artículo estudia el comportamiento hidrogeológico del núcleo del Salar de Atacama realizando un modelo numérico realizado en Modflow. Concluye que las principales zonas de descarga por evaporación se encuentran en la zona marginal del Salar. Observa además que la evaporación de las zonas marginales del núcleo “amortigua” las variaciones naturales de la recarga por flujo lateral subterráneo, estableciéndose una recarga neta relativamente constante. Proporciona valores de recarga y descarga al núcleo del salar dividido en 10 cuencas aportantes. Destaca que en la zona norte, el flujo subterráneo y superficial no recarga el núcleo del salar ya que es completamente consumido por la evaporación. Por otro lado, el margen este aporta a la recarga del núcleo. La evaporación del acuífero del salar corresponde a 5,582 m³/s</p> <p>Otros aspectos relevantes:</p> <p>El modelo numérico que incorpora 27 años de datos de precipitación. Agrupa las mediciones realizadas por Mardones 1984 en cuatro zonas y las relaciona con a la curva de descarga por evaporación según profundidad de Phillips (1957). La curva de descarga de evaporación es según profundidad es incorporada al modelo numérico. El modelo numérico fue calibrado a partir de 87 pozos de observación. Las zonas de evaporación y los valores de evaporación viene dados por el trabajo de Mardones, que conlleva a arrastrar la incertidumbre propia del trabajo de Mardones.</p> <p>Este estudio se utilizara en el presente proyecto para:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Metodología de la estimación de la descarga por evaporación • Curva de la evaporación v/s profundidad • Zonas definidas de evaporación 	

1.20 Kampf, 2005

TIPO DE DOCUMENTO	Artículo Científico
TÍTULO	Evaporation and land surface energy budget at the Salar de Atacama, Northern Chile
AUTOR	Stephanie Kampf.
FUENTE PUBLICACIÓN	Journal of Hydrology
LUGAR	
FECHA	Enero, 2005
PÁGINAS	17
REFERENCIA	Kampf SK, Tyler SW, Ortiz C, Muñoz JF, Adkins P, 2005. Evaporation and land surface energy budget at the Salar de Atacama, Northern Chile. Journal of Hydrology 310, pp. 236-252.
REGIÓN	II Región
ÁREA DE ESTUDIO	Salar Atacama
RELEVANCIA	
<p>Estima la evaporación utilizando balances de energía en distintos tipos de costras o superficies en el Salar de Atacama. Realiza mediciones con el método Eddy covariance.</p> <p>Los resultados muestran que no detecta evaporación en el núcleo de halita en zonas donde el nivel freático se encuentra a más de 1 m de la superficie.</p> <p>Las tasas de evaporación obtenidas en costras salinas no rugosas en la zona marginal del salar varían entre 0,1 a 1,1 mm/d. Para la zona vegetación, los rango medidos fueron entre 0,4 y 2,8 mm/d.</p> <p>Este estudio se utilizara en el presente proyecto para:</p> <ul style="list-style-type: none">• Delimitación zonas de evaporación• Discusión de instrumentos para medir evaporación	

1.21 Kampf, 2006

TIPO DE DOCUMENTO	Artículo Científico
TÍTULO	Spatial characterization of land surface energy fluxes and uncertainty estimation at the Salar de Atacama, Northern Chile.
AUTOR	S. Kampf y S. Tyler
FUENTE PUBLICACIÓN	Advances in Water Resources
LUGAR	
FECHA	2006
PÁGINAS	19
REFERENCIA	Kampf S., Tyler S., 2006. Spatial characterization of evaporation and land surface energy fluxes at the Salar de Atacama, Northern Chile using ASTER image classification. <i>Advances in Water Resources</i> 29, pp 336-354
REGIÓN	II Región
ÁREA DE ESTUDIO	Salar de Atacama
RELEVANCIA	
<p>El estudio se basa en la utilización de imágenes ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer) para estimar la distribución espacial del flujo de energía y evaporación en el Salar de Atacama. Entrega una estimación de la descarga por evaporación. Concluye que a partir de imágenes ASTER es posible obtener buenos resultados para identificar la distribución espacial de los flujos de energía superficiales, pero no es suficiente como para predecir el flujo latente de calor, por lo que no es preciso para estimar la evaporación. Presenta la imagen con distribución de evaporación con una resolución acorde a la imagen satelital, lo que provee más detalle con respecto a otros estudios.</p> <p>Este estudio se utilizara en el presente proyecto para:</p> <ul style="list-style-type: none">• Delimitación zonas de evaporación• Discusión de instrumentos para medir evaporación	

1.22 Salas, 2009_A

TIPO DE DOCUMENTO	Artículo Científico
TÍTULO	Modelo de evaporación hidroquímica e isotópica del Salar de Atacama: Soncor y Aguas de Quelana.
AUTOR	Salas, J, Aravena, R., Guzmán, E., Cornellà, O., Guimerà, J., Tore, C., von Igel, W., Fock, A., Henríquez, A.
FUENTE PUBLICACIÓN	XII Congreso Geológico Chileno
LUGAR	Santiago
FECHA	Noviembre 2009
PÁGINAS	4
REFERENCIA	Salas, J, Aravena, R., Guzmán, E., Cornellà, O., Guimerà, J., Tore, C., von Igel, W., Fock, A., Henríquez, A. 2009. Modelo de evaporación hidroquímica e isotópica del Salar de Atacama: Soncor y Aguas de Quelana. XII Congreso Geológico Chileno, Santiago, 22-26 Noviembre, 4p
REGIÓN	II Región
ÁREA DE ESTUDIO	Salar de Atacama
RELEVANCIA	
<p>Propone un modelo conceptual para el sistema Soncor compuesto por el Canal del Burro Muerto, las lagunas Puilar, Chaxa y Barros Negros y para el sistema Aguas de Quelana.</p> <p>Concluye que durante la época invernal, el caudal de descarga en la zona de la cuña aumenta. Este incremento de la tasa de flujo lleva asociado la inundación de grandes extensiones al W de la posición de la cuña (alimentando la laguna Puilar). Estas aguas se equilibran con las condiciones ambientales de presión y temperatura, experimentando procesos evaporativo. A partir de estas zonas de inundación estacionales, las aguas desbordadas y evaporadas siguen diferentes vías advectivas, según el dominio hidrológico particular de cada sector. Alimentando superficial y subsuperficialmente las lagunas permanentes del sistema Soncor (Canal del Burro Muerto, Lagunas Chaxa y Barros Negros).</p> <p>Por otro lado, el estudio provee de un modelo conceptual basado en una caracterización hidroquímica de las aguas. No provee una estimación cuantitativa de la recarga y descarga.</p> <p>Este estudio se utilizara en el presente proyecto para:</p> <ul style="list-style-type: none">• Modelo conceptual sistema Soncor	

1.23 Cornella, 2009

TIPO DE DOCUMENTO	Artículo Científico
TÍTULO	Hidrogeología de los sistemas lagunares del margen E del Salar de Atacama.
AUTOR	Cornellà, O., Salas, J, Aravena, R., Guzmán, E., Guimerà, J., Tore, C., Von Igel, W., Henríquez, A., Fock, A.
FUENTE PUBLICACIÓN	XII Congreso Geológico Chileno.
LUGAR	Santiago, Chile
FECHA	Noviembre 2009
PÁGINAS	4
REFERENCIA	Cornellà, O., Salas, J, Aravena, R., Guzmán, E., Guimerà, J., Tore, C., Von Igel, W., Henríquez, A., Fock, A., 2009. Hidrogeologia Del Los Sistemas Lagunares Del Margen E Del Salar De Atacama. Santiago, Actas XII Congreso Geológico Chileno.
REGIÓN	II Región
ÁREA DE ESTUDIO	Sistema lagunares margen este Salar de Atacama
RELEVANCIA	
<p>Realiza una breve descripción de la geología del Salar de Atacama. Enfatiza que los factores que más influyen en la recarga del sistema acuífero del Salar son pluviometría, fluvimetría y evaporación.</p> <p>Propone un modelo conceptual para el origen y tipos de lagunas del margen E del Salar. Las que las describe a partir de cómo se forman. Chaxa y Barros Negros, son lagunas de carácter permanente y gran extensión (varias hectáreas), alimentadas por el canal Burro Muerto. Por otro lado, Puilar, Aguas de Quelana, Peine y Tilopozo son cuerpos lacustres de menor extensión, originados por la presencia de afloramientos de agua subterránea ligados a la dinámica de una cuña salina. Esta cuña salina responde a la inmiscibilidad de dos soluciones con densidades contrastadas. Las aguas de recarga procedentes del margen E se caracterizan por densidades del orden de 1.00 gr/cm³, mientras que las salmueras del núcleo salino presentan densidades del orden de 1.23 g/cm³. Como consecuencia, se genera un cordón lagunar a lo largo del margen E. En esta zona, el nivel de agua subterránea es prácticamente coincidente con la cota topográfica, aflorando en ocasiones. Este hecho es la causa de que a lo largo del margen E se concentre la mayor tasa de evaporación superficial y freática de todo el Salar (0.7 mm/d). Como consecuencia, las aguas de recarga aumentan su salinidad y densidad, infiltrándose y mezclándose con las salmueras del núcleo salino. No obstante, el estudio no complementa sus resultados con análisis hidroquímicos.</p> <p>Este estudio se utilizara en el presente proyecto para:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Modelo conceptual sistema Soncor 	

1.24 Salas, 2010

TIPO DE DOCUMENTO	Artículo Científico
TÍTULO	Hidrogeología del sistema lagunar del margen este del Salar de Atacama (Chile).
AUTOR	J. Salas, J. Guimerà, O. Cornellà, R. Aravena, E. Guzmán, C. Tore, W. von Igel y R. Moreno
FUENTE PUBLICACIÓN	Boletín Geológico y Minero
LUGAR	Santiago, Chile
FECHA	2010
PÁGINAS	16
REFERENCIA	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 ISSN: 0366-0176
REGIÓN	II Región
ÁREA DE ESTUDIO	Salar de Atacama
RELEVANCIA	
<p>El estudio propone un modelo conceptual hidrogeológico del sistema lagunar del margen oriental del Salar de Atacama (Chile), integrando datos climáticos, geológicos y geomorfológicos, piezométricos, químicos e isotópicos.</p> <p>Interpreta que la presencia y mantenimiento de humedales en las zonas de descarga es debido a la presencia de niveles de baja permeabilidad en el subsuelo.</p> <p>Este estudio se utilizara en el presente proyecto para:</p> <ul style="list-style-type: none">• Modelo conceptual sistema Soncor• Piezometría margen este Salar de Atacama	

Anexo 2: Base de datos estratigrafía

Se adjunta archivos Excel y PDF en el CD del informe.

Anexo 3: Informe trabajos geofísicos

Se adjunta archivos PDF en el CD del informe

Anexo 4: Base datos hidroquímica

Se adjunta archivo Excel en el CD del informe.

Anexo 5: Instrumentos de medición de evaporación agua subterránea

Existen diversas metodologías que permiten medir y estimar la evaporación desde napas freáticas, tanto en forma puntual como sobre superficies. A continuación se describen algunos de los métodos e instrumentos utilizados para el cálculo de la evaporación desde el agua subterránea.

LISÍMETROS

Los lisímetros han sido considerados históricamente como una herramienta adecuada y confiable para su determinación, sin embargo esta aproximación implica la alteración de los suelos y la generación de condiciones de borde que pueden distorsionar los resultados obtenidos.

Los lisímetros varían desde diseños sencillos hasta diseños complejos que buscan mejorar la incertidumbre del instrumento. Un buen lisímetro debe incluir que la muestra de suelo represente de la mejor forma la condición natural de este.

Lisímetro de balanza: el diseño básico de un lisímetro de balanza consiste en un recipiente que contiene una muestra de suelo que es pesado en el tiempo a medida que la humedad del suelo se evapora en condiciones naturales. Otros diseños más complejos incluyen montar la muestra en una balanza con el fin de obtener un registro continuo, además se cuantifica el agua que drena y medición de la humedad en la zona no saturada (Figura-1). Cuando esta metodología es aplicada en una pequeña porción de suelo es comúnmente llamado microlisímetro (Figura-2).

Lisímetros de carga variable: corresponde a un recipiente con una muestra de suelo que está conectado a un estanque de agua. En el estanque se monitorea el volumen de agua que entra al recipiente que contiene el suelo a medida que se evapora.

Lisímetros de carga constante: Corresponde a un recipiente con una muestra de suelo que se conecta a un tubo de Mariotte que mantiene el nivel constante. El agua contenida en el tubo de Mariotte ingresa al recipiente con la muestra de suelo a medida de que se evapora el agua.

Existen diversas técnicas en lisímetros con el fin de caracterizar la zona no saturada. Las más comunes son métodos geoelectrónicos como TDR (Time Domain Reflectometry), tensiómetros, medición de temperatura, entre otros.

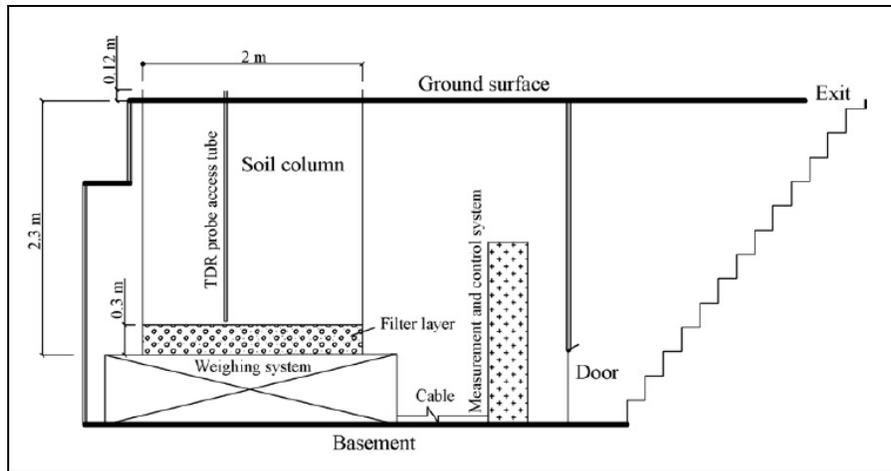


Figura-1 Lisímetro (Ding et al., 2010)



Figura-2 Microlisímetro de balanza (Flumingnan et al., 2012)

MICROMETEOROLOGÍA (CORRELACIÓN DE EDDY Y RAZÓN DE BOWEN)

Existen dos métodos comúnmente utilizados para estimar la evaporación a partir de la medición de parámetros meteorológicos tasa de Bowen y correlaciones de Eddy. En primer lugar tasa de Bowen (Bowen, 1926), realiza un balance de energía sobre un elemento de volumen con base en la superficie del suelo. Si bien este método puede ser aplicado en forma eficiente bajo disímiles condiciones, exige la realización de supuestos y simplificaciones teóricas, además de forzar el cierre de la ecuación de balance de energía.

En segundo lugar, las correlaciones de Eddy han sido utilizadas en Tyler et al. (1997), Kampf (2002), entre otros. Los estudios han realizado mediciones de evaporación en diversas zonas utilizando la técnica de las correlaciones de Eddy, la cual establece que asumiendo condiciones de flujo ideales, el flujo de calor latente (o evaporación) puede ser medido en forma directa correlacionando las fluctuaciones de la velocidad vertical del viento con las variaciones en la densidad de vapor de agua y temperatura. La

implementación de esta metodología por lo general involucra elevados costos de inversión y mantención.

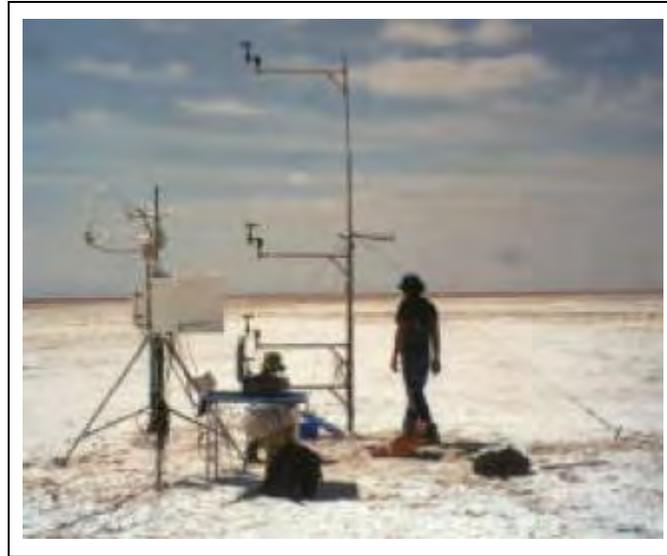


Figura-3 Estación correlación de Eddy (Kampf, 2002)

IMÁGENES SATELITALES

A partir del análisis de imágenes satelitales o sistemas de percepción remota es posible estimar la evaporación. Estos métodos se basan en la interpretación de señales reflejadas en la superficie atmosférica y terrestre para estimar valores de evaporación a escala regional. Una de las principales desventajas de esta metodología es la necesidad de contar con información de campo, para calibrar e interpretar correctamente la información obtenida en forma remota.

Además, estos sistemas suelen representar un elevado costo (Stannard, 1988) y en muchos casos no permiten medir en forma precisa flujos de evaporación de baja magnitud, ni realizar estimaciones diarias con facilidad (Tyler et al., 1997; Kampf et al., 2005).

FLUCTUACIONES DIARIAS EN EL NIVEL

Las fluctuaciones diarias en el nivel del agua medida en pozos puede ser utilizado para estimar la evaporación. Lo anterior ha sido estudiado por diversos autores (White, 1932; Dolan, 1984; Hays, 2003; Gribovszki, 2008; Lohedi, 2008 y Soylyu, 2012). La mayoría de los autores propone fórmulas que dependen de la coeficiente de almacenamiento, la

recarga y el cambio del nivel freático. Dado que el coeficiente de almacenamiento presenta una gran variabilidad entre distintos tipos de suelo, no es posible obtener resultados cuantitativamente precisos.

DOMO

La metodología de las cámaras transportables o método del domo (Stannard, 1988). Esta cámara semiesférica de acrílico permite medir en forma directa los flujos de gas entre la superficie del terreno y la atmósfera (Stannard & Wertz, 2006). La metodología del domo ha sido estudiada por distintos autores con el fin de determinar la evaporación desde suelos desnudos en presencia de napas someras o la evapotranspiración a partir de suelos con vegetación, pero aún no se ha debatido sobre su aplicabilidad en zonas áridas ubicadas a grandes alturas y en presencia de salares.

Esta es una alternativa que se presenta económica, confiable y de fácil implementación, que permite realizar mediciones puntuales e instantáneas de la evaporación utilizando una cámara semiesférica de acrílico. En la Figura-4 se muestra los domos utilizados en el estudio de DICTUC, 2008.

Por último a modo de comparación se presenta en la Figura-5 los resultados de mediciones con domo (chamber), lisímetros y microlisímetros (Johnson et al., 2010).



Figura-4 Domos (DGA/DICTUC, 2008)

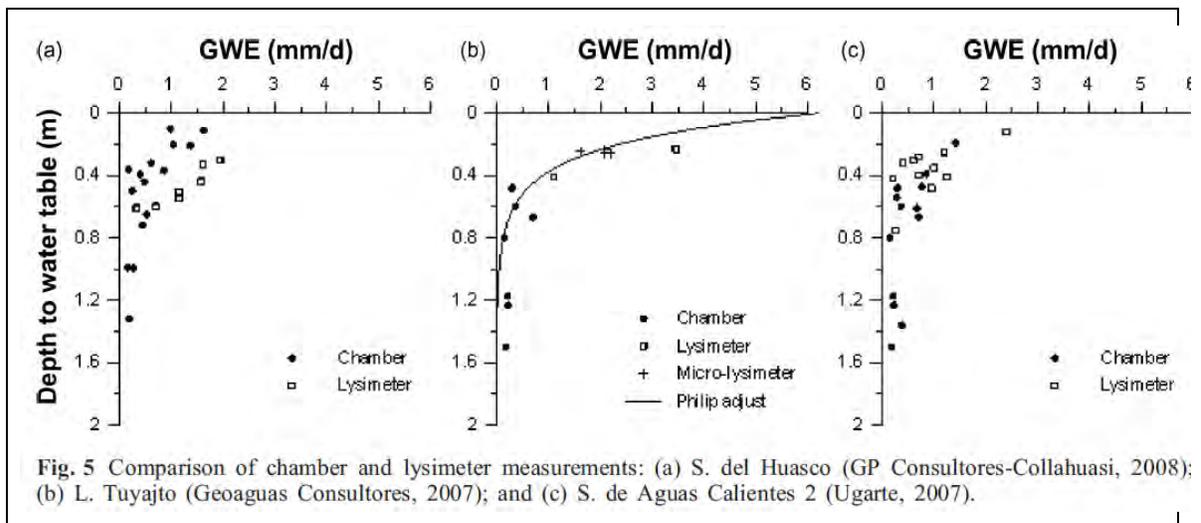


Fig. 5 Comparison of chamber and lysimeter measurements: (a) S. del Huasco (GP Consultores-Collahuasi, 2008); (b) L. Tuyajto (Geoaguas Consultores, 2007); and (c) S. de Aguas Calientes 2 (Ugarte, 2007).

Figura-5 Comparación instrumentos Johnson et al., 2010

Anexo 6: Protocolo de instalación estaciones de monitoreo

A continuación se describe el procedimiento de instalación de las estaciones de monitoreo. Cada instalación cuenta con lo siguiente: un lisímetro, un pluviómetro y un piezómetro, los que cuentan con sensor y datalogger.



Figura-1: Estación de monitoreo 2

1.1 Lisímetro

Previo a la instalación del lisímetro, en cada sitio se realizó en primera instancia una perforación con barreno para evaluar la factibilidad de instalar un lisímetro en el lugar. Los aspectos estudiados para esta evaluación fueron la profundidad del nivel freático y al mismo tiempo determinar si existe alguna costra dura que podría impedir el hincado del lisímetro.

A continuación se detalla el protocolo de instalación de los lisímetros de acuerdo a las experiencias de terreno, enumerando cada una de las actividades desarrolladas.

1.1.1 Hincado del lisímetro.

Esta primera etapa comienza una vez verificada la factibilidad hincar el lisímetro, lo cual depende principalmente de la ausencia de costras o estratos de elevada dureza en profundidad. El proceso comienza con la ayuda de un cilindro metálico de 400 [mm] de diámetro y 25 [cm] de altura con el extremo inferior dentado y afilado para facilitar su penetración en el suelo (Figura-2). En el extremo superior consta de un sistema de acople para permitir su unión con la brida superior del lisímetro a través de pernos.



Figura-2: Cilindro de acero dentado.

Una vez enterrados los primeros 10 a 20 [cm] del cilindro de acero, el procedimiento continuó con la unión de este al lisímetro para continuar el hincado. Este proceso consistió en golpear el PVC del lisímetro en su extremo superior con la ayuda de un combo y un tronco para amortiguar los golpes. A medida que se fue avanzando en profundidad se fue excavando una calicata o zanja alrededor.

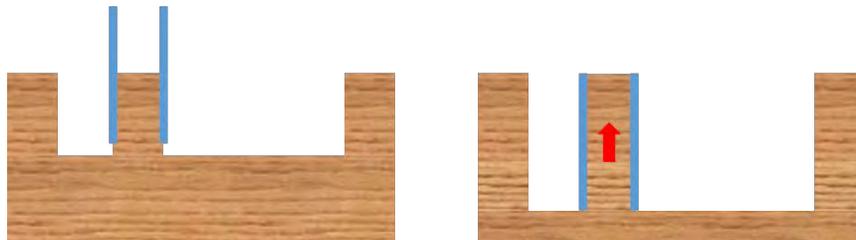


Figura-3: Proceso de hincado del PVC. Flecha roja indica parte superior del suelo.



Figura-4: Proceso de hincado

1.1.2 Cortar PVC del lisímetro

Los tubos de PVC de 400 [mm] que alojan la muestra de suelo tienen 100 [cm] de largo sin considerar el filtro de arena. En la estación de monitoreo N°5 fue necesario cortar el PVC ya que el proceso de hincado no fue posible completarlo. En ese caso se cortaron 5 [cm] de tubo.

1.1.3 Giro del lisímetro

Una vez hincado completamente el PVC se procedió a girarlo boca abajo con el objetivo de instalar el filtro de arena en su parte inferior. Para esto, una vez finalizado el hincado y previo al primer giro, se instaló una tapa en la parte superior del PVC para evitar el desprendimiento del suelo durante el giro y cuando este se encontrase volteado.

Luego con la ayuda de eslingas se procedió a acostar lentamente el PVC en el suelo. Durante este procedimiento se tuvo especial cuidado en no golpear la brida, para lo cual se utilizó un tronco de apoyo para evitar el contacto de la brida con el suelo cuando este era muy duro. Una vez acostado, las eslingas son puestas nuevamente en posición, esta vez enganchadas en la parte inferior del PVC para finalmente levantarlo y posicionar el cilindro dentado hacia arriba.

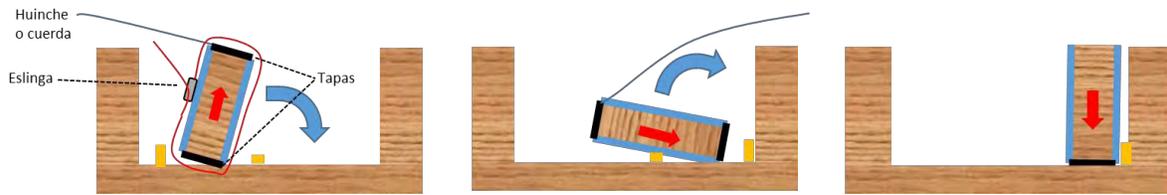


Figura-5: Giro del lisímetro. Flecha roja indica parte superior del suelo.



Figura-6: Preparación para girar el lisímetro.

1.1.4 Unión de la tapa del lisímetro

Esta etapa consiste en la unión entre la tapa con el filtro de arena y el PVC con la muestra de suelo mediante pernos de acero inoxidable. En primer lugar se debe preparar la tapa con el filtro de arena, para lo cual se deben seguir los siguientes pasos: llenar con arena la tapa, pegar filtro de geotextil al disco perforado, acoplar el disco perforado a la tapa mediante tornillos y finalmente limpiar la brida inferior con diluyente y lijar la superficie de contacto con la brida superior.

La preparación del PVC con la muestra de suelo consta de los siguientes pasos: retirar el cilindro de acero, emparejar el suelo una vez retirado el cilindro, limpiar la brida superior con diluyente, lijar la superficie de contacto con la brida inferior y aplicar silicona en la superficie de contacto de la brida superior. Una vez realizado lo anterior se procede a ensamblar ambos elementos y su unión se asegura a través de pernos de acero inoxidable (Figura-7 y Figura-8).

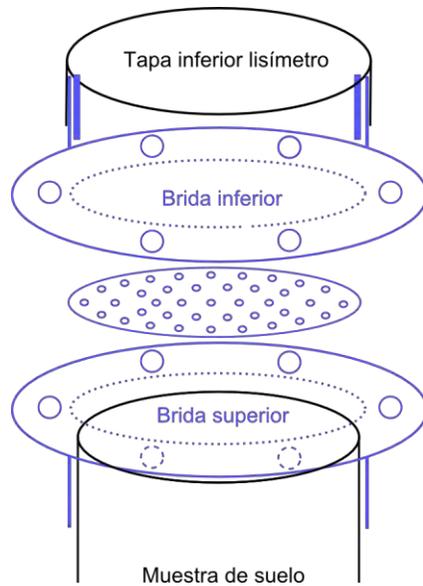


Figura-7: Unión muestra de suelo y tapa inferior.



Figura-8: Tapa con filtro de arena, geotextil y disco perforado (izquierda). Preparación y limpieza de la brida superior (centro). Aplicación de silicona para el sellado de la unión entre bridas (derecha).

1.1.5 Ubicación del Lisímetro

Una vez realizadas todas las uniones se procedió a girar nuevamente el lisímetro con la misma metodología descrita anteriormente. Se empleó el mismo sistema para asegurar que no se desprenda parte del suelo que se encuentra boca abajo.

La profundidad a la cual se instaló cada lisímetro fue tal que la superficie evaporante se ubicase al mismo nivel del terreno real.

1.1.6 Ubicación estanque

Los estanques se instalaron de tal forma que su tapa superior quedase a la misma altura que la superficie evaporante del lisímetro. Junto con lo anterior, ambos van alineados con el objetivo facilitar la instalación y funcionamiento de la manguera de comunicación.

1.1.7 Instalación manguera de comunicación

Ya ubicados el lisímetro y el estanque de agua, se procedió a instalar la manguera de comunicación entre ambos. Ésta va conectada en ambos extremos a un tubo de PVC $\frac{3}{4}$ " tal como se observa en la Figura-9, y su unión se sellará con pegamento y abrazaderas. Es importante mencionar que la manguera está protegida por un tubo de PVC con el fin de evitar que esta se aplaste por efecto del peso del suelo una vez que se tape la calicata.

En lugares donde el nivel freático se encontraba muy superficial, la manguera fue instalada al lisímetro antes de realizar el último giro de este y así evitar el ingreso de agua. Una vez girado, y antes de ubicar el estanque en su posición definitiva, se procedió a conectar la manguera con el mismo propósito de evitar el ingreso de agua al estanque. En ambas uniones se utilizó teflón para evitar filtraciones.



Figura-9: Instalación de manguera de conexión.

1.1.8 Llenado estanque

Para finalizar la instalación se realizó el llenado del estanque con agua del mismo lugar, la cual fue extraída desde la misma zanja o calicata excavada para el lisímetro. Dependiendo de las características del agua en cada punto, esta fue filtrada con geotextil o se dejó decantar durante un tiempo hasta que fuese clara y libre de sedimentos. En la Figura-10 se muestra el proceso de filtración con geotextil y una muestra de la cantidad de sedimentos que se encontró en unos de los puntos de instalación.



Figura-10: Limpieza del agua del estanque mediante filtrado o decantación.

1.1.9 Reconstitución del lugar

Se procedió a tapar la calicata excavada teniendo especial cuidado en no dañar la manguera de comunicación ni sus conexiones, y respetando las condiciones naturales del sector. Durante esta etapa se aseguró que tanto el lisímetro como el estanque permanecieran en posición vertical.



Figura-11: Nivelación de lisímetro y estanque.

1.1.10 Instalación del sensor de presión

En esta etapa se instaló tanto el sistema de soporte como el sensor de presión Dipper APT de Seba hydrometrie. El sistema de soporte consta de un cable que cruza el tubo de observación a 2 [cm] bajo el extremo superior de este. Esta separación permite que la tapa del tubo o tapa gorro cierre perfectamente. Una vez instalado el tubo de observación y el cable de soporte, se procedió a instalar el sensor Dipper APT a través de un cordel amarrado al cable y al extremo del sensor. En este último paso se verificó que el sensor no tocara el fondo del estanque.

La siguiente tarea fue sellar la tapa del estanque y la unión entre la tapa y el tubo de observación con silicona para así evitar filtraciones de evaporación. Por último se instaló el tapa gorro el cual va puesto a presión en el tubo de observación. Para acceder al sensor y así retirar sus datos o para rellenar el estanque sólo es necesario remover el tapa gorro del tubo de observación. Para esto se debe sujetar firmemente el tubo al mismo tiempo que se gira y tira hacia arriba el tapa gorro.

En la Figura-12 (izquierda) se muestra un estanque con su instalación finalizada, donde se observa el sello de silicona de la tapa y el tubo de observación, el tapa gorro y la parte visible o exterior del cable de soporte. También se muestra el sistema de soporte con cable al interior del tubo de observación, para lo cual se utilizó una fotografía de un piezómetro ya que no se cuenta con imágenes del estanque.



Figura-12: Instalación del Dipper APT y sellado de tapa de estanque (izquierda). Sistema de soporte del Dipper APT.

1.2 Pluviómetro

En primer lugar se instaló un mástil de 1,6 m de altura. Este se fijó al suelo mediante un empotramiento de hormigón de 50 [cm], por lo que el largo del mástil sobre el suelo fue de 110 [cm] aproximadamente dependiendo del lugar.

El pluviómetro se ubicó en la parte superior del mástil, considerando especial cuidado en que la bandeja receptora de precipitación del pluviómetro no fuese obstaculizada por el mástil. El pluviómetro se aseguró mediante abrazaderas considerando que la superficie receptora estuviese adecuadamente nivelada a un plano horizontal.

En sectores donde el lisímetro se encuentra cercano a lugares turísticos y de alto tránsito, se instaló el pluviómetro alejado del lisímetro para así no delatar su ubicación.

1.2.1 Sensor de temperatura

El sensor de temperatura se instaló en una caseta Solar Radiation Shield RS1. En cada RS1 el sensor de temperatura se encuentra alojado en el espacio generado por 3 "platos" huecos y su posición no es fija. Por este motivo en su altura con respecto al suelo se incluyó un margen de error de 4 [cm].

La caseta RS1 fue adosada al mástil a través de la placa de montaje mediante alambres. La posición de la placa de montaje se definió a 70 [cm] sobre el nivel del suelo, con lo cual el sensor de temperatura se encuentra ubicado a 48 ± 2 [cm] sobre el suelo.



Figura-13: Instalación RS1.

1.3 Piezómetro

Cada piezómetro se instaló realizando una perforación de 200 [cm] aproximadamente dependiendo de las características del suelo. En algunos sectores la perforación debió ser inferior a 200 [cm] y en otros sectores fue mayor, procurando en cada sitio contar con una altura de agua adecuada para realizar el monitoreo del nivel freático. Para la perforación se utilizó un barreno motorizado marca Waldtec de 72 cc con una broca de 10 [cm] de diámetro.

La habilitación consta de un PVC ranurado de 3 pulgadas que cuenta con una punta de lápiz en un extremo. El PVC es cubierto por un geotextil adosado mediante silicona y cinta adhesiva. El espacio anular se rellenó con gravilla aproximadamente de 3 a 6 [mm] de diámetro. Para los 10 piezómetros ubicados en las estaciones de monitoreo se incluyó un tapa-pozo metálico. El tapa-pozo fue fijado al suelo mediante hormigón.

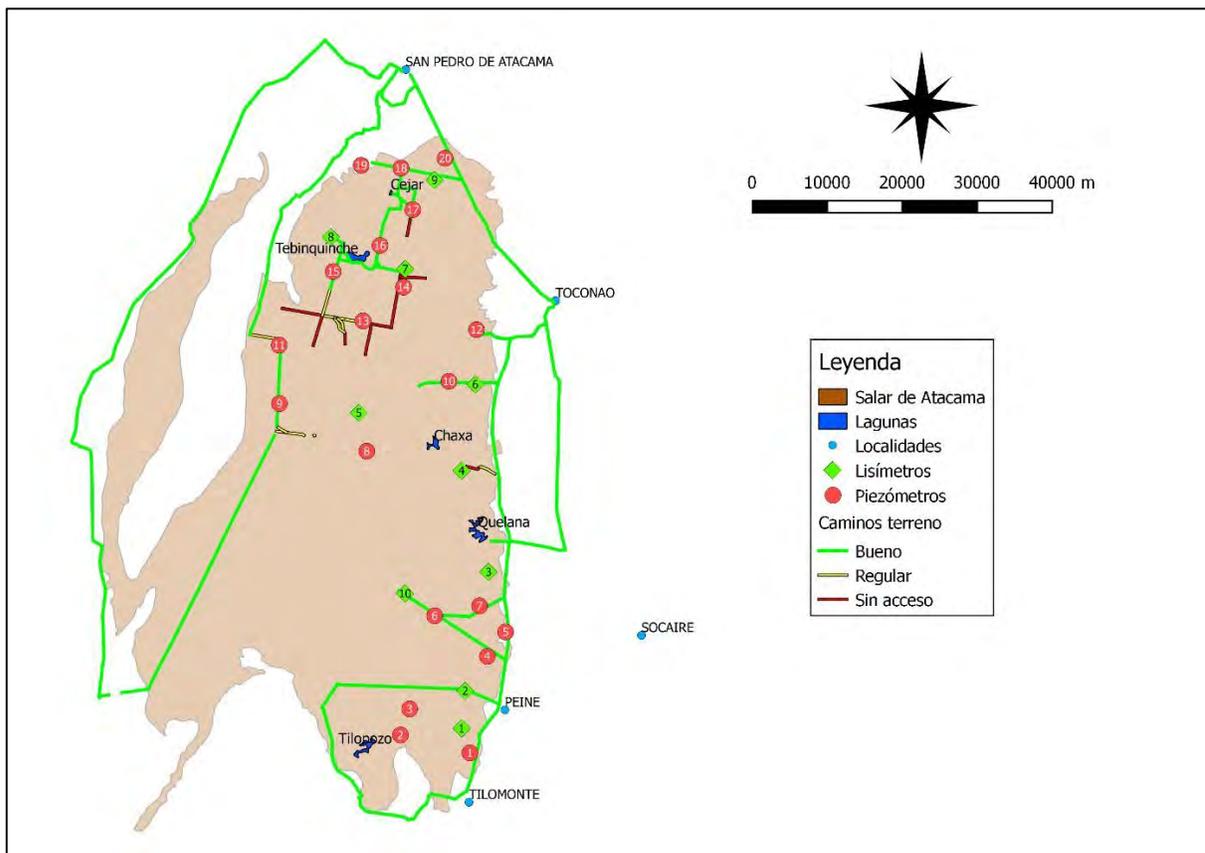


Figura-14: Construcción piezómetro

Anexo 7: Reconocimiento accesos puntos de interés

Durante los días 8 al 15 de Septiembre de 2014, se realizó la primera campaña de terreno cuyo objetivo fue realizar un reconocimiento del área de estudio, verificar los accesos, identificar los lugares donde se instalarán las estaciones de monitoreo y piezómetros, traslado de equipo de perforación y materiales a utilizar, y finalmente construir piezómetros.

A continuación se presenta un mapa de los accesos utilizados que corresponden a caminos públicos y privados de asfalto, tierra o huellas de otros vehículos. En color verde se destacan los accesos en buen estado y fácilmente transitables. En amarillos los accesos utilizados que presentan un mal estado del camino y que posiblemente no puedan ser utilizados durante todo el año. En rojo se muestran los tramos donde no fue posible el acceso. Existen además accesos pertenecientes a SQM que no fue posible utilizar ya que se encuentran cerrados con barrera, pero se tomó conocimiento de estos para solicitar su apertura. La ubicación de las estaciones de monitoreo y piezómetros adicionales de la siguiente figura corresponden a la ubicación propuesta para la primera campaña, esta ubicación se modificó posteriormente.



Anexo 8: Fichas estaciones de monitoreo

Tabla-1: Lisímetro estación de monitoreo 1

Lisímetro-1			
Nombre	Lis-1	Este	578419
		Norte	7372845
		Cota	2296
Fecha Inicio Construcción	21-11-2014	Fecha término Construcción	22-11-2014
Fecha/hora instalación data logger	14-01-2015 11:30	Fecha/hora inicio data logger	17-12-2014 12:00
Altura lisímetro (muestra de suelo)	100 [cm]	Nivel freático estanque (<i>n.f.</i>)	31 [cm]
Cod. Data logger	D4L40117	Intervalo medición batería	96h:00m:00s
Intervalo medición presión	06h:00m:00s	Intervalo medición temperatura	06h:00m:00s
Parámetros de calidad			
Conductividad	6,05 [ms/cm]	pH agua estanque	8,31
Sólidos disueltos	3,88 [g/l]	Temperatura	z18,05°C
Medidas			
c	97,5 [cm]	pvc	12,5 [cm]
Ecuación 10-3	$n.f. = 97,5 + 29 - 12,5 - 1 - \alpha(h - p)$		$n.f. = 113 - \alpha(h - p)$ [cm]
Observaciones			
<p>En el proceso de hincado del lisímetro se observó una compactación del suelo de aproximadamente 15 cm en 100 cm de hincado. La compactación podría deberse a que los primeros 30 cm de suelo corresponden a material blando y poco compacto. Se hincó el lisímetro hasta una profundidad aproximada de 115 cm con el fin de completar la columna de suelo de 100 cm.</p> <p>Debido a que el área presenta una profundidad del nivel freático somera es recomendable que el estanque de agua mantenga siempre un volumen de agua considerable, de lo contrario este podría ascender por efecto del empuje.</p>			
Fotos			
			

Tabla-2: Piezómetro estación de monitoreo 1.

Nombre	Plis-1	Este	578419
		Norte	7372845
		Cota	2296
Fecha Inicio perforación	22-11-2014	Fecha término Construcción	22-11-2014
Fecha/hora instalación data logger	14-01-2015 11:11	Fecha/hora programada inicio data logger	17-12-2014 12:00
Cod. Data logger	D4L4114	Intervalo medición batería	96h:00m:00s
Intervalo medición presión	06h:00m:00s	Intervalo medición temperatura	06h:00m:00s
Medidas			
Diámetro perforación	100 [cm]	Stick up	37 [cm]
Diámetro habilitación	3"	Nivel freático	37,5 [cm]
Profundidad perforación	128 [cm]	Profundidad Dipper	119 [cm]
Profundidad habilitación	115 [cm]	c	127 [cm]
Ecuación 10-4	$n.f. = 127 + 29 - 37 - \alpha(h - p)$		$n.f. = 119 - \alpha(h - p)$
Comentarios			
El stick up de este piezómetro está compuesto por la altura del cemento (N.R.1=11,2 [cm]) y la altura del tapapozo sobre el cemento (N.R.2=25,8 [cm]).			
Estratigrafía [cm]			
0-20	Costra yeso color blanco, rugosa		
20-30	Yeso arcilla, no consolidados		
30-120	Intercalaciones de capas de aproximadamente 1-2 cm de espesor de yeso con carbonatos cristalinos. Las capas se encuentran levemente plegadas. Se observa arcilla entre estas. A los 70 cm de profundidad se destaca la presencia de mineral color amarillo vítreo.		
Fotos			
			

Tabla-3: Pluviómetro estación de monitoreo 1.

Nombre	PL-1	Este	578419	
		Norte	7372845	
		Cota	2296	
Fecha/hora instalación	14-01-2015 12:04	Fecha/hora programada inicio	15-01-2015 12:00	
N° serie del sensor	10592475	Intervalo medición temperatura	01h:00m:00s	
Intervalo medición precipitación	Cada 0,2 [mm] de agua caída	Altura bandeja del pluviómetro	110,5	[cm]
		Altura sensor de temperatura	48,5±2	[cm]

Comentarios

-

Fotos



Tabla-4: Lisímetro estación de monitoreo 2

Lisímetro-2			
Nombre	Lis-2	Este	590459
		Norte	7384353
		Cota	2302
Fecha Inicio Construcción	05-11-2014	Fecha término Construcción	08-11-2014
Fecha/hora instalación data logger	13-01-2014 15:21	Fecha/hora inicio data logger	17-12-2014 12:00
Altura lisímetro (muestra de suelo)	100 [cm]	Nivel freático estanque (<i>n.f.</i>)	24 [cm]
Cod. Data logger	D4L40123	Intervalo medición batería	96h:00m:00s
Intervalo medición presión	06h:00m:00s	Intervalo medición temperatura	06h:00m:00s
Parámetros de calidad			
Conductividad	33,8 [ms/cm]	pH agua estanque	7,5
Sólidos disueltos	21,6 [g/l]	Temperatura	20,3
Medidas			
c	97,5 [cm]	pvc	12,5 [cm]
Ecuación 10-3	$n.f. = 97,5 + 29 - 12,5 - 1 - \alpha(h - p)$		$n.f. = 113 - \alpha(h - p)$ [cm]
Observaciones			
<p>Los primeros 100 [cm] de suelo corresponden principalmente a una arena gruesa de poca cohesión. Esta característica generó que durante el proceso de hincado parte del suelo se escapara desde el interior del lisímetro a través de su extremo inferior. Por este motivo se debió hincar el lisímetro aproximadamente 110 [cm] para lograr una columna de suelo de 100 [cm].</p> <p>Para el llenado del estanque se utilizó la misma agua que afloró desde la zanja excavada, utilizando un filtro de geotextil para retener los sólidos suspendidos.</p>			
Fotos			
			

Tabla-5: Piezómetro estación de monitoreo 2.

Nombre	Plis-2	Este	590459		
		Norte	7384353		
		Cota	2302		
Fecha inicio perforación	08-11-2014	Fecha término perforación	08-11-2014		
Fecha/hora instalación data logger	13-01-2015 15:46	Fecha/hora programada inicio data logger	17-12-2014 12:00		
Cod. Data logger	D4L40115	Intervalo medición batería	96h:00m:00s		
Intervalo medición presión	06h:00m:00s	Intervalo medición temperatura	06h:00m:00s		
Medidas					
Diámetro perforación	100	[cm]	Stick up	20,2	[cm]
Diámetro habilitación	3"		Nivel freático	106,8	[cm]
Profundidad perforación	211,8	[cm]	Profundidad Dipper	C+8,8	[cm]
Profundidad habilitación	198,8	[cm]	c	-	[cm]
Ecuación 10-4	$n.f. = c + 29 - 20,2 - \alpha(h - p)$		$n.f. = c + 8,8 - \alpha(h - p)$		
Comentarios					
-					
Estratigrafía [cm]					
0-100	Arena gruesa y media				
101-207,2	Arena gruesa y media 90%, limo 10%				
Fotos					
					

Tabla-6: Pluviómetro estación de monitoreo 2.

Nombre	PL-2	Este	590459	
		Norte	7384353	
		Cota	2302	
Fecha/hora instalación	13:01:2015 16:21	Fecha/hora programada inicio	14-01-2015 12:00	
N° serie del sensor	10592473	Intervalo medición temperatura	01h:00m:00s	
Intervalo medición precipitación	Cada 0,2 [mm] de agua caída	Altura bandeja del pluviómetro	114	[cm]
		Altura sensor de temperatura	48±2	[cm]

Fotos



Tabla-7: Estación de monitoreo 3.

Lisímetro-3			
Nombre	Lis-3	Este	591764
		Norte	7394074
		Cota	2493
Fecha Inicio Construcción	05-12-2014	Fecha término Construcción	06-12-2014
Fecha/hora instalación data logger	14-01-2015 19:30	Fecha/hora inicio data logger	17-12-2014 12:00
Altura lisímetro (muestra de suelo)	100 [cm]	Nivel freático estanque (<i>n.f.</i>)	17,2 [cm]
Cod. Data logger	D4L40124	Intervalo medición batería	96h:00m:00s
Intervalo medición presión	06h:00m:00s	Intervalo medición temperatura	06h:00m:00s
Parámetros de calidad			
Conductividad	8,63 [ms/cm]	pH agua estanque	7,61
Sólidos disueltos	5,52 [g/l]	Temperatura	21,3°C
Medidas			
c	96,5 [cm]	pvc	13,5 [cm]
Ecuación 10-3	$n.f. = 96,5 + 29 - 13,5 - 1 - \alpha(h - p)$		$n.f. = 111 - \alpha(h - p)$ [cm]
Observaciones			
<p>Los primeros 100 [cm] corresponden a un suelo con contenido variables de arenas y finos, lo cual facilita el proceso de hincado. A partir de los 101 [cm] aproximadamente se encuentra una costra dura de carbonato la cual fue necesario "tallar" con chuzo y cincel, ya que los dientes de acero del cilindro metálico adherido al lisímetro no fueron capaces de perforarla.</p> <p>El nivel freático se observó a los 140 [cm] aproximadamente, profundidad que fue alcanzada desde la zanja del lisímetro a través de un pequeño agujero perforado con chuzo.</p> <p>Debido a la dificultad para extraer agua desde el lugar, esta se obtuvo del sitio de instalación del lisímetro 4.</p> <p>Este lisímetro se encuentra ubicado a unos 20 metros del camino que va desde el campamento de SQM a su faena, y es claramente visible desde este.</p> <p>Antes de instalar el sensor del estanque, el agua se encontraba a 45 [cm] de profundidad, por lo cual se rellenó hasta los 16 [cm] para así cubrir mejor la curva evaporación v/s profundidad. Una vez finalizada la instalación se midió nuevamente el nivel encontrándose este a 17,2 [cm]. Se debe manejar con precaución los datos registrados por el Dipper cuando se ha efectuado un relleno del estanque recientemente, ya que el nivel tiende a bajar rápidamente por el efecto del traspaso de agua desde el estanque hacia el suelo.</p>			
Fotos			



Tabla-8: Piezómetro estación de monitoreo 3.

Nombre	Plis-3	Este	591764
		Norte	7394074
		Cota	2493
Fecha inicio perforación	05-12-2014	Fecha término perforación	05-12-2014
Fecha/hora instalación data logger	N/A	Fecha/hora programada inicio data logger	N/A
Cod. Data logger	N/A	Intervalo medición batería	N/A
Intervalo medición presión	N/A	Intervalo medición temperatura	N/A
Medidas			
Diámetro perforación	100 [cm]	Stick up	27 [cm]
Diámetro habilitación	3"	Nivel freático	150 [cm]
Profundidad perforación	107,5 [cm]	Profundidad Dipper	N/A [cm]
Profundidad habilitación	94,5 [cm]	c	N/A [cm]
Ecuación 10-4	$n.f. = c + 29 - 27 - \alpha(h - p)$		$n.f. = c + 2 - \alpha(h - p)$
Comentarios			
<p>En este lugar no fue posible perforar con el barreno motorizado utilizado en el proyecto. La costra de carbonato encontrada a los 100 [cm] de profundidad tampoco fue posible perforarla mediante chuzo. Por este motivo al piezómetro instalado no se le incluyó el sensor de presión (Dipper APT) ya que no fue posible alcanzar el nivel freático. La profundidad del nivel freático es aproximada. La información de instalación del Dipper no se incluye ya que este no se instaló por encontrarse el piezómetro seco. El Dipper fue entregado a la Inspección Fiscal</p>			
Estratigrafía [cm]			
0-10	Costra superficial semidura de sulfato		
11-50	Arena fina 50%, limo 50%		
51-60	Arcilla 90%, arena fina 10%		
61-100	Arena gruesa y media 80%, fino 20%		
101-140	Costra dura de carbonato		
Fotos			
			

N/A: No Aplica

Tabla-9: Pluviómetro estación de monitoreo 3.

Nombre	PL-3	Este	591764	
		Norte	7394074	
		Cota	2493	
Fecha/hora instalación	N/A	Fecha/hora programada inicio	N/A	
N° serie del sensor	N/A	Intervalo medición temperatura	N/A	
Intervalo medición precipitación	Cada 0,2 [mm] de agua caída	Altura bandeja del pluviómetro	N/A	[cm]
		Altura sensor de temperatura	N/A	[cm]
Comentarios				
A solicitud de la DGA, el pluviómetro de esta estación de monitoreo se entregó a la Inspección Fiscal. Por este motivo no se incluyen los datos de instalación del sensor. En terreno quedó instalado el mástil para la posterior instalación del pluviómetro.				

N/A: No Aplica

Tabla-10: Estación de monitoreo 4.

Lisímetro-4			
Nombre	Lis-4	Este	591612
		Norte	7393992
		Cota	2309
Fecha Inicio Construcción	03-12-2014	Fecha término Construcción	04-12-2014
Fecha/hora instalación data logger	14-01-2015 18:09	Fecha/hora inicio data logger	17-12-2014 12:00
Altura lisímetro (muestra de suelo)	100 [cm]	Nivel freático estanque (<i>n. f.</i>)	14 [cm]
Cod. Data logger	D4L40111	Intervalo medición batería	96h:00m:00s
Intervalo medición presión	06h:00m:00s	Intervalo medición temperatura	06h:00m:00s
Parámetros de calidad			
Conductividad	7,6 [ms/cm]	pH agua estanque	7,9
Sólidos disueltos	4,86 [g/l]	Temperatura	19,8
Medidas			
c	100 [cm]	pvc	14,5 [cm]
Ecuación 10-3	$n. f. = 100 + 29 - 14,5 - 1 - \alpha(h - p)$		$n. f. = 113,5 - \alpha(h - p)$ [cm]
Observaciones			
<p>En este lugar el nivel freático se encuentra a unos 20 [cm] de profundidad y el suelo se caracteriza por tener una baja permeabilidad en comparación a los otros sitios de instalación.</p> <p>Se recomienda evitar que el nivel de agua del estanque descienda demasiado para que así este no se eleve por efecto del empuje.</p> <p>En este caso no fue posible tapar completamente la zanja de instalación, quedando un pequeño "charco" a un costado del estanque. No obstante, esto facilitará el posterior llenado de los lisímetros 3 y 4.</p> <p>Este lisímetro se encuentra ubicado a unos 15 metros del camino que va desde el campamento de SQM a su faena, y es claramente visible desde este.</p>			
Fotos			
			

Tabla-11: Piezómetro estación de monitoreo 4.

Nombre	Plis-4	Este	591612
		Norte	7393992
		Cota	2309
Fecha inicio perforación	04-12-2014	Fecha término perforación	04-12-2014
Fecha/hora instalación data logger	14-01-2015 17:48	Fecha/hora programada inicio data logger	17-12-2014 12:00
Cod. Data logger	D4L40112	Intervalo medición batería	96h:00m:00s
Intervalo medición presión	06h:00m:00s	Intervalo medición temperatura	06h:00m:00s
Medidas			
Diámetro perforación	100 [cm]	Stick up	40 [cm]
Diámetro habilitación	3"	Nivel freático	22,5 [cm]
Profundidad perforación	201 [cm]	Profundidad Dipper	173,5 [cm]
Profundidad habilitación	188 [cm]	c	184,5 [cm]
Ecuación 10-4	$n. f. = 184,5 + 29 - 40 - \alpha(h - p)$		$n. f. = 173,5 - \alpha(h - p)$
Comentarios			
-			
Estratigrafía [cm]			
0-5	Costra superficial blanda de sulfato		
6-120	Limo arcilloso café		
121-187	Limo arcilloso negro		
Fotos			
			

Tabla-12: Pluviómetro estación de monitoreo 4.

Nombre	PL-4	Este	591612	
		Norte	7393992	
		Cota	2309	
Fecha/hora instalación	14-01-2015 17:30	Fecha/hora programada inicio	14-01-2015 12:00	
N° serie del sensor	10592467	Intervalo medición temperatura	01h:00m:00s	
Intervalo medición precipitación	Cada 0,2 [mm] de agua caída	Altura bandeja del pluviómetro	110	[cm]
		Altura sensor de temperatura	48±2	[cm]

Comentarios

Este pluviómetro se instaló posterior a la fecha programada para el inicio de medición por parte del sensor, por lo tanto cualquier registro de precipitación captado por este es efecto de la manipulación durante la instalación y no de la lluvia.

En la imagen se muestra cuán cercano se encuentra la estación de monitoreo del camino que va hacia la faena de SQM.

Fotos



Tabla-13: Estación de monitoreo 5.

Lisímetro-5			
Nombre	Lis-5	Este	590716
		Norte	7375739
		Cota	2306
Fecha Inicio Construcción	20-12-2014	Fecha término Construcción	22-12-2014
Fecha/hora instalación data logger	14-01-2015 13:50	Fecha/hora inicio data logger	17-12-2015 12:00
Altura lisímetro (muestra de suelo)	95 [cm]	Nivel freático estanque (<i>n.f.</i>)	28,4 [cm]
Cod. Data logger	D4L40125	Intervalo medición batería	96h:00m:00s
Intervalo medición presión	06h:00m:00s	Intervalo medición temperatura	06h:00m:00s
Parámetros de calidad			
Conductividad	5,74 [ms/cm]	pH agua estanque	8,00
Sólidos disueltos	3,68 [g/l]	Temperatura	21,87°C
Medidas			
c	99 [cm]	pvc	13,5 [cm]
Ecuación 10-3	$n.f. = 99 + 29 - 13,5 - 1 - \alpha(h - p)$		$n.f. = 113,5 - \alpha(h - p)$ [cm]
Observaciones			
<p>Este lisímetro debió ser reubicado ya que el sitio propuesto a la DGA para su instalación presentaba una costra de suelo muy duro a unos 70 [cm] de profundidad y de un espesor desconocido. El lugar escogido fue un punto en el borde sur del Salar correspondiente a un suelo de carbonatos.</p> <p>Aproximadamente a unos 90 [cm] de profundidad se encontró una costra dura de carbonato de unos 15 [cm] de espesor aproximadamente. Producto de la dureza del suelo, durante el hincado el cilindro de acero perdió su forma cilíndrica y algunos de sus dientes se doblaron completamente. Esto provocó que el esfuerzo de los golpes no se transmitiera correctamente desde el cilindro de acero al lisímetro, generando una rotura de la brida. El daño causado se consideró que era reparable; una vez instalado el filtro de gravilla, se sellaron con silicona todas las grietas de la brida y se selló el refuerzo de soporte de la brida para asegurar que no se generasen filtraciones. La silicona se dejó secar durante 18 horas aproximadamente antes de girar el lisímetro a su posición final. Una vez instalado se volvió a aplicar silicona tanto en las grietas como en el refuerzo.</p> <p>Una vez que se observó la rotura de la brida se detuvo el hincado del lisímetro inmediatamente cuando aún faltaban unos 5 [cm] por hincar, los cuales fueron cortados quedando el lisímetro de una altura total de 115 [cm].</p> <p>El estanque de este lisímetro sufrió daños en el hilo de la conexión a la manguera durante el traslado desde Santiago a Toconao. La conexión dañada fue sellada mediante un tapón pegado con vinilit (cemento para PVC) y luego se selló con silicona por precaución. Luego se perforó el estanque para instalar una nueva conexión a la manguera, la cual fue pegada con vinilit y luego sellada con silicona.</p> <p>Cabe destacar que cuando se instaló el lisímetro el estanque se llenó hasta los 20 [cm]. Durante la última campaña de instrumentación, al momento de instalar el Dipper, el nivel freático del estanque se encontraba a los 28,4 [cm], lo cual se considera normal si se</p>			

considera la evaporación y el agua que escurre hacia la muestra de suelo hasta saturarlo justo después llenar el estanque. Lo anterior indica que los arreglos efectuados en terreno dieron resultado y el lisímetro no presenta filtraciones.

Fotos



Tabla-14: Piezómetro estación de monitoreo 5.

Nombre	Plis-5	Este	590716
		Norte	7375739
		Cota	2306
Fecha inicio perforación	24-11-2014	Fecha término perforación	24-11-2014
Fecha/hora instalación data logger	14-01-2015 13:37	Fecha/hora programada inicio data logger	17-12-2014 12:00
Cod. Data logger	D4L40113	Intervalo medición batería	96h:00m:00s
Intervalo medición presión	06h:00m:00s	Intervalo medición temperatura	06h:00m:00s
Medidas			
Diámetro perforación	100 [cm]	Stick up	37,5 [cm]
Diámetro habilitación	3"	Nivel freático	65,3 [cm]
Profundidad perforación	185,5 [cm]	Profundidad Dipper	166,5 [cm]
Profundidad habilitación	172,5 [cm]	c	175 [cm]
Ecuación 10-4	$n. f. = 175 + 29 - 37,5 - \alpha(h - p)$		$n. f. = 166,5 - \alpha(h - p)$
Estratigrafía [cm]			
0-2	Costra blanda		
3-90	Arena gruesa 90%, limo 10%		
91-110	Costra dura de carbonato		
11-183,2	Arena gruesa y media 50%, finos 50%. Suelo color gris.		
Fotos			
			
			

Tabla-15: Pluviómetro estación de monitoreo 5.

Nombre	PL-5	Este	590716	
		Norte	7375739	
		Cota	2306	
Fecha/hora instalación	14-01-2015 13:30	Fecha/hora programada inicio	14-01-2015 12:00	
N° serie del sensor	10592474	Intervalo medición temperatura	01h:00m:00s	
Intervalo medición precipitación	Cada 0,2 [mm] de agua caída	Altura bandeja del pluviómetro	103,7	[cm]
		Altura sensor de temperatura	48±2	[cm]

Fotos

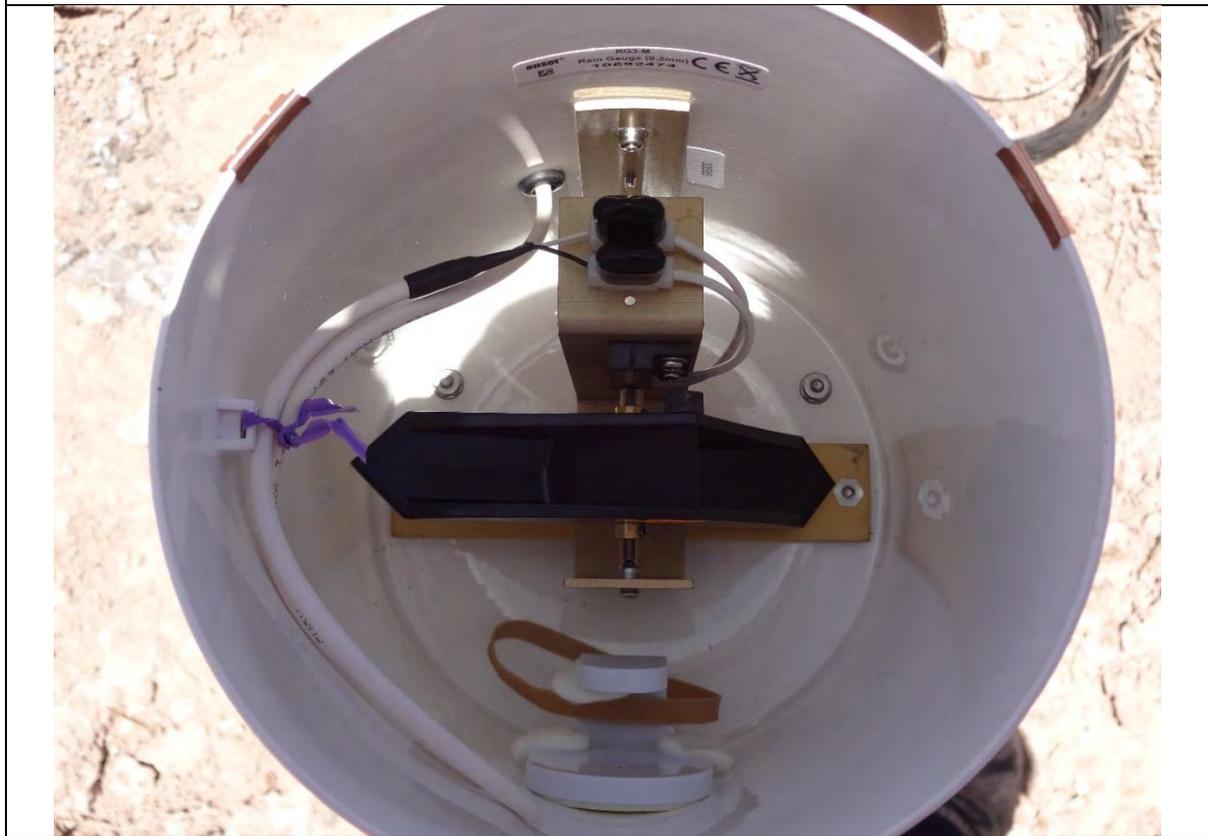


Tabla-16: Estación de monitoreo 6.

Lisímetro-6			
Nombre	Lis-6	Este	591475
		Norte	7424606
		Cota	2293
Fecha Inicio Construcción	20-11-2014	Fecha término Construcción	21-11-2014
Fecha/hora instalación data logger	15-01-2015 18:34	Fecha/hora inicio data logger	17-12-2015 12:00
Altura lisímetro (muestra de suelo)	100 [cm]	Nivel freático estanque (<i>n. f.</i>)	29
Cod. Data logger	D4L40107	Intervalo medición batería	96h:00m:00s
Intervalo medición presión	06h:00m:00s	Intervalo medición temperatura	06h:00m:00s
Parámetros de calidad			
Conductividad	1,583 [ms/cm]	pH agua estanque	8,36
Sólidos disueltos	1,014 [g/l]	Temperatura	20,35
Medidas			
c	99 [cm]	Pvc	13,3 [cm]
Ecuación 10-3	$n. f. = 99 + 29 - 13,3 - 1 - \alpha(h - p)$		$n. f. = 113,7 - \alpha(h - p)$ [cm]
Observaciones			
Este lisímetro se encuentra a unos 40 metros de la ruta que va hacia Laguna Chaxa, camino altamente transitado por turistas. Con el objetivo de disimular la ubicación del lisímetro, el pluviómetro de la estación de monitoreo se ubicó a unos 30 metros de este.			
Fotos			
			

Tabla-17: Piezómetro estación de monitoreo 6.

Nombre	Plis-6	Este	591475		
		Norte	7424606		
		Cota	2293		
Fecha inicio perforación	21-11-2014	Fecha término perforación	21-11-2014		
Fecha/hora instalación data logger	15-01-2015 18:20	Fecha/hora programada inicio data logger	15-01-2015 12:00		
Cod. Data logger	D4L40109	Intervalo medición batería	96h:00m:00s		
Intervalo medición presión	06h:00m:00s	Intervalo medición temperatura	06h:00m:00s		
Medidas					
Diámetro perforación	100	[cm]	Stick up	30,3	[cm]
Diámetro habilitación	3"		Nivel freático	118,7	[cm]
Profundidad perforación	210,8	[cm]	Profundidad Dipper	184,2	[cm]
Profundidad habilitación	197,8	[cm]	c	185,5	[cm]
Ecuación 10-4	$n.f. = 185,5 + 29 - 30,3 - \alpha(h - p)$		$n.f. = 184,2 - \alpha(h - p)$		
Comentarios					
El Dipper instalado en este piezómetro contiene datos registrados el día 15-12-2014, fecha en la cual se realizó una demostración de su funcionamiento junto con la Inspección Fiscal. Los datos para la obtención del nivel freático se deben considerar a partir del 15-01-2015.					
Estratigrafía [cm]					
0-30	Costra yeso rugosa color blanco-café.				
30-40	Arcilla-limo color café				
40-50	Capa de arcilla negra con materia orgánica				
50-100	Arcilla café 75% y arena media 25%				
100-140	Carbonatos cristalinos color blanco con un 15% de arcilla				
Fotos					
					

Tabla-18: Pluviómetro estación de monitoreo 6.

Nombre	PL-6	Este	591533	
		Norte	7424549	
		Cota	2319	
Fecha/hora instalación	15-01-2015 18:20	Fecha/hora programada inicio	15-01-2015	
N° serie del sensor	105947	Intervalo medición temperatura	01h:00m:00s	
Intervalo medición precipitación	Cada 0,2 [mm] de agua caída	Altura bandeja del pluviómetro	115,6	[cm]
		Altura sensor de temperatura	48±2	[cm]

Comentarios

Debido a que el lisímetro se encuentra a unos 70 [m] del camino que va a Laguna Chaxa, ruta altamente transitada por turistas, se decidió instalar el pluviómetro a unos 80 [m] de este para así dificultar su localización.

Fotos



Tabla-19: Estación de monitoreo 7.

Lisímetro-7			
Nombre	Lis-7	Este	581605
		Norte	7439456
		Cota	2221
Fecha Inicio Construcción	19-11-2014	Fecha término Construcción	20-11-2014
Fecha/hora instalación data logger	15-01-2015 11:40	Fecha/hora inicio data logger	17-12-2014 12:00
Altura lisímetro (muestra de suelo)	100 [cm]	Nivel freático estanque (<i>n.f.</i>)	25,8
Cod. Data logger	D4L40116	Intervalo medición batería	96h:00m:00s
Intervalo medición presión	06h:00m:00s	Intervalo medición temperatura	06h:00m:00s
Parámetros de calidad			
Conductividad	28,7 [ms/cm]	pH agua estanque	8,05
Sólidos disueltos	18,36 [g/l]	Temperatura	20,63
Medidas			
c	98,6 [cm]	pvc	12,3 [cm]
Ecuación 10-3	$n.f. = 98,6 + 29 - 12,3 - 1 - \alpha(h - p)$		$n.f. = 114,3 - \alpha(h - p)$ [cm]
Observaciones			
El área de instalación presentó un profundidad del nivel freático de aproximadamente 30 cm. Es importante monitorear regularmente el estado del estanque para asegurarse de que no suba por efecto del empuje.			
Fotos			
			



Tabla-20: Piezómetro estación de monitoreo 7.

Nombre	Plis-7	Este	581605
		Norte	7439456
		Cota	2221
Fecha inicio perforación	20-11-2014	Fecha término perforación	20-11-2014
Fecha/hora instalación data logger	15-01-2015 11,58	Fecha/hora programada inicio data logger	17-12-2014 12:00
Cod. Data logger	D4L440121	Intervalo medición batería	96h:00m:00s
Intervalo medición presión	06h:00m:00s	Intervalo medición temperatura	06h:00m:00s
Medidas			
Diámetro perforación	100 [cm]	Stick up	39 [cm]
Diámetro habilitación	3"	Nivel freático	34,6 [cm]
Profundidad perforación	160,5 [cm]	Profundidad Dipper	152 [cm]
Profundidad habilitación	147,5 [cm]	c	162 [cm]
Ecuación 10-4	$n.f. = 162 + 29 - 39 - \alpha(h - p)$		$n.f. = 152 - \alpha(h - p)$
Estratigrafía [cm]			
0-30	Costra de sulfatos color blanco-café claro		
30-70	Arcilla-limo color café		
70-90	Yeso-carbonatos cristalinos con arcilla intersticial		
90-120	Arena media 60% Limo 20% Arcilla 20%		
Fotos			
			

Tabla-21: Pluviómetro estación de monitoreo 7.

Nombre	PL-7	Este	581605	
		Norte	7439456	
		Cota	2221	
Fecha/hora instalación	15-01-2015 11:37	Fecha/hora programada inicio	15-01-2015 12:00	
N° serie del sensor	10592471	Intervalo medición temperatura	01h:00m:00s	
Intervalo medición precipitación	Cada 0,2 [mm] de agua caída	Altura bandeja del pluviómetro	109,5	[cm]
		Altura sensor de temperatura	48±2	[cm]

Fotos



Tabla-22: Estación de monitoreo 8.

Lisímetro-8			
Nombre	Lis-8	Este	591656
		Norte	7417731
		Cota	2310
Fecha Inicio Construcción	22-12-2014	Fecha término Construcción	23-12-2014
Fecha/hora instalación data logger	15-01-2015 16:50	Fecha/hora inicio data logger	17-12-2014 12:00
Altura lisímetro (muestra de suelo)	100 [cm]	Nivel freático estanque (n.f.)	24,5
Cod. Data logger	D4L40120	Intervalo medición batería	96h:00m:00s
Intervalo medición presión	06h:00m:00s	Intervalo medición temperatura	06h:00m:00s
Parámetros de calidad			
Conductividad	1,570 [ms/cm]	pH agua estanque	8,18
Sólidos disueltos	1,000 [g/l]	Temperatura	20,20
Medidas			
c	98,2 [cm]	pvc	14,5 [cm]
Ecuación 10-3	$n.f. = 98,2 + 29 - 14,5 - 1 - \alpha(h - p)$		$n.f. = 111,7 - \alpha(h - p)$ [cm]
Observaciones			
<p>Este lisímetro fue reubicado ya que, de acuerdo a la información entregada por SQM, no es posible acceder al lugar original a través de los caminos de la empresa. Se escogió un lugar en el borde este del Salar cercano al sistema de lagunas de laguna Chaxa y Barros Negros. Si bien se encuentra cercano al lisímetro 6, se estima que se medirán tasas de evaporación diferente debido a que la granulometría del suelo y tipo de costra presentan características distintas.</p> <p>Se encuentra a unos 20 [m] al sureste del pluviómetro y el piezómetro. No se instalaron juntos ya que estos últimos se ubican en una pequeña depresión del nivel del suelo. Se escogió un lugar un poco más elevado para el lisímetro y así evitar el ingreso lateral de agua durante las precipitaciones.</p>			
Fotos			
			

Tabla-23: Piezómetro estación de monitoreo 8.

Nombre	Plis-8	Este	591656
		Norte	7417731
		Cota	2310
Fecha inicio perforación	07-12-2014	Fecha término perforación	07-12-2014
Fecha/hora instalación data logger	15-01-2015 16:46	Fecha/hora programada inicio data logger	17-12-2014 12:00
Cod. Data logger	D4L40122	Intervalo medición batería	96h:00m:00s
Intervalo medición presión	06h:00m:00s	Intervalo medición temperatura	06h:00m:00s
Medidas			
Diámetro perforación	100 [cm]	Stick up	36,5 [cm]
Diámetro habilitación	3"	Nivel freático	52 [cm]
Profundidad perforación	210,7 [cm]	Profundidad Dipper	176 [cm]
Profundidad habilitación	197,7 [cm]	c	183,5 [cm]
Ecuación 10-4	$n.f. = 183,5 + 29 - 36,5 - \alpha(h - p)$		$n.f. = 176 - \alpha(h - p)$
Comentarios			
El stick up corresponde a la altura del cemento (N.R.1=10 [cm]) más la altura del tapa pozo (N.R.2=26,5 [cm]).			
Estratigrafía [cm]			
0-160	Arena media 50%, limo 50% color café claro		
161-200	Arcilla limosa 80%, arena media 20%		
Fotos			
			

Tabla-24: Pluviómetro estación de monitoreo 8.

Nombre	PL-8	Este	591656	
		Norte	7417731	
		Cota	2310	
Fecha/hora instalación	15-01-2015 14:25	Fecha/hora programada inicio	14-01-2015 12:00	
N° serie del sensor	10592476	Intervalo medición temperatura	01h:00m:00s	
Intervalo medición precipitación	Cada 0,2 [mm] de agua caída	Altura bandeja del pluviómetro	100	[cm]
		Altura sensor de temperatura	48±2	[cm]

Fotos



Tabla-25: Estación de monitoreo 9.

Lisímetro-9			
Nombre	Lis-9	Este	585936
		Norte	7451754
		Cota	2364
Fecha Inicio Construcción	09-11-2014	Fecha término Construcción	11-11-2014
Fecha/hora instalación data logger	23-11-2014 16:30	Fecha/hora inicio data logger	23-11-2014 18:00
Altura lisímetro (muestra de suelo)	100 [cm]	Nivel freático estanque (<i>n.f.</i>)	20 [cm]
Cod. Data logger	T4L02234	Intervalo medición batería	24h:00m:00s
Intervalo medición presión	06h:00m:00s	Intervalo medición temperatura	06h:00m:00s
Parámetros de calidad			
Conductividad	10,85 [ms/cm]	pH agua estanque	8,10
Sólidos disueltos	6,95 [g/l]	Temperatura	21,45
Medidas			
C ₂	132 [cm]	pvc	- [cm]
Ecuación 10-3	$n.f. = c_2 - \alpha(h - p)$		$n.f. = 132 - \alpha(h - p)$ [cm]
Observaciones			
<p>La regleta del estanque de este lisímetro se graduó en primera instancia de forma incorrecta. La graduación correcta cada 10 [cm] se indica en la imagen adjunta. Durante el hincado del lisímetro este sufrió el desprendimiento de un trozo de PVC en la parte superior. Este fue debidamente pegado con vinilit al cual se le dio el tiempo suficiente para que sellara de forma adecuada.</p> <p>Se escogió este lisímetro para instalar un Dipper PTEC, más avanzado que el Dipper APT, ya que también mide la conductividad eléctrica del agua. Aparte del sensor propiamente tal, el Dipper PTEC requiere de una batería de alimentación, la cual se instaló afuera del estanque dentro de un tubo de PVC. El cable de conexión entre la batería y el sensor se pasó a través de un agujero a un costado del estanque el cual fue sellado con silicona luego de la instalación</p> <p>Este lisímetro se encuentra a unos 700 [m] del camino que va desde la ruta 23 (o camino internacional) hacia Laguna Cejar. Es por lo tanto una ruta altamente transitada por turistas. A pesar de que desde el camino no es posible visualizar el lisímetro o el pluviómetro, se decidió instalarlos a unos 120 [m] de distancia el uno del otro como medida de precaución.</p> <p>El agua del lugar presenta una alta carga de sólidos suspendidos. Por este motivo fue necesario depositar el agua en bidones y darle tiempo para que los sedimentos decantasen.</p> <p>Se decidió dejar una zanja sin tapar para facilitar la extracción de agua, la cual también se utilizó para llenar el estanque del lisímetro 10.</p> <p>La calibración del factor α también puede efectuarse con la medición realizada el 15-01-2014 a las 10:15 donde se registró un nivel freático $n.f. = 23,5$ [cm].</p>			

El largo del cordel 'c' en este caso no aplica ya que el sensor se encuentra ubicado en el fondo del estanque, C_2 corresponde a la profundidad total del estanques desde el pvc de observación.

Fotos



Tabla-26: Piezómetro estación de monitoreo 9.

Nombre	Plis-9	Este	585936
		Norte	7451754
		Cota	2364
Fecha inicio perforación	10-11-2014	Fecha término perforación	10-11-2014
Dipper APT			
Fecha/hora instalación data logger	23-11-2014 16:15	Fecha/hora programada inicio data logger	19-11-2014 06:00
Cod. Data logger	D4L40118	Intervalo medición batería	24h:00m:00s
Intervalo medición presión	06h:00m:00s	Intervalo medición temperatura	06h:00m:00s
Medidas			
Diámetro perforación	100 [cm]	Stick up	31,5 [cm]
Diámetro habilitación	3"	Nivel freático	133 [cm]
Profundidad perforación	181,5 [cm]	Profundidad Dipper	166 [cm]
Profundidad habilitación	168,5 [cm]	c	168,5 [cm]
Ecuación 10-4	$n. f. = 168,5 + 29 - 31,5 - \alpha(h - p)$		$n. f. = 166 - \alpha(h - p)$
BaroDipper			
Fecha/hora instalación data logger	23-11-2014 16:17	Fecha/hora programada inicio data logger	19-11-2014 06:00
Cod. Data logger	B4L01027	Intervalo medición batería	24h:00m:00s
Intervalo medición presión	06h:00m:00s	Intervalo medición temperatura	06h:00m:00s
Comentarios			
<p>En este piezómetro se encuentre alojado un BaroDipper para comenzar la medición del resto de los sensores por variaciones de la presión atmosférica. Este BaroDipper cuenta con datos registrados el día 17-11-2014, fecha en la cual se realizó una prueba de su funcionamiento.</p> <p>La descripción estratigráfica fue realizada posterior al terreno de instalación.</p> <p>Para la calibración del factor α se debe considerar que las medidas indicadas en este cuadro corresponden al día 15-01-2015.</p>			
Estratigrafía [cm]			
0-80	Arena media y fina 60%, limo arcilloso 40%		
80-120	Limo arcilloso 70%, arena media y fina 30%		
120-130	Costra dura de carbonato		
130-180	Limo arcilloso 60%, arena media y fina 40%		
Fotos			
			

Tabla-27: Pluviómetro estación de monitoreo 9.

Nombre	PL-9	Este	586052	
		Norte	7451790	
		Cota	2351	
Fecha/hora instalación	15-01-2015 09:53	Fecha/hora programada inicio	15-01-2015 12:00	
N° serie del sensor	10592472	Intervalo medición temperatura	01h:00m:00s	
Intervalo medición precipitación	Cada 0,2 [mm] de agua caída	Altura bandeja del pluviómetro	108,5	[cm]
		Altura sensor de temperatura	48±2	[cm]

Fotos

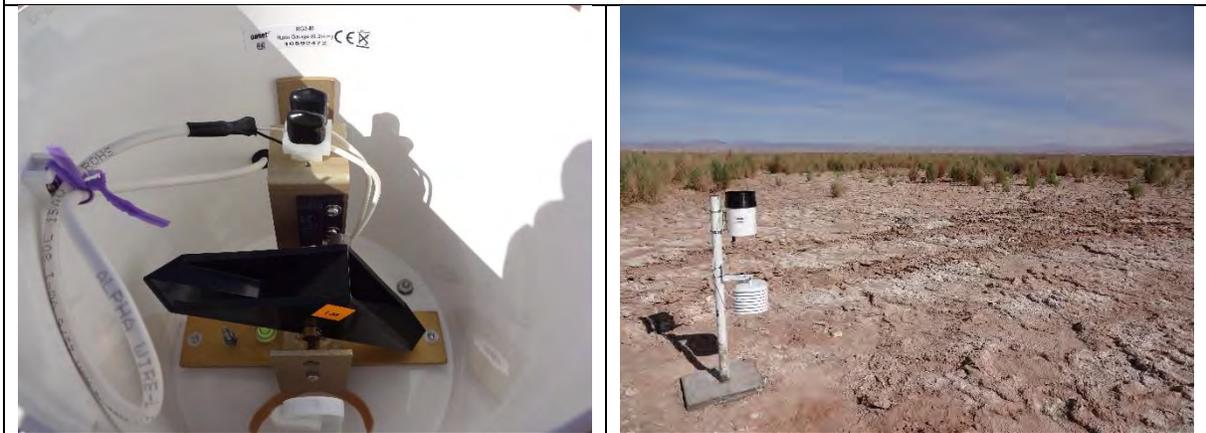


Tabla-28: Estación de monitoreo 10.

Lisímetro-10			
Nombre	Lis-10	Este	573502
		Norte	7443461
		Cota	2316
Fecha Inicio Construcción	07-12-2014	Fecha término Construcción	09-12-2014
Fecha/hora instalación data logger	15-01-2015 14:10	Fecha/hora inicio data logger	16-12-2014 06:00:00
Altura lisímetro (muestra de suelo)	100 [cm]	Nivel freático estanque (<i>n.f.</i>)	23,6 [cm]
Cod. Data logger	D4140108	Intervalo medición batería	96h:00m:00s
Intervalo medición presión	06h:00m:00s	Intervalo medición temperatura	06h:00m:00s
Parámetros de calidad			
Conductividad	5,16 [ms/cm]	pH agua estanque	8,18
Sólidos disueltos	3,3 [g/l]	Temperatura	24,23
Medidas			
c	97 [cm]	pvc	13,5 [cm]
Ecuación 10-3	$n.f. = 97,5 + 29 - 12,5 - 1 - \alpha(h - p)$		$n.f. = 113 - \alpha(h - p)$ [cm]
Observaciones			
<p>El estanque de este lisímetro sufrió daños en el hilo de la conexión a la manguera durante el traslado desde Santiago a Toconao. La conexión dañada fue sellada mediante un tapón pegado con vinilit (cemento para PVC) y luego se selló con silicona por precaución. Luego se perforó el estanque para instalar una nueva conexión a la manguera, la cual fue pegada con vinilit y luego sellada con silicona.</p> <p>El nivel freático en este lugar se encuentra a unos 180 [cm] de profundidad aproximadamente. Debido a la dificultad y el tiempo que requeriría extraer agua suficiente para llenar el estanque desde tal profundidad, se decidió utilizar la misma agua del lisímetro 9.</p> <p>El acceso a este punto se debe realizar a través del punto de acceso a laguna tebinquinche, el cual es administrado por la comunidad de Coyo. Por este motivo es necesario coordinar previamente las visitas al lugar. Durante el proceso de hincado, y luego durante la instalación final de los sensores, se invitó miembros de dicha comunidad para que conocieran la estación de monitoreo y su funcionamiento.</p> <p>Antes de instalar el sensor del estanque, el agua se encontraba a 58,5 [cm] de profundidad, por lo cual se rellenó hasta los 21,5 [cm] para así cubrir mejor la curva evaporación v/s profundidad. Una vez finalizada la instalación se midió nuevamente el nivel encontrándose este a 23,6 [cm]. Se debe manejar con precaución los datos registrados por el Dipper cuando se ha efectuado un relleno del estanque recientemente, ya que el nivel tiende a bajar rápidamente por el efecto del traspaso de agua desde el estanque hacia el suelo.</p> <p>Los datos registrados por el sensor antes de la fecha de instalación no deben ser considerados.</p>			

Fotos

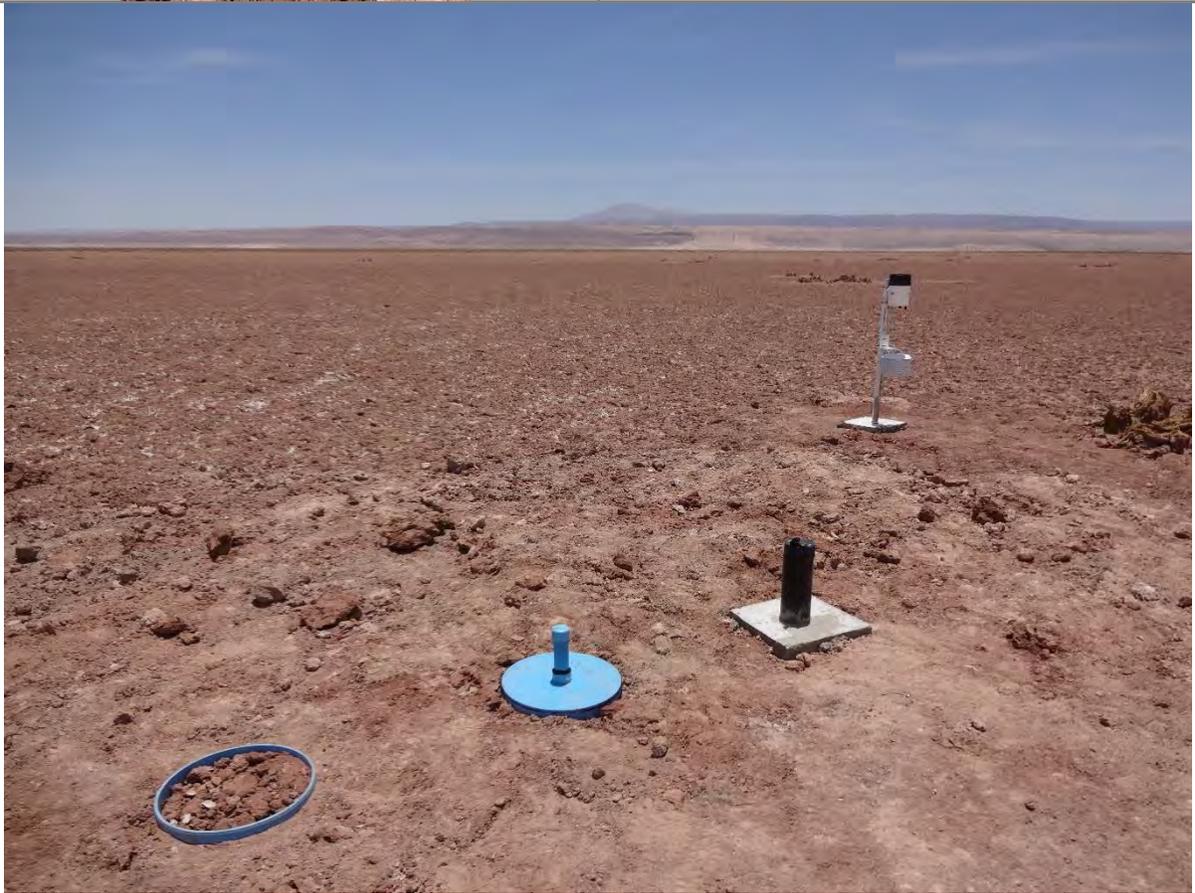


Tabla-29: Piezómetro estación de monitoreo 10.

Nombre	Plis-10	Este	573502
		Norte	7443461
		Cota	2316
Fecha inicio perforación	08-12-2014	Fecha término perforación	08-12-2014
Fecha/hora instalación data logger	15-01-2015 13:12	Fecha/hora programada inicio data logger	17-12-2014 12:00
Cod. Data logger	D4L40119	Intervalo medición batería	96h:00m:00s
Intervalo medición presión	06h:00m:00s	Intervalo medición temperatura	06h:00m:00s
Medidas			
Diámetro perforación	100 [cm]	Stick up	25,5 [cm]
Diámetro habilitación	3"	Nivel freático	160,5 [cm]
Profundidad perforación	280,5 [cm]	Profundidad Dipper	271,5 [cm]
Profundidad habilitación	267,5 [cm]	c	268 [cm]
Ecuación 10-4	$n. f. = 268 + 29 - 25,5 - \alpha(h - p)$		$n. f. = 271,5 - \alpha(h - p)$
Comentarios			
Se decidió instalar un piezómetro más largo que en el resto de los puntos de monitoreo ya que el nivel freático se encontraba a mayor profundidad. Esto fue posible comenzando la perforación con barreno desde la calicata excavada para la instalación del lisímetro, y gracias a que el suelo no presentó estratos duros en profundidad. La descripción estratigráfica fue realizada posterior al terreno de instalación.			
Estratigrafía [cm]			
0-100	Arena media y fina 65%, limo arcilloso 35%		
101-120	Costra semi dura de carbonato		
121-190	Arena media y fina 50%, limo arcilloso 50%		
Fotos			
			

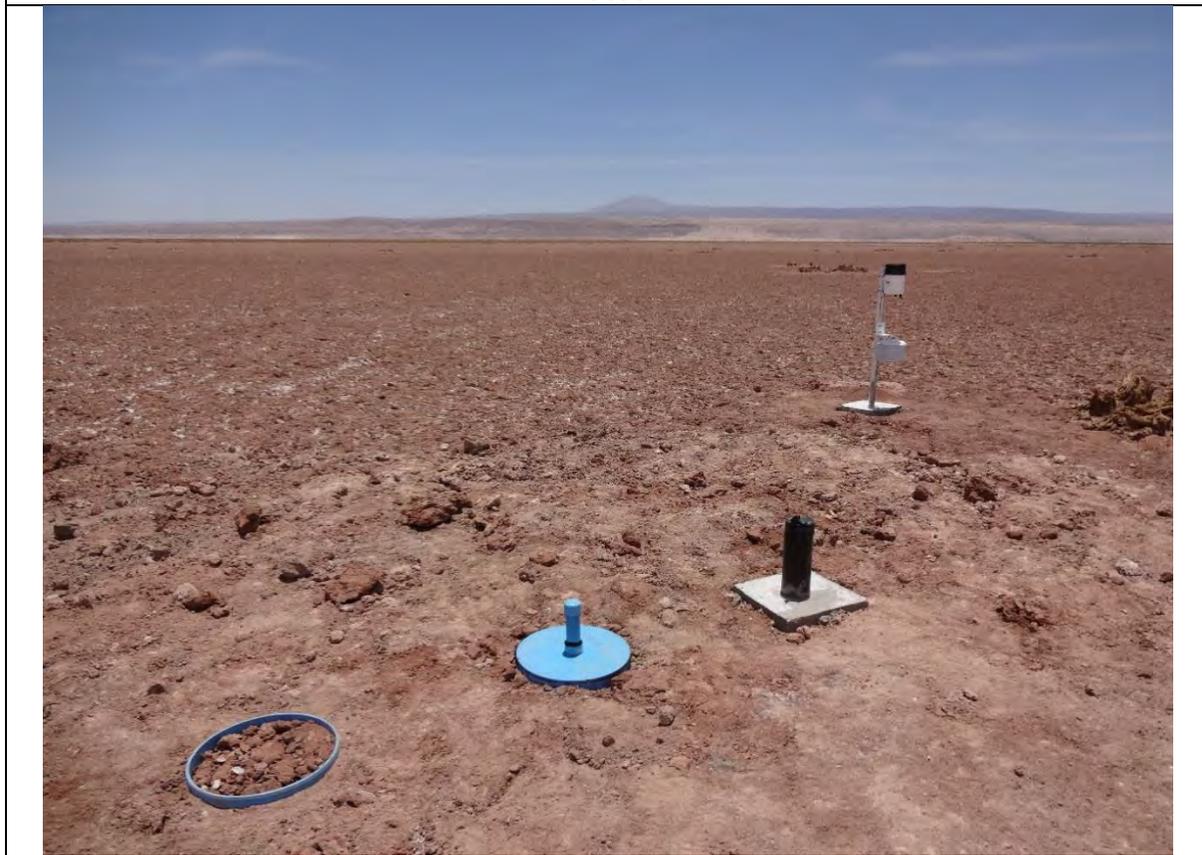
Tabla-30: Pluviómetro estación de monitoreo 10.

Nombre	PL-10	Este	573502	
		Norte	7443461	
		Cota	2316	
Fecha/hora instalación	19-12-2014 17:40	Fecha/hora programada inicio	-	
N° serie del sensor	10592462	Intervalo medición temperatura	01h:00m:00s	
Intervalo medición precipitación	Cada 0,2 [mm] de agua caída	Altura bandeja del pluviómetro	117,5	[cm]
		Altura sensor de temperatura	48±2	[cm]

Comentarios

Este pluviómetro fue instalado durante la última campaña de instalación de lisímetros, realizada entre el 16 y 24 de Diciembre de 2014. En esa ocasión no se registró la fecha y hora programada de inicio del sensor, sin embargo esta información se obtendrá una vez que se rescaten los datos en terreno.

Fotos



Anexo 9: Ficha piezómetros adicionales

Piezómetro DGA-2

Nombre	DGA-02	Este	577977	
		Norte	7369049	
		Cota	2319	
Características de diseño				
Fecha Inicio perforación	24-11-2014	Diámetro perforación	100	[mm]
Fecha término Construcción	24-11-2014	Profundidad perforación	178,5	[cm]
Stick up	55,5	[cm]	Diámetro habilitación	3"
Profundidad nivel freático	-	[cm]	Profundidad habilitación	165,5 [cm]
Estratigrafía [cm]				
0-178,5	Suelo con 90% de arcilla y 10% de arena fina			
Otros	Últimos 20 [cm] con olor fuerte			
Fotos				
				

Piezómetro DGA-3

Nombre	DGA-03		Este	572401	
			Norte	7374970	
			Cota	2299	
Características de diseño					
Fecha Inicio perforación	24-11-2014		Diámetro perforación	100	[mm]
Fecha término Construcción	24-11-2014		Profundidad perforación	193,5	[cm]
Stick up	40	[cm]	Diámetro habilitación	3"	
Profundidad nivel freático	50	[cm]	Profundidad habilitación	180,5	[cm]
Estratigrafía [cm]					
0-5		Costra de sulfato semi dura			
6-193,5		Suelo negro con 80% de arcilla y 20% de arena fina y presencia de carbonato			
Otros		Se observaron intercalaciones de limo café y gris sin presencia de carbonato. El suelo negro viene acompañado de olor fuerte.			
Fotos					
					

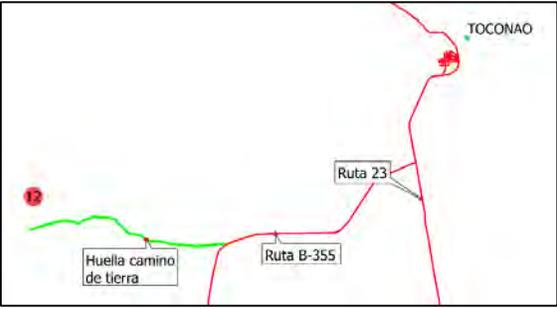
Piezómetro DGA-4

Nombre	DGA-04		Este	593374	
			Norte	7389036	
			Cota	2309	
Características de diseño					
Fecha Inicio perforación	07-12-2014		Diámetro perforación	100	[mm]
Fecha término Construcción	07-12-2014		Profundidad perforación	190	[cm]
Stick up	40	[cm]	Diámetro habilitación	3"	
Profundidad nivel freático	75	[cm]	Profundidad habilitación	177	[cm]
Estratigrafía [cm]					
0-10		Costra de yeso semi dura			
11-100		Arena media y fina 60%, limo y arcilla 40%. Suelo color café			
101-170		Suelo color negro. Arena gruesa y media 95%, finos 5%			
171-190		Limo arcilloso negro con olor fuerte			
Fotos					
					

Piezómetro DGA-10

Nombre	DGA-10		Este	592321	
			Norte	7424627	
			Cota	2332	
Características de diseño					
Fecha Inicio perforación	25-11-2014		Diámetro perforación	100	[mm]
Fecha término Construcción	25-11-2014		Profundidad perforación	200	[cm]
Stick up	N/A	[cm]	Diámetro habilitación	3"	
Profundidad nivel freático	>200	[cm]	Profundidad habilitación	N/A	[cm]
Estratigrafía [cm]					
0-200	50% arena fina y media, 50% limo				
Fotos					
					

Piezómetro DGA-12

Nombre	DGA-12		Este	591589	
			Norte	7431659	
			Cota	2329	
Características de diseño					
Fecha Inicio perforación	10-09-2014		Diámetro perforación	100	[mm]
Fecha término Construcción	10-09-2014		Profundidad perforación	227	[cm]
Stick up	38	[cm]	Diámetro habilitación	3"	
Profundidad nivel freático	192	[cm]	Profundidad habilitación	227	[cm]
Estratigrafía [cm]					
Superficie	Costra eflorescente blanca				
0-180	Arcilla gris con algo de limo				
180-200	Limo y arena color gris oscuro a negro				
Accesos					
			<p>Acceso a través de la ruta B-355 (camino de tierra en buen estado) que une Toconao y Peine. Luego se debe tomar un desvío por una huella en un camino de tierra.</p>		
Fotos					
					

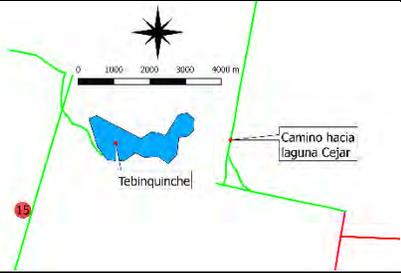
Piezómetro DGA-13

Nombre	DGA-13		Este	580336	
			Norte	7432214	
			Cota	2287	
Características de diseño					
Fecha Inicio perforación	09-12-2014		Diámetro perforación	100	[mm]
Fecha término Construcción	09-12-2014		Profundidad perforación	203	[cm]
Stick up	37	[cm]	Diámetro habilitación	3"	
Profundidad nivel freático	80	[cm]	Profundidad habilitación	190	[cm]
Estratigrafía [cm]					
0-5	Costra semi dura				
6-120	Arena fina y media 75%, fino 25%. Color café				
121-160	Arena fina y media 50%, fino 50%. Color café				
161-203	Limo arcilloso gris 90%, arena fina 10%				
Fotos					
					

Piezómetro DGA-14

Nombre	DGA-14		Este	580091	
			Norte	7435769	
			Cota	2320	
Características de diseño					
Fecha Inicio perforación	23-11-2014		Diámetro perforación	100	[mm]
Fecha término Construcción	23-11-2014		Profundidad perforación	131,2	[cm]
Stick up	38	[cm]	Diámetro habilitación	3"	
Profundidad nivel freático	100	[cm]	Profundidad habilitación	118,2	[cm]
Estratigrafía [cm]					
0-20	Costra sulfato con arcilla, de baja rugosidad (>5 cm)				
20-50	Arcilla-limo 30%, Arena media 30%, Arena gruesa 40%, Color café				
50-80	Arcilla-limo 30%, Arena media 30%, Arena gruesa 40%. Color café. Entre esta profundidad aparece una capa de yeso-arcilla color gris de unos 15 cm de espesor.				
80-120	Arcilla-limo 40%, Arena media 50%, Arena gruesa 10%. Color amarillo. Se observa además la presencia de una capa color negro (materia orgánica)				
120-160	Arcilla-limo 50%, Arena media 40%, Arena gruesa 10%				
160-170	Capa dura de arena gruesa consolidada o cementada color negra. No fue posible perforar esta capa				
Fotos					
					

Piezómetro DGA-15

Nombre	DGA-15		Este	572635	
			Norte	7439502	
			Cota	2324	
Características de diseño					
Fecha Inicio perforación	11-09-2014		Diámetro perforación	100	[mm]
Fecha término Construcción	11-09-2014		Profundidad perforación	220	[cm]
Stick up	87,5	[cm]	Diámetro habilitación	3"	
Profundidad nivel freático	75	[cm]	Profundidad habilitación	220	[cm]
Estratigrafía [cm]					
0-15	Costra de yeso y halita con sedimentos finos				
15-220	35% arcilla, 30% limo, 35% arena media. Color café				
Otros	Se observaron cristales de biotita de 0,5 [mm]				
Acceso					
			<p>Acceso a través de un camino que bordea la laguna Tebinquinche por su borde sur.</p>		
Fotos					
					

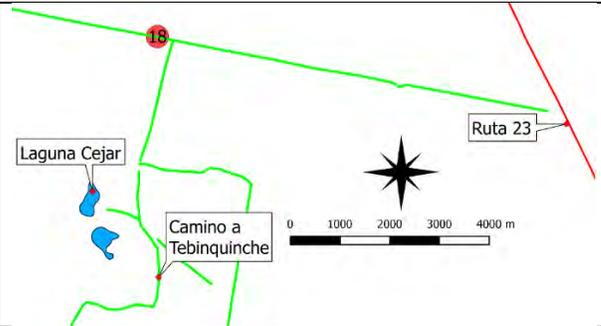
Piezómetro DGA-16

Nombre	DGA-16		Este	578528	
			Norte	7442574	
			Cota	2322	
Características de diseño					
Fecha Inicio perforación	25-11-2014		Diámetro perforación	100	[mm]
Fecha término Construcción	25-11-2014		Profundidad perforación	200	[cm]
Stick up	N/A	[cm]	Diámetro habilitación	3"	
Profundidad nivel freático	>200	[cm]	Profundidad habilitación	N/A	[cm]
Estratigrafía [cm]					
0-200		70% arena fina, 30% limo			
Fotos					
					

Piezómetro DGA-17

Nombre	DGA-17		Este	583057	
			Norte	7445792	
			Cota	2317	
Características de diseño					
Fecha Inicio perforación	23-11-2014		Diámetro perforación	100	[mm]
Fecha término Construcción	23-11-2014		Profundidad perforación	202	[cm]
Stick up	38	[cm]	Diámetro habilitación	3"	
Profundidad nivel freático	-	[cm]	Profundidad habilitación	189	[cm]
Estratigrafía [cm]					
0-10	Costra yeso-arcilla color café pálido poco rugosa (<5cm)				
10-130	Arcilla 25% Limo 50% Arena media 20% Arena gruesa 5% Sedimento homogéneo sin estratificación color café				
140-202	Yeso 30% Arcilla-limo 50% Arena media 20% Sedimentos color gris.				
Fotos					
					

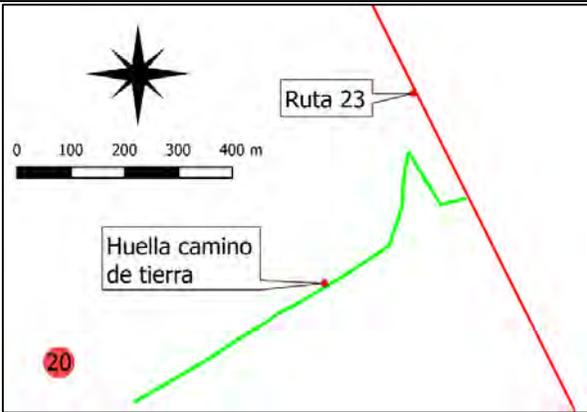
Piezómetro DGA-18

Nombre	DGA-18		Este	581768	
			Norte	7453259	
			Cota	2360	
Características de diseño					
Fecha Inicio perforación	10-09-2014		Diámetro perforación	100	[mm]
Fecha término Construcción	10-09-2014		Profundidad perforación	200	[cm]
Stick up	-	-	Diámetro habilitación	-	
Profundidad nivel freático	>200	[cm]	Profundidad habilitación	-	
Estratigrafía [cm]					
0-200		90% Arcilla café			
Observaciones					
Luego de perforar aproximadamente 200 [cm], no se dio con el nivel freático, encontrándose el suelo húmedo a partir de los 30 [cm] de profundidad.					
Acceso					
			<p>Acceso a través del camino que va hacia Laguna Cejar desde la ruta 23.</p>		
Fotos					
					

Piezómetro DGA-19

Nombre	DGA-19		Este	576235
			Norte	7453810
			Cota	2360
Características de diseño				
Fecha Inicio perforación	10-09-2014		Diámetro perforación	100 [mm]
Fecha término Construcción	10-09-2014		Profundidad perforación	200 [cm]
Stick up	-	-	Diámetro habilitación	-
Profundidad nivel freático	>200	[cm]	Profundidad habilitación	-
Estratigrafía [cm]				
0-200	90% arcilla limosa café, 10% arena fina			
Observaciones				
Luego de perforar aproximadamente 200 [cm], no se dio con el nivel intersecta el nivel freático, encontrándose el suelo completamente seco hasta esa profundidad.				
Acceso				
			<p>Acceso a través del camino que va hacia Laguna Cejar desde la ruta 23.</p>	

Piezómetro DGA-20

Nombre	DGA-20		Este	587620	
			Norte	7454575	
			Cota	2361	
Características de diseño					
Fecha Inicio perforación	10-09-2014		Diámetro perforación	100	[mm]
Fecha término Construcción	10-09-2014		Profundidad perforación	204,5	[cm]
Stick up	17,5	[cm]	Diámetro habilitación	3"	
Profundidad nivel freático	190	[cm]	Profundidad habilitación	200	[cm]
Estratigrafía [cm]					
0-120	Arcilla limosa café				
120-122	Yeso cristalino				
122-200	90% arena media-fina color negro-gris, 10% arcilla				
Observaciones					
			<p>Lugar de fácil acceso a través de la ruta 23 en su kilómetro 116.2, aproximadamente a 1 [km] de dicho punto.</p>		
Fotos					
					

Anexo 10: Sistema de información geográfica (SIG)

Se adjunta en el CD del proyecto los archivos del SIG.