



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



“Caracterización hidrogeológica e hidroquímica del sector sur del Salar de Atacama, II región de Antofagasta, Chile”

*Tesis para optar al título de Magister en Recursos Hídricos y Medio Ambiente
Facultad de Geología
Universidad de Málaga*

Catalina Ahumada Aldunate

Índice de Contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Consideraciones Generales	1
1.2	Área de estudio y accesos	2
1.3	Objetivos.....	4
1.3.1	Objetivo General	4
1.3.2	Objetivos Específicos.....	4
2	Metodología	5
2.1.1	Recopilación y revisión bibliográfica.....	5
2.1.2	Caracterización geomorfológica	5
2.1.3	Caracterización geológica	6
2.1.4	Caracterización hidrológica	6
2.1.5	Caracterización hidrogeológica	6
2.1.6	Caracterización hidroquímica	8
3	Desarrollo.....	16
3.1	Descripción general del área de estudio.....	16
3.2	Caracterización geomorfológica	18
3.2.1	Geomorfología regional.....	18
3.2.2	Geomorfología local	20
3.3	Caracterización Geológica	22
3.3.1	Geología regional.....	22
3.3.2	Estratigrafía regional	24
3.3.3	Geología local	28
3.3.4	Estructuras locales.....	31
3.3.5	Geología de sub-superficie.....	34
3.4	Unidades Hidrogeológicas.....	34
3.4.1	Descripción de las unidades.....	34
3.4.2	Geometría de las unidades	39

3.5	Superficie freática y evolución de niveles	40
3.6	Geofísica.....	46
3.6.1	Métodos electromagnéticos Aplicados:	46
3.6.2	Interpretación de los métodos electromagnéticos.....	47
3.7	Marco Hidrometeorológico Regional	53
3.8	Caracterización de la Cuenca y el Salar.....	55
3.8.1	Caracterización de la cuenca y el salar	55
3.8.2	Escurrimientos Superficiales	55
3.8.3	Precipitaciones.....	59
3.8.4	Evaporación Y Evapotranspiración Media Anual	63
3.8.5	Evaporación de Tanque	65
3.8.6	Recarga y descarga	67
3.8.7	Balance Hídrico.....	71
3.9	Caracterización Hidroquímica	76
3.9.1	Tratamiento de datos	78
3.9.2	Concentraciones y composiciones químicas	79
3.9.3	Parámetros físico químicos	79
3.9.4	Elementos mayoritarios.....	82
3.9.5	Elementos minoritarios y trazas	83
4	Conclusiones.....	94
5	Bibliografía	95

Índice de Tablas

Tabla 1.	Puntos de monitoreo.....	10
Tabla 2.	Características de los envases usados para muestreo.....	12
Tabla 3.	Parámetros analizados en terreno y en laboratorio.....	14
Tabla 4.	Formaciones geológicas de la región de Antofagasta.....	26
Tabla 5.	Diferenciación de las Costras Salinas (Moraga, 1974).....	29
Tabla 5.	Ubicación de los puntos representados	43

Tabla 7. Estaciones de aforo, DGA	56
Tabla 8. Caudales medios mensuales cauces afluentes al Salar.	58
Tabla 9. Estaciones meteorológicas salar de Atacama.....	59
Tabla 10. Precipitación Interior Salar, estaciones SCL y SQM (mm)	61
Tabla 11. Zonas de Evaporación definidas por Mardones	63
Tabla 12. Estaciones con Estadística de Evaporación de Tanque.....	65
Tabla 13. Evaporación de Tanque Media Mensual (mm).....	66
Tabla 14. Caudales de Evaporación en el núcleo del Salar de Atacama	69
Tabla 15. Caudales de Evaporación en el núcleo del Salar de Atacama	71
Tabla 16. Agrupación subcuencas por sectores de demanda evapotranspirativa.....	73
Tabla 17. Balance Hídrico	75
Tabla 18. Detalle puntos de muestreo	77
Tabla 19. Mínimo, máximo y promedio parámetros físico químicos (in situ y laboratorio).....	80
Tabla 20. Mínimo, máximo y promedio elementos mayoritarios	82
Tabla 21. Mínimo, máximo y promedio elementos minoritarios	84

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación área de estudio	2
Figura 2. Vías de acceso al área del proyecto.....	3
Figura 3. Detalle ubicación lagunas Salada, Saladita e Interna.	7
Figura 4. Detalle ubicación puntos muestreados	9
Figura 5. Mapa general, área de estudio.....	16
Figura 6. Geomorfología Regional.....	19
Figura 7. Geomorfología Local.	21
Figura 8. Principales fotolineamientos del área.	28
Figura 9. Geología local y estructuras	33
Figura 10. Correlación de unidades hidrogeológicas (Dalannais,1979)	35
Figura 11. Unidades Hidrogeológicas Salar de Atacama.....	38
Figura 12. Superficie piezométrica del año 2001	41
Figura 13. Superficie piezométrica del año 2012.....	42
Figura 14. Evolución del nivel de agua y salmuera.....	44
Figura 15. Evolución del nivel en pozos de observación alejados zona de extracción.	45
Figura 16. Evolución del nivel en pozos de observación próximos a zona de extracción.....	45
Figura 17. Trazado Geofísica 2012 y 2013.....	49
Figura 18. Ríos de escorrentía permanente en el sector	54
Figura 19. Ubicación estaciones de aforo, DGA.	57
Figura 20. Variación estacional de caudal en cauces afluentes al salar	58

Figura 21. Ubicación estaciones pluviométricas	60
Figura 22. Plano Isoyetas Precipitación Anual.....	62
Figura 23. Delimitación áreas de evapotranspiración de Mardones.....	64
Figura 24. Variación Estacional de la Evaporación.....	67
Figura 25. Subcuencas aportantes	70
Figura 26. Sectores de demanda evapotranspirativa.....	72
Figura 27. Ubicación Puntos de muestreo	78
Figura 28. Diagrama de Piper Sector Núcleo	86
Figura 29. Diagrama de Piper Sistema La Punta La Brava.....	87
Figura 30. Diagrama de Piper Sistema Peine.....	88
Figura 31. Diagrama de Piper Sistema Norte	89
Figura 32. Diagrama de Piper Sector Tilopozo	90
Figura 33. Diagrama de Piper Sector Borde Tilopozo.....	91
Figura 34. Diagrama de Piper Sector Borde Oriental.....	92
Figura 35. Diagrama de Piper Sector Borde Tilomonte	93

Índice de Fotografías

Fotografía 1. Dispositivo utilizado para la extracción de muestra del punto CL-6	11
Fotografía 2. Sistema de filtrado en terreno marca Merck	12
Fotografía 3. Equipo de prospección geofísica electromagnética	50

1 Introducción

1.1 Consideraciones Generales

La II Región de Antofagasta de Chile se extiende aproximadamente entre los 20°56´ y 26°05´ de latitud sur, y desde 67°00´ de longitud oeste hasta el Océano Pacífico. Debido al crecimiento acelerado de la Región producto del desarrollo de múltiples proyectos mineros, agronómicos y turísticos, se ha visto rápidamente enfrentada a un nuevo escenario, cuyo efecto principal ha sido, entre otros, el inminente incremento en las demandas del recurso hídrico. Dicho efecto se ha visto reflejado en la abundancia de solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, solicitudes de áreas de exploración y de regularizaciones que registran los organismos públicos. Los proyectos en desarrollo se concentran principalmente en las zonas pre-andinas y altoandinas de la II Región, en la cual se centra el presente estudio.

Reflejo del escenario anteriormente planteado es la existencia de los proyectos mineros: Chuquicamata, Ministro Hales, Radomiro Tomic, El Abra, El Tesoro, Tuina, entre otros, y, a los que debe sumarse, tanto el permanente incentivo realizado por la CONADI (Corporación Nacional para el Desarrollo Indígena) para el desarrollo de actividad agrícola por parte de las comunidades indígenas de la zona (Aymaras, Atacameños, etc), como el incremento en la demanda turística del sector, asociado a las masivas visitas que se producen en la zona de San Pedro de Atacama y el campo geotérmico de los Géiseres del Tatio, así como también hacia el sector donde se ubica el proyecto astronómico *Atacama Large Millimeter Array* (ALMA), todo lo cual ha traído como consecuencia directa un aumento sustancial de la población flotante de la región y, por consiguiente, una mayor demanda del recurso hídrico.

El presente Trabajo de Fin de Máster corresponde a la realización de un estudio de caracterización hidrogeológica e hidroquímica del sector sur del Salar de Atacama, el salar más grande del territorio nacional chileno, con una superficie aproximada de 3000 km², el que ha concitado en repetidas oportunidades el interés de diversos investigadores del ámbito de la hidrogeología y los recursos hídricos, dadas las altas concentraciones de litio y potasio presentes en su salmuera.

La cuenca del Salar de Atacama es una cuenca tectónica cerrada, rellena parcialmente por sedimentos clásticos y evaporitas que, debido a la recarga y evaporación continuas ha generado un núcleo salino central cercano a los 1.400 km², compuesto casi exclusivamente de cloruro de sodio. Las características topográficas de la cuenca del salar, con una leve inclinación hacia el sur, han permitido la mayor concentración de salmueras en el sector centro sur del salar y es en esta área donde se concentran las actividades de explotación de litio y potasio.

1.2 Área de estudio y accesos

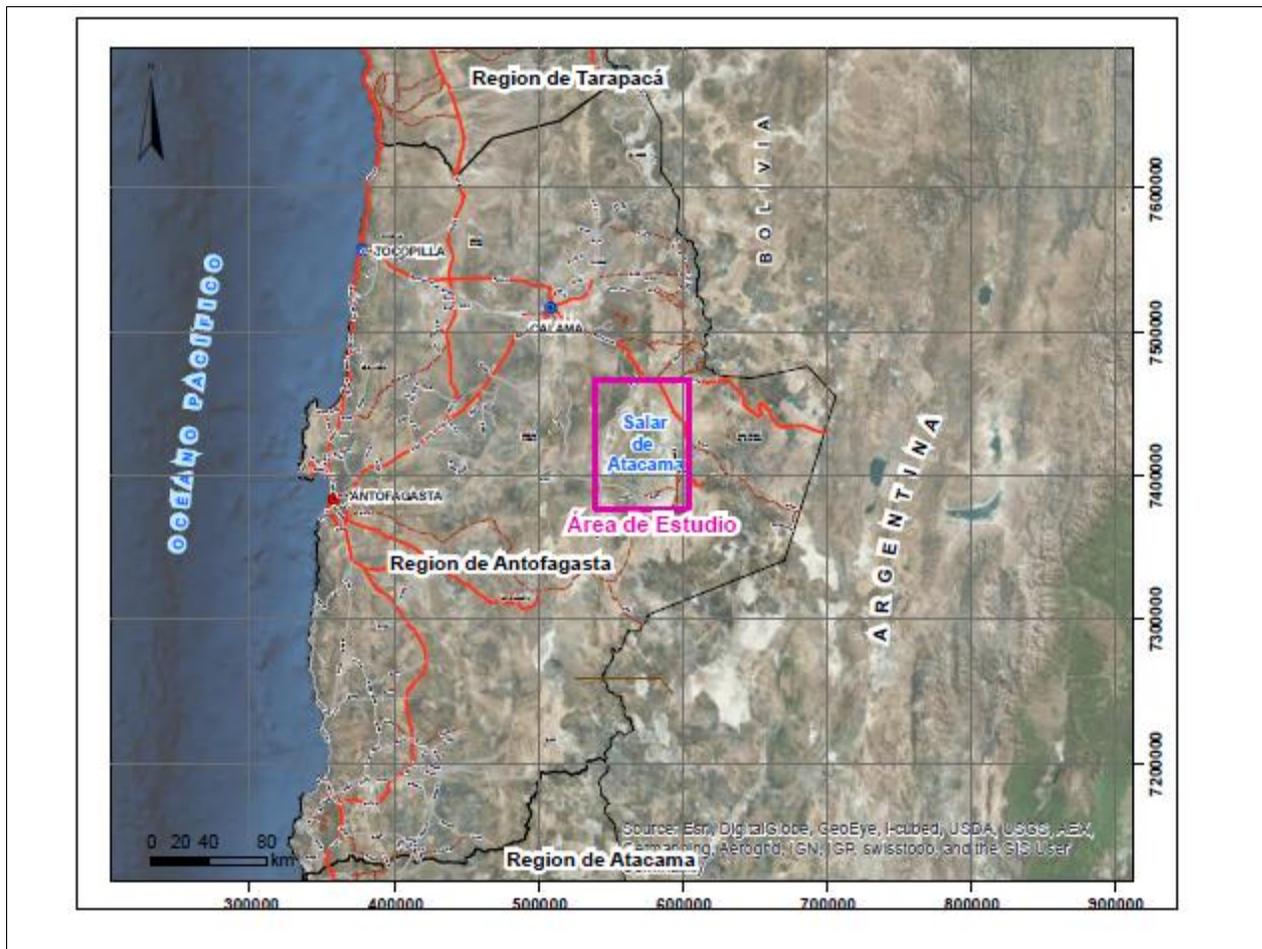


Figura 1. Ubicación área de estudio

El área de estudio forma parte de la cuenca del Salar de Atacama, la cual administrativamente se encuentra en la comuna de San Pedro de Atacama, sector este de la región de Antofagasta, limítrofe con Argentina y Bolivia.

A escala local, el área de estudio se localiza en el sector centro-occidental del territorio comunal de San Pedro de Atacama. La superficie comunal es de 23.439 km² y cuenta con una población aproximada de 5.000 habitantes, distribuidos principalmente en los centros poblados de San Pedro de Atacama, Toconao, Socaire y Peine.

Desde Calama, el acceso es por la Ruta Internacional 23-CH, que une dicha ciudad con el paso internacional Sico, en el límite con Argentina. Se trata de una ruta asfaltada desde Calama hasta la localidad de Toconao, donde se puede acceder a la ruta 355-B, que recorre el borde oriental del salar y que permite conectarse con la localidad de Peine y con la planta de

explotación de litio, Rockwood Lithium. Las principales vías de acceso al área de estudio se presentan a continuación en la figura 2.

Desde Antofagasta es posible acceder al Salar de Atacama a través de la ruta 5 Norte, la cual - desde la localidad de Baquedano- conecta con la ruta 385-B, que se inserta hacia el este hasta el sector sur del Salar de Atacama.

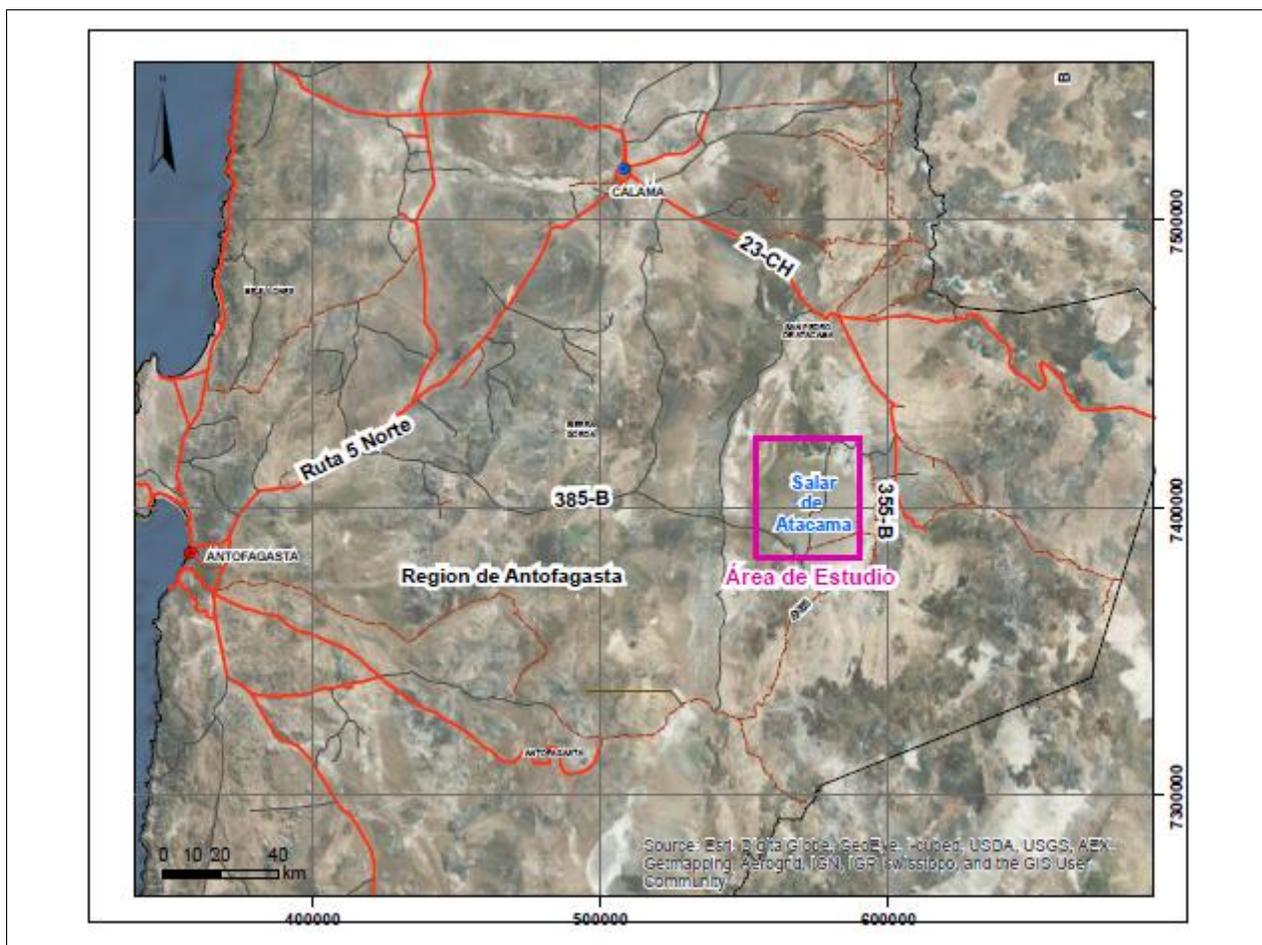


Figura 2. Vías de acceso al área del proyecto

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo General*

El objetivo general del presente estudio es la caracterización hidrogeológica e hidroquímica del sector sur del Salar de Atacama.

1.3.2 *Objetivos Específicos*

- Realizar una caracterización hidrogeológica general del sector sur del Salar de Atacama.
- Realizar una caracterización hidroquímica de las aguas del sector sur del Salar de Atacama.

2 Metodología

2.1.1 Recopilación y revisión bibliográfica

Se realizó una recopilación bibliográfica de documentos con antecedentes del sector de estudio. Los antecedentes se revisaron exhaustivamente, para después realizar una selección de la información de mayor relevancia en el marco del presente estudio.

Se recurrió a trabajos de investigación, artículos, congresos, memorias y tesis afines, publicados por organizaciones tales como Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) y Dirección General de Aguas (DGA).

2.1.2 Caracterización geomorfológica

La caracterización geomorfológica permite la definición de unidades de relieve, tanto regionales como locales. De ésta manera, se buscó poder identificar los rasgos característicos propios de la geomorfología del área de estudio.

Este apartado se logró mediante la revisión bibliográfica del trabajo efectuado por Börgel (1983), junto con el estudio e interpretación de las imágenes satelitales provistas por el software “Google Earth”.

2.1.3 Caracterización geológica

La descripción de unidades litológicas y de depósitos sedimentarios del área de estudio se logró a partir de la revisión de distintos documentos. En primer lugar, la carta geológica hoja de “Toconao”, a escala 1:250.000, publicada por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), se utilizó en la definición del marco geológico general de la región donde se inserta el área de estudio. El trabajo de Chong (1974) permitió describir la geología local con mayor detalle.

El mapa geológico se logró a través del uso del software ArcMap 10.1, y el reconocimiento de estructuras geológicas se apoyó en la observación de las imágenes satelitales de la zona provistas por el software “Google Earth”.

2.1.4 Caracterización hidrológica

La descripción climática, precipitaciones y evaporación de la zona se basó en la revisión de bibliografía relacionada, además del uso de datos de estaciones meteorológicas, proporcionados por la Dirección General de Aguas (DGA).

La definición de las redes de escorrentía de la zona fue posible mediante la observación de imágenes satelitales de la zona provistas por el software “Google Earth” y del software ArcMap 10.1.

2.1.5 Caracterización hidrogeológica

El análisis conjunto de todos los antecedentes recopilados, dieron origen a la caracterización hidrogeológica del área de estudio.

El registro de niveles con que se contó, corresponde a data histórica provista por la compañía minera Rockwood Lithium.

La caracterización geométrica del acuífero se logró en base a información de sondeos realizados en el sector, reconocimiento en campo, y apoyo de imágenes, provisto por el software “Google Earth”.

En cuanto a la información geofísica, se contó con la información de dos áreas de estudio, la primera corresponde al lugar donde se ubican las lagunas La Punta y La Brava, y la segunda donde se ubican las lagunas Salada, Saladita e Interna.

En el primer sector, se efectuaron mediciones en el año 2012. Se ejecutaron 4 perfiles de dirección norte-sur, que en total alcanzaron a los 22,2 km de TEM y 24,6 km de NanoTEM. (Sondeos electromagnéticos transitorios en el dominio del tiempo)

Estos perfiles fueron complementados durante la campaña desarrollada en el año 2013 con tres perfiles de orientación norte sur, a los cuales se añadió otro en dirección este oeste. Se alcanzó en esta campaña un total de 28,5 km en TEM y 29,2 km en NanoTEM.

En el área de Salada, Saladita e Interna, se realizó una campaña durante el año 2013 con la ejecución de 3 perfiles en dirección norte-sur y uno en dirección este-oeste. La extensión total de los perfiles fue de 40,4 km de TEM y 40,6 km de NanoTEM.

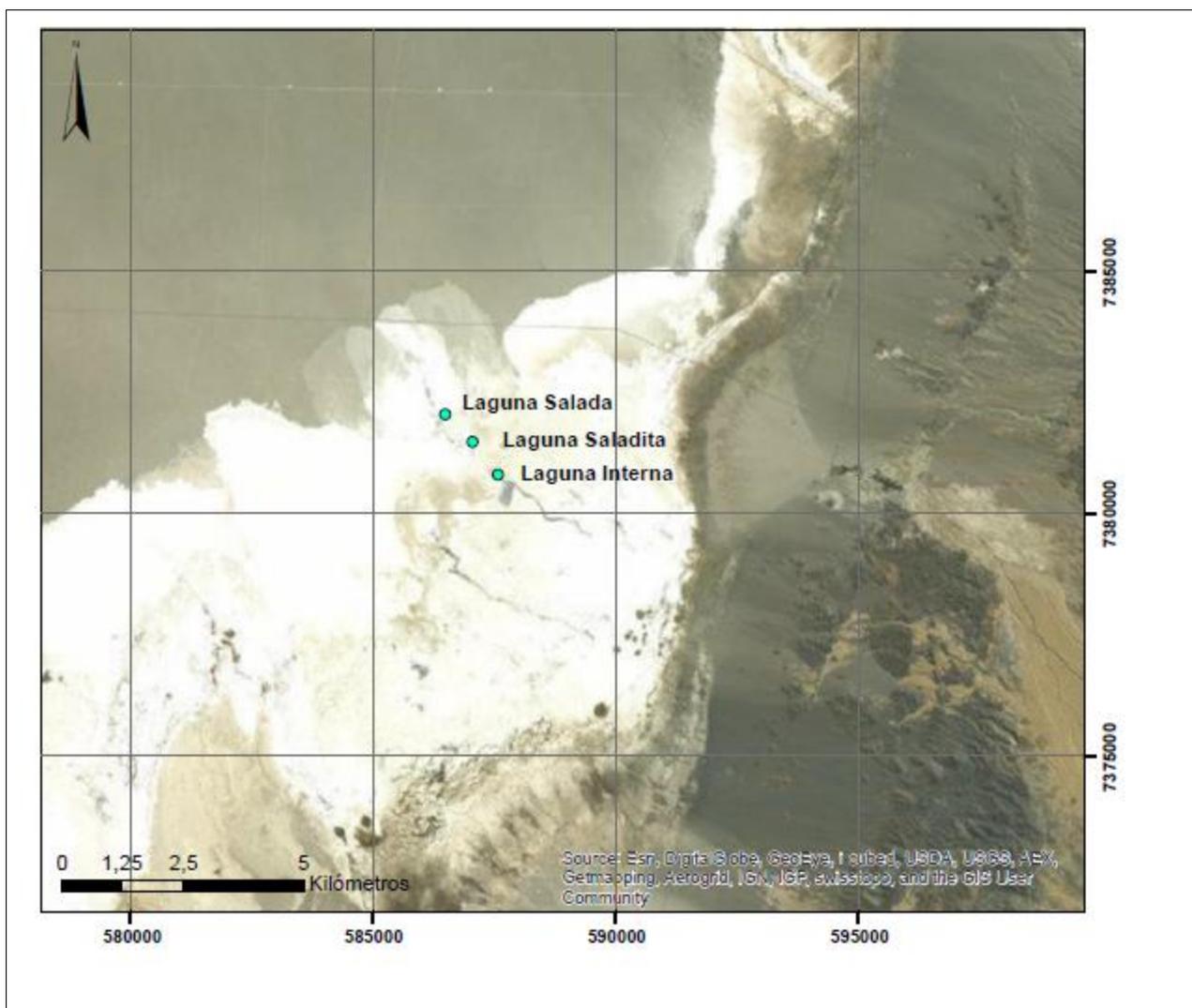


Figura 3. Detalle ubicación lagunas Salada, Saladita e Interna.

2.1.6 Caracterización hidroquímica

La caracterización hidroquímica de las aguas superficiales y subterráneas de la cuenca del Salar de Atacama se ha realizado a partir del análisis de resultados químicos de una serie de campañas de muestreo mensual que se están llevando a cabo en el marco de este proyecto desde Febrero 2013.

Estas actividades de muestreo consisten en la medición mensual de parámetros físico químicos in situ y análisis de la calidad físico-química del agua en laboratorio. Posteriormente se realiza en gabinete la interpretación de estos resultados.

A continuación se presenta la descripción de las campañas de muestreo realizadas

- Campañas de muestreo realizadas

- ✓ *Primera campaña de muestreo (Inicios de Febrero de 2013)*

Se muestrearon la mayoría los puntos de agua superficial presentes en el sector sur del Salar de Atacama. En esta etapa se recopiló información de 5 puntos de agua superficial y 11 puntos de agua subterráneas.

- ✓ *Segunda campaña de muestreo (Finales de Febrero de 2013)*

Se realizó el levantamiento y muestreo de los puntos de agua superficial a los cuales no se pudo acceder en la primera campaña, además de los puntos de agua subterránea del sector sur del Salar de Atacama. En este terreno se realizó el levantamiento de información de 21 puntos de agua subterránea y 6 puntos de agua superficial.

- ✓ *Tercera campaña de muestreo (Marzo de 2013)*

Se llevó a cabo del 19 al 25 de marzo de 2013, donde se realizó el levantamiento y muestreo de los puntos de agua superficial y subterránea del sector Norte del Salar de Atacama y los puntos del sector sur pendientes de levantar. Además, se realizó el perfil de conductividad en un pozo ubicado en el sector de Tilopozo (TP-1) y para un pozo ubicado en el núcleo del salar (S-4). En esta campaña se realizó el levantamiento de información de 30 pozos y 6 puntos de agua superficial.

✓ Cuarta campaña de muestreo (Abril de 2013)

Realizada en el mes de abril, entre los días 16 y 21, sólo se realizó el muestreo químico de aguas de los sistemas de lagunas Salada, Saladita e Interna y La Punta – La Brava.

La ubicación de todos los puntos visitados durante estas campañas se muestra en la figura 4, mientras que la tabla 1, resume las características de su ubicación y accesibilidad.

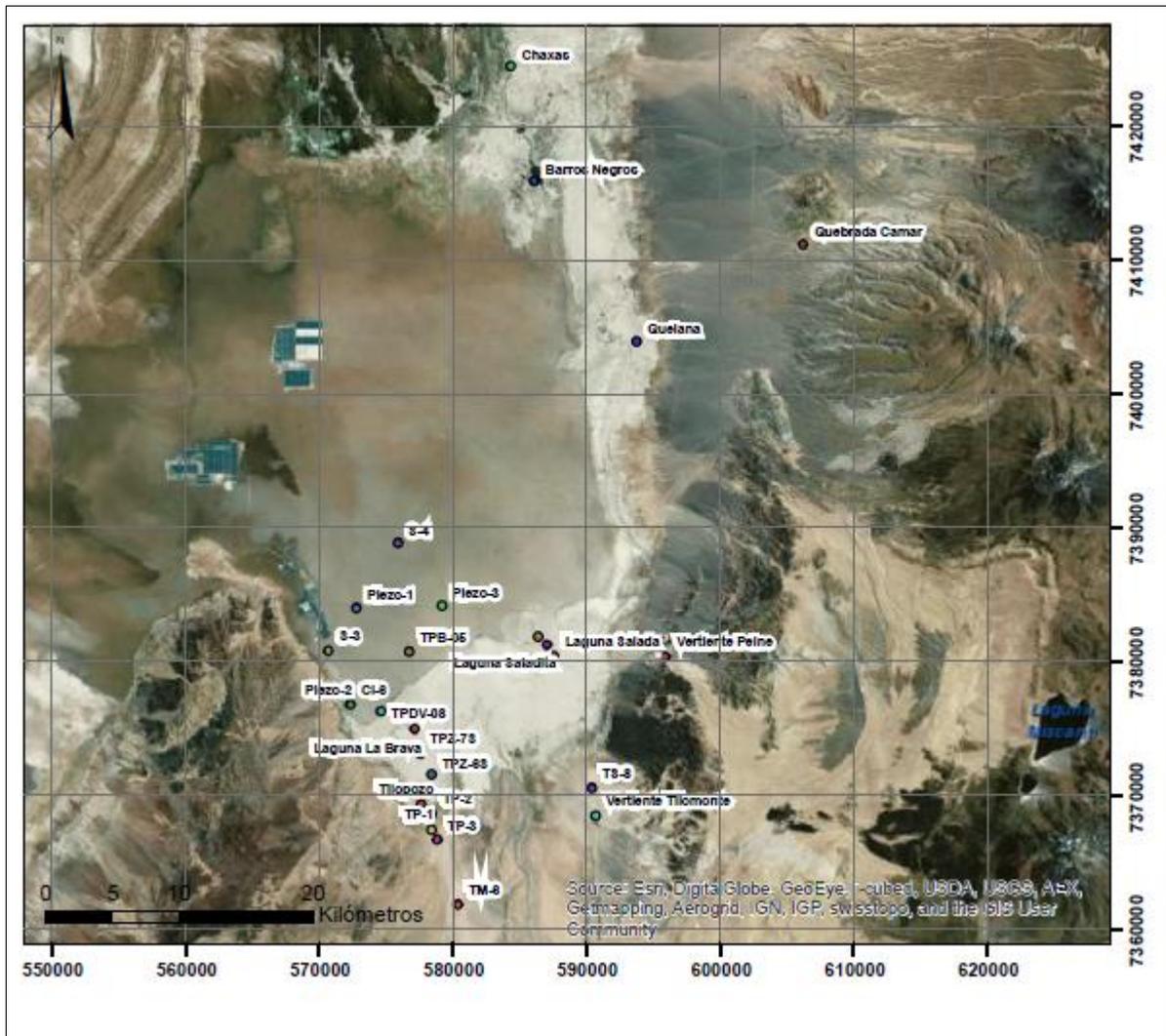


Figura 4. Detalle ubicación puntos muestreados

Con toda la información recopilada se estableció una red de muestreo que contiene diversos puntos de agua superficial y subterránea.

Punto	WGS 84		Cota (m.s.n.m.)	Tipo Punto	Propiedad Punto	Aptitud Muestreo	Sector	Accesibilidad Punto
	Norte	Este						
S-3	7.380.963,00	570.769,00	2.313	Pozo	Rockwood Lithium	Si	Núcleo	Con acceso, con candado
S-4	7.388.857,00	575.982,00	2.307	Pozo	Rockwood Lithium	Si	Núcleo	Con acceso, sin candado
CL-6 *	7.376.982,00	572.417,00	2.308	Pozo	Rockwood Lithium	Si	Núcleo	Con acceso, con candado
TPB-05	7.380.932,00	576.841,00	2.310	Pozo	Minera Escondida	Si	Núcleo	Con acceso, sin candado
Piezo-1	7.384.032,00	572.836,00	2.304	Pozo	Rockwood Lithium	Si	Núcleo	Con acceso, con candado
Piezo-2	7.376.979,00	572.468,00	2.306	Pozo	Rockwood Lithium	Si	Núcleo	Con acceso, con candado
Piezo-3	7.384.211,00	579.260,00	2.312	Pozo	Rockwood Lithium	Si	Núcleo	Con acceso, con candado
TPDV-08	7.376.450,00	574.719,00	2.313	Puntera	Minera Escondida	Si	Núcleo	Con acceso, sin candado
Laguna La Punta	7.376.600,00	578.263,00	2.311	Laguna	-	Si	Sistema La Punta - La Brava	Con acceso, sin candado
Laguna La Brava	7.375.129,00	577.265,00	-	Laguna	-	-	Sistema La Punta - La Brava	Con acceso, sin candado
Laguna La Brava Punto C	7.375.129,00	577.265,00	2.312	Laguna	-	Si	Sistema La Punta - La Brava	Con acceso, sin candado
Laguna Interna	7.382.075,00	586.500,00	2.312	Laguna	Comunidad Peine	Si	Sistema Peine	Con acceso, con barrera
Laguna Salada	7.380.623,00	587.679,00	2.311	Laguna	Comunidad Peine	Si	Sistema Peine	Con acceso, con barrera
Laguna Saladita	7.381.467,00	587.109,00	2.313	Laguna	Comunidad Peine	Si	Sistema Peine	Con acceso, con barrera
PZ-8	7.376.229,00	581.372,00	2.311	Puntera	Minera Escondida	Si	Sector Tilopozo	Con acceso, sin candado
TPZ-6S	7.371.707,00	578.506,00	2.305	Hoyo	S/I	Si	Sector Tilopozo	Con acceso, sin candado
TPZ-7S	7.373.277,00	577.630,00	2.310	Hoyo	S/I	Si	Sector Tilopozo	Con acceso, sin candado
Tucucaro	7.373.189,00	572.973,00	2.309	Calicata	Rockwood Lithium	Si	Sector Tilopozo	Con acceso, sin candado
TM-6	7.362.006,00	580.451,00	2.424	Pozo	Minera Escondida	Si	Borde Sector Tilopozo	Con acceso, sin candado
TP-1	7.367.609,00	578.502,00	2.327	Pozo	Minera Escondida	Si	Borde Sector Tilopozo	Con acceso, sin candado
TP-2	7.368.807,00	578.501,00	2.325	Pozo	Minera Escondida	Si	Borde Sector Tilopozo	Con acceso, sin candado
TP-3	7.366.866,00	578.924,00	2.336	Pozo	Minera Escondida	Si	Borde Sector Tilopozo	Con acceso, sin candado
Tilopozo	7.369.523,00	577.712,00	-	Calicata	Rockwood Lithium	Si	Borde Sector Tilopozo	Con acceso, con barrera
TS-8 (a)	7.370.743,00	590.469,00	2.351	Pozo	S/I	Si	Borde Sector Tilomonte	Con acceso, sin candado
Vertiente Tilomonte	7.368.684,00	590.777,00	2.376	Vertiente	-	Si	Borde Sector Tilomonte	Con acceso, sin candado
Quebrada Camar	7.411.194,00	606.314,00	2.722	Quebrada	-	Si	Borde Oriental	Con acceso, sin candado
Vertiente Peine	7.380.542,00	596.010,00	2.461	Vertiente	-	Si	Borde Oriental	Con acceso, sin candado
Laguna Chaxas	7.424.471,00	584.434,00	2.309	Laguna	CONAF	Si	Sistema Norte	Con acceso, con permiso
Laguna Quelana	7.403.903,00	593.855,00	2.308	Laguna	CONAF	Si	Sistema Norte	Con acceso, con permiso
Laguna Barros Negros	7.415.908,00	586.194,00	2.298	Laguna	-	Si	Sistema Norte	Con acceso, con permiso

Observaciones: (*) Presenta contenido de aceite en el agua y la tubería

Tabla 1. Puntos de monitoreo

- Metodología de muestreo y preservación de muestras

En cada uno de los puntos de la red de muestreo, se miden in situ los parámetros físico-químicos del agua (temperatura, conductividad eléctrica, pH, y alcalinidad), y se toman varios envases de muestra de agua para su análisis de composición química en laboratorio. En el caso de las aguas subterráneas se mide también la profundidad del nivel piezométrico.

Los trabajos de muestreo se realizan según lo establecido en la legislación ambiental vigente, es decir, de acuerdo con la norma de muestreo de aguas superficiales y subterráneas NCh 411.

Los análisis químicos se realizan en el laboratorio SGS Chile, que cuenta con las certificaciones ISO 9001 y 14001, y acreditaciones LE632, LE117 que habilitan al laboratorio para realizar ensayos en el área físico-química, específicamente para aguas.

A continuación, se presenta una breve descripción de las metodologías de toma de muestras de agua, y almacenamiento y transporte de las mismas:

✓ Toma de muestras

Las muestras de agua superficiales se obtuvieron directamente del punto de muestreo. En algunos casos, cuando no se pudo acceder directamente al mismo (por hundimiento del terreno u otros), se realizó la toma de muestra de agua utilizando una bomba peristáltica, marca Geotech, que dispone de una manguera para tomar las muestras.

Las muestras de agua subterránea fueron tomadas con una segunda bomba peristáltica, marca Geotech, idéntica a la descrita anteriormente.

Las muestras de agua subterránea fueron obtenidas de dos formas diferentes:

En los pozos con acceso se utilizó un envase desechable de 1,66 pulgadas de diámetro y 1 metro aproximado de largo, el cual tiene capacidad para un litro de líquido, dicho envase se denomina bailer.

En los pozos que son propiedad de terceros, no pudo efectuarse un bombeo previo para la toma de muestra, y únicamente aquellos puntos con el nivel estático por encima de los 5 metros, fueron purgados con la bomba peristáltica por un tiempo de 10-15 minutos, previo a la toma de la muestra de agua.



Fotografía 1. Dispositivo utilizado para la extracción de muestra del punto CL-6

Para la medición de los parámetros físico-químicos *in situ* se utilizó un equipo marca Hanna Instruments, modelo HI 9828, que mide pH, conductividad eléctrica y temperatura.

✓ Almacenamiento y transporte de las muestras obtenidas

En la tabla 2, se muestran las características de los envases, los volúmenes de muestra, los preservantes para los distintos parámetros a analizar en cada uno de los puntos de muestreo.

Cantidad Envases	Tipo de Envases	Volumen requerido (l)	Preservación requerida	Parámetros a medir
2	PAD	1	Refrigeración a 4°C	Parámetros generales: pH, Conductividad, Cloruros, Sólidos Totales disueltos
1	PAD	1	Adición ácido nítrico hasta pH < 2 y refrigeración a 4°C	Metales totales: Ca, Mg, Na, K, Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, Si, Sr, V, Zn
1	PAD	1	Adición ácido nítrico hasta pH < 2 y refrigeración a 4°C Filtrado en terreno a 0,45 µm	Metales disueltos: Zn, Si, Ag, Li, Sr, Ba, B, As, Ca, K, Mg, Na
1	PAD	0,5	Refrigeración a 4°C	Bromuros
1	Vidrio esterilizado transparente	1	Adición ácido clorhídrico, Refrigeración a 4°C	Grasas y aceites

Tabla 2. Características de los envases usados para muestreo

Ante la complejidad del filtrado *in situ* de las muestras por la cantidad de sales en suspensión que presentan la mayoría de ellas, se tomó adicional a los set de envases enviados por el laboratorio, 1 litro de muestra natural en cada punto de muestreo, para ser filtrada a 0,45 µm con el sistema de filtrado marca Merck, de 250 ml de capacidad.



Fotografía 2. Sistema de filtrado en terreno marca Merck

Todos los envases fueron conservados a una temperatura de 4°C hasta el momento de su análisis en el laboratorio SGS Chile, en Santiago. El traslado de las muestras se realizó 2 veces por semana, con apoyo logístico de Rockwood Lithium y fueron transportadas por la empresa de transportes Chilexpress desde la ciudad de Antofagasta hasta el laboratorio antes mencionado.

✓ Parámetros de monitoreo y análisis de laboratorio

Los parámetros analizados en cada uno de los puntos de monitoreo tanto en terreno como en el laboratorio se presentan en la tabla a continuación

	Parámetros FQ in situ	pH Conductividad Temperatura Alcalinidad
	Parámetros FQ laboratorio	pH Conductividad Temperatura Alcalinidad
Elementos mayoritarios	Totales	Calcio Potasio Magnesio Sodio Cloruro Sulfato Bicarbonatos Nitratos
	Disueltos	Calcio Potasio Magnesio Sodio
Elementos minoritarios	Disueltos	Fluoruros Bromuros Plata Arsénico Boro Bario Litio Silicio Estroncio Zinc
	Totales	Plata Aluminio Arsénico Boro Bario Berilio Cadmio Cobalto Cromo Cobre Hierro Litio Manganeso Molibdeno Níquel Plomo Selenio Silicio Estroncio Vanadio Zinc

Tabla 3. Parámetros analizados en terreno y en laboratorio

Algunos de los elementos minoritarios que en las aguas salobres y saladas se considera que podrían encontrarse en concentraciones relativamente elevadas, se han analizado también en su concentración disuelta para, en caso de ser necesario, considerar su concentración en el cálculo del error del balance iónico, el cual sirve para verificar la calidad de los resultados obtenidos.

Los elementos analizados como totales son aquellos que se consideran en la norma de agua de riego (Nch 1333) o bien en la norma de agua potable (Nch 409/1).

3 Desarrollo

3.1 Descripción general del área de estudio

La Región de Antofagasta ocupa un rango latitudinal que va desde los 20°56' a los 26°05' de latitud sur, y longitudinalmente, desde los 67°00' de longitud oeste hasta el océano Pacífico. Su superficie es de 126.049 km²

La ciudad y puerto de Antofagasta es su capital regional y está dividida en tres provincias: Tocopilla (capital: Tocopilla), Antofagasta (capital: Antofagasta) y El Loa (capital: Calama). El área de estudio se encuentra inserta en la provincia de El Loa y el núcleo de población próximo de mayor tamaño es San Pedro de Atacama, capital arqueológica de Chile.



Figura 5. Mapa general, área de estudio

Su principal actividad económica es, sin duda, la minería, que representa el 62,52% del PIB regional. En segundo lugar, la actividad agrícola de comunidades indígenas, junto con el turismo, conforman los mayores ingresos en la región.

En cuanto a la vegetación de la zona, la escasez hídrica y las extremas temperaturas registradas, son factores que hacen difícil el desarrollo de aquella, a excepción de algunos sectores donde es posible identificar desarrollo de vegetación de borde, asociada al afloramiento de aguas subterráneas o a la cercanía de un cauce de agua superficial. Ejemplo de esto son las vegas y bofedales. Especies destacadas son la Brea, Grama salada y el Cachiyuyo.

La fauna más representativa del sector es sin duda la de flamencos (andino y chileno), que habita en sectores de fango y lagunas. Sus centros de nidificación se han identificado en las lagunas Chaxa y Barros Negros. En menor medida es posible identificar en el sector; golondrinas, pequeños y aguiluchos.

3.2 Caracterización geomorfológica

3.2.1 *Geomorfología regional*

La región de Antofagasta se encuentra en la zona definida por Börgel (1983) como “Región septentrional de las pampas desérticas y cordillera prealtiplánicas”.

El área de estudio se ubica dentro de la unidad definida como “Gran Fosa” y está rodeada al oeste por la Precordillera de Domeyko y al este por la Cordillera Prealtiplánica. Estas unidades presentan una dirección norte-sur y, de oeste a este, son:

- a) Cordillera de Domeyko: constituida por un cordón montañoso continuo con una altura promedio de 3000 m.s.n.m. hacia el oriente y una franja de serranías y planicies.
- b) Gran Fosa de los Salares Prealtiplánicos: presenta 180 km de longitud y en ella se ubican numerosos salares. El más representativo es el Salar de Atacama, donde la Gran Fosa presenta su mayor amplitud este-oeste, con 85 km. Se encuentra ubicada a 2300 m.s.n.m.
- c) Cordillera Prealtiplánica: se trata de una zona inclinada constituida por una faja de conos de deyección coalescentes drenada por angostas quebradas de hasta 200 m de profundidad y se encuentra parcialmente interrumpida hacia el sur por un cordón montañoso discontinuo de dirección norte – sur que alcanza una altura de hasta 3200 m.s.n.m.
- d) Cordillera de los Andes: constituida por planicies de altura media 4200 m y numerosos aparatos volcánicas con alturas máximas de hasta 6046 m.s.n.m.

La figura 6 muestra las unidades geomorfológicas donde se inserta el área de estudio, El Salar de Atacama, así como las unidades adyacentes.

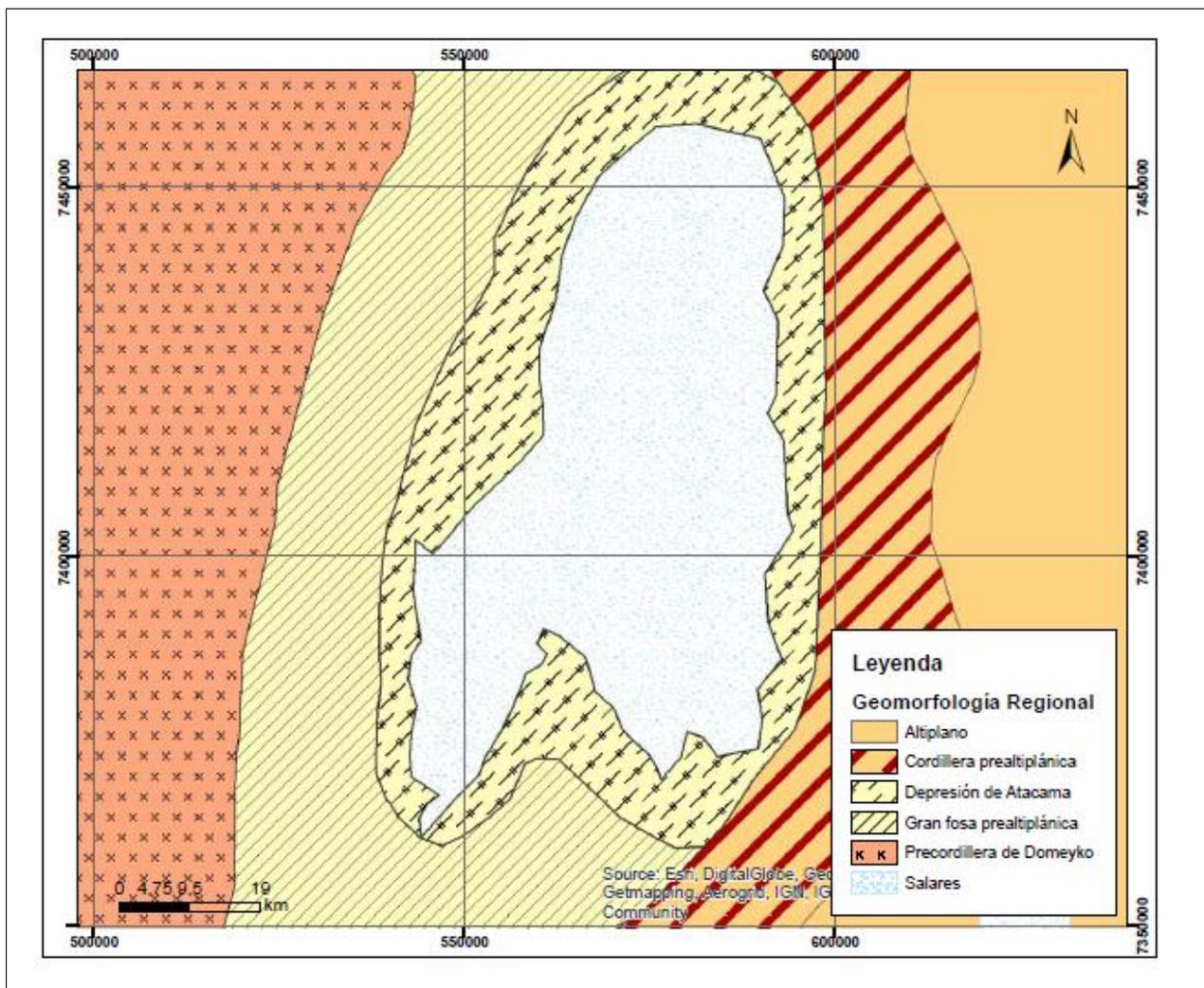


Figura 6. Geomorfología Regional.

Fuente: Modificado de Instituto Geográfico Militar (2010)

3.2.2 Geomorfología local

Localmente, en la unidad definida por Börgel (1983) como “Gran Fosa Prealtiplánica” se diferencian una serie de subunidades geomorfológicas, las que son:

- a) Llano de la Paciencia: Situado entre la Cordillera Domeyko y la Cordillera de la Sal. Presenta una altura promedio de 2300 m.s.n.m. Es una depresión alargada con orientación norte – sur que presenta 80 km de longitud y 8 km de ancho.
- b) Cordillera de la Sal: Cordón montañoso con una altura promedio de 2500 m.s.n.m y 4 km de ancho.
- c) Salar de Atacama: corresponde a una cuenca tectónica, que ocupa una superficie de 3500 km². Se encuentra ubicada a una altura media de 2300 m.s.n.m. Presenta una superficie en forma elíptica con orientación de norte a sur y una ligera pendiente hacia el sur. Está constituida en un 75% de depósitos salinos que le confieren una superficie rugosa.
- d) Cordón de Lila: Ubicado al sur del Salar de Atacama. Presenta una altura promedio de 3200 m.s.n.m. Su relieve es abrupto y está escarpado por numerosas quebradas con orientación noreste hacia oriente y noroeste hacia occidente.

A continuación se presenta la figura 7, donde se representan espacialmente las subunidades identificadas.

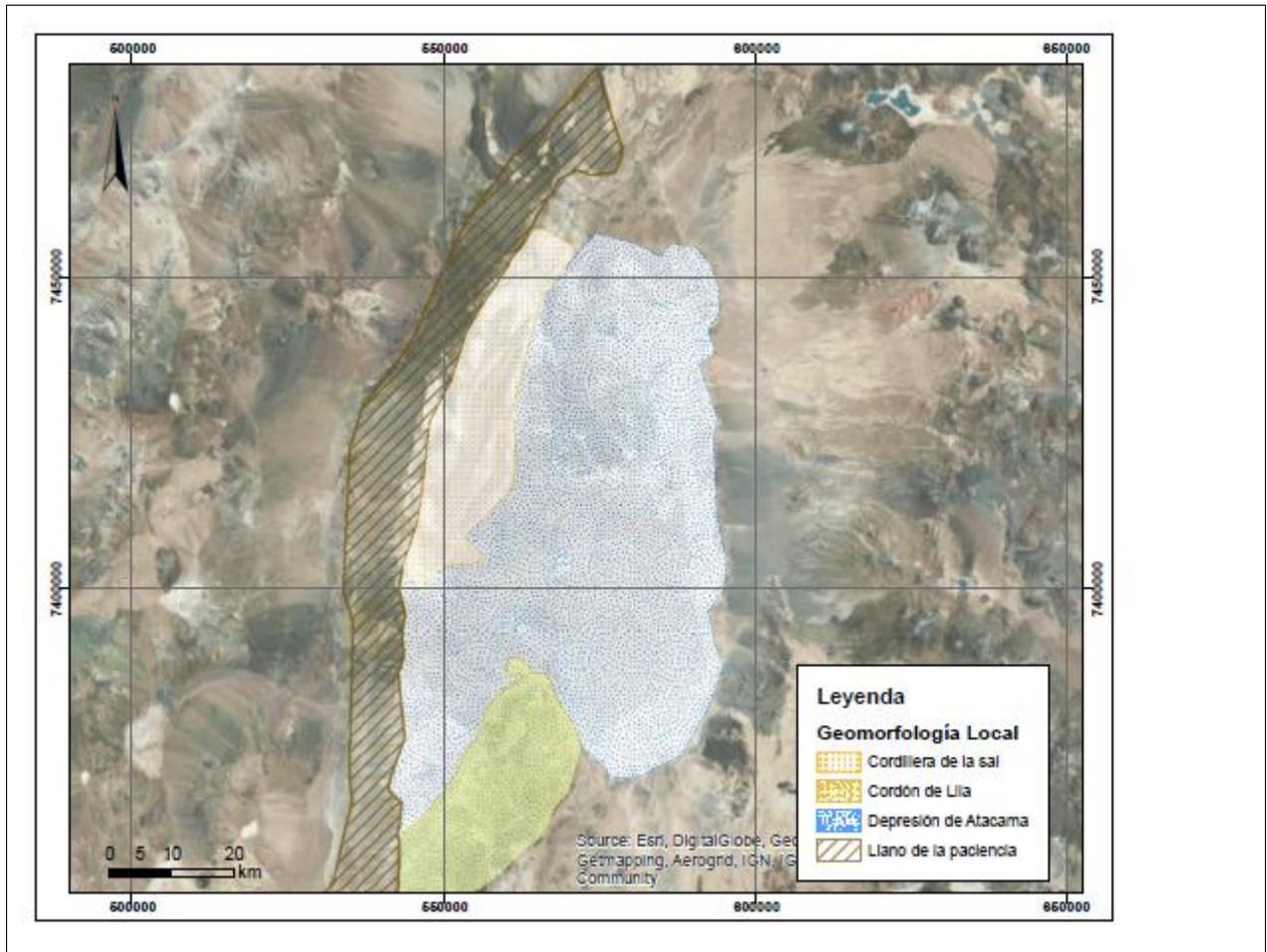


Figura 7. Geomorfología Local.

3.3 Caracterización Geológica

3.3.1 *Geología regional*

De acuerdo con los antecedentes revisados previamente y a la información recopilada, las rocas más antiguas expuestas en el Salar de Atacama se asignan al Paleozoico. Corresponden a la Formación Chinchilla y Cas. Debido a la escasez de afloramientos pertenecientes a este periodo, no se puede reconstruir los eventos acaecidos en esta época ni tampoco se puede definir una relación exacta entre los contactos de los materiales Paleozoicos y los suprayacentes Triásicos. Sin embargo, se pueden reconocer cinco fases de deformación posteriores al Paleozoico descritas a continuación:

La primera fase de deformación es reconocida por una discordancia angular que separa los materiales de los estratos El Bordo y los suprayacentes de la formación Agua Dulce. Tras la deposición de los estratos El Bordo en el Triásico Inferior, en un ambiente de lago continental restringido, se depositó, discordantemente, la Formación Agua Dulce, en un ambiente continental con desarrollo de volcanismo activo. Posteriormente, durante el evento marino acaecido en el Jurásico, se depositó concordantemente, sobre la Formación Agua Dulce, el grupo Caracoles, compuesto por las siguientes formaciones: Torcazas, Caracoles, Doralisa, Millonaria y Honda.

A principios del Cretácico se depositó la formación Purilactis, con algunas intercalaciones de evaporitas en un ambiente puramente continental y se produjo la segunda fase de deformación documentada principalmente por la presencia de abundantes cantos rodados calizos con fósiles, pertenecientes al grupo Caracoles en la base de los conglomerados de la Formación Purilactis. Se produjo el plegamiento de las capas Jurásicas que afectó también a la formación Purilactis y se formó una cuenca continental. Tras el plegamiento y un periodo de erosión de los materiales, se depositó, en el Eoceno, la formación Cinchado que sobreyace, en discordancia angular erosiva con la Formación Purilactis.

El límite Eoceno-Oligoceno determina una tercera fase tectónica, que configuró los rasgos geomorfológicos principales de la región tales como la Cordillera Domeyko, Cuenca Cordillera de la Sal-Salar, Cordón de Lila, la Precordillera y el Altiplano. Estas unidades estructurales se hayan limitadas por fallas regionales.

Entre el Oligoceno y el Mioceno Medio, se depositó la formación Tambores en un medio continental aluvial gradado a piedemonte y concordante con la formación San Pedro, depositada esta última en cuencas intracratónicas de aguas salobres.

La cuarta etapa de deformación se asigna al Mioceno Superior en la que se produjo una reactivación de estructuras a nivel regional que afectó a las Formaciones Tambores y San

Pedro. Se cree que el plegamiento de la Formación San Pedro que dio origen a la Cordillera de la Sal se produjo en este periodo con la reactivación de la falla inversa del flanco oriental de la Cordillera de Domeyko.

En el Mioceno Superior comenzaron a depositarse la Formación Vilama y los depósitos aterrizados. La presencia de fósiles en formación Vilama indica que se depositó en una cuenca de agua dulce o mínimamente salobre en un área de actividad volcánica indicada por la presencia de cenizas. Esta formación sobreyace en discordancia angular sobre la Ignimbrita Pilón.

A finales del Neógeno se depositó la Formación El Tambo, también en un ambiente lagunar. Las terrazas incluidas en la formación Vilama se cree están asociadas a un movimiento regional de la corteza o a un cambio climático que determinaría el fin del ambiente lagunar.

El último evento tectónico se cree que estaría relacionado con un evento de fallamiento normal que podría haber ocurrido cerca del límite Plioceno–Pleistoceno y que podría haber originado los bordes actuales del Salar de Atacama.

A comienzos del Cuaternario, continuó la deposición de sedimentos propios del ambiente lagunar (formación Vilama). Las terrazas que se incluyen en esta formación, son posteriores al depósito de las rocas sedimentarias. Este cambio de nivel va asociado a un movimiento de la corteza regional y/o cambios climáticos, los cuales determinaron la eliminación del ambiente lagunar por una disminución de la tributación fluvial.

Este cambio de régimen hizo evolucionar la actividad y ambiente de la cuenca transformándose gradualmente en un salar y depositándose gruesas capas de evaporitas y otros sedimentos (Formación San Pedro).

Las estructuras más modernas corresponden a las fallas del “graben” de Tilocalar, que afectan a la Ignimbrita Tucúcaro (Plioceno).

Por último, cabe mencionar que la cuenca del Salar de Atacama constituye un área tectónica activa hasta el momento actual. Desde el Paleozoico a tiempos presentes, ha estado sometida a una actividad volcánica elevada en la que se han ido depositando discordantemente a las formaciones mencionadas anteriormente tanto ignimbritas como rocas volcánicas, materiales encontrados principalmente en la Cordillera y Precordillera de los Andes. También ha sufrido intrusismo de rocas plutónicas que se localizan casi exclusivamente en la Cordillera Domeyko y Cordón de Lila.

3.3.2 Estratigrafía regional

A continuación se presenta en la tabla 4, las formaciones Geológicas que conforman la región de Antofagasta, mostrados en la carta geológica de Chile, escala 1:250.000. hoja Toconao (1982)

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

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

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

Tabla 4. Formaciones geológicas de la región de Antofagasta.

Fuente: Modificado de carta geológica hoja Toconao, 1982.

A continuación se mencionan y describen los elementos estructurales más característicos de cada uno de los siete dominios en que se encuentra dividida el área del Salar de Atacama, de acuerdo con lo definido por Ramírez y Gardeweg (1982) en la hoja geológica Toconao.

El elemento más destacado en la Cordillera de la Sal es un sistema complejo de anticlinales y sinclinales, dirección noreste-suroeste, que afecta fundamentalmente a las formaciones San Pedro y El Campamento.

El este de la Cordillera Domeyko se caracteriza por estar limitada por dos fallas inversas de magnitud regional y buzamiento hacia el oeste que desplaza los granitoides cretácicos y rocas pre-jurásicas sobre la formación Purilactis. Además se observan numerosos anticlinales y sinclinales que afectan a las formaciones del Jurásico Superior y Cretácico.

El rasgo estructural más característico de la Cordillera Domeyko hacia el oeste es un lineamiento en el sector de quebrada Escondida, que se extiende con rumbo noreste, hasta un sistema de fallas conjugadas rumbo noroeste, localizado en el área de Cerro 14 de Febrero.

Al sur del salar, en el Cordón de Lila, se observa una gran falla inversa con rumbo norte sur y manteo al oeste cuyo bloque occidental cabalga sobre el bloque oriental. Esta falla está asociada a un sistema de fallas normales más pequeñas con rumbo nor noroeste.

Al sureste del Salar, el graben de Tilocalar se encuentra limitado por un sistema de fallas normales, subverticales, de rumbo general norte sur. Este sistema de fallas tiene una longitud de unos 20 kilómetros, y limita un graben con dirección norte sur. Dicho graben está limitado al este por fallas normales con manteo hacia el oeste y salto vertical de unos 200 m. Las fallas que lo limitan por el oeste tienen buzamiento hacia el este y desplazamiento variable de 30 a 100 m. El desplazamiento total entre el fondo del graben y las superficies externas no afectadas por las fallas es de unos 400 m.

Al oriente de Peine, en la zona de Cerros Islas de la Precordillera de los Andes, destacan principalmente dos fallas inversas anteriores al depósito de la Ignimbrita Patao; una de rumbo noreste y manteo sureste, donde la formación Cas se eleva ligeramente a los miembros inferior y medio de la Formación Peine y otra de rumbo noroeste y manteo al este. Destacan también, dos fallas inversas posteriores al depósito de la Ignimbrita, una con rumbo norte sur y manteo al oeste y otra que coincide con un lineamiento regional reconocida en el borde oeste de la laguna Miscanti.

En la zona de la Cordillera de los Andes se reconocen numerosos fotolineamientos que probablemente influyan directamente en el volcanismo de la zona. El fotolineamiento de mayor importancia es aquel relacionado con la falla de la quebrada Nacimiento. Posee un rumbo noreste, de unos 120 km de longitud. Adyacente a este elemento se encuentran numerosos centros volcánicos y algunos lineamientos menores que se distinguen de rumbo noreste. Ambos sistemas son interrumpidos por otro sistema de similar extensión con rumbo noroeste, que coincide con el eje mayor del cordón volcánico de Punta Negras, al este de Peine.

Se muestra a continuación en la figura 8, los principales fotolineamientos de la región descritos anteriormente:

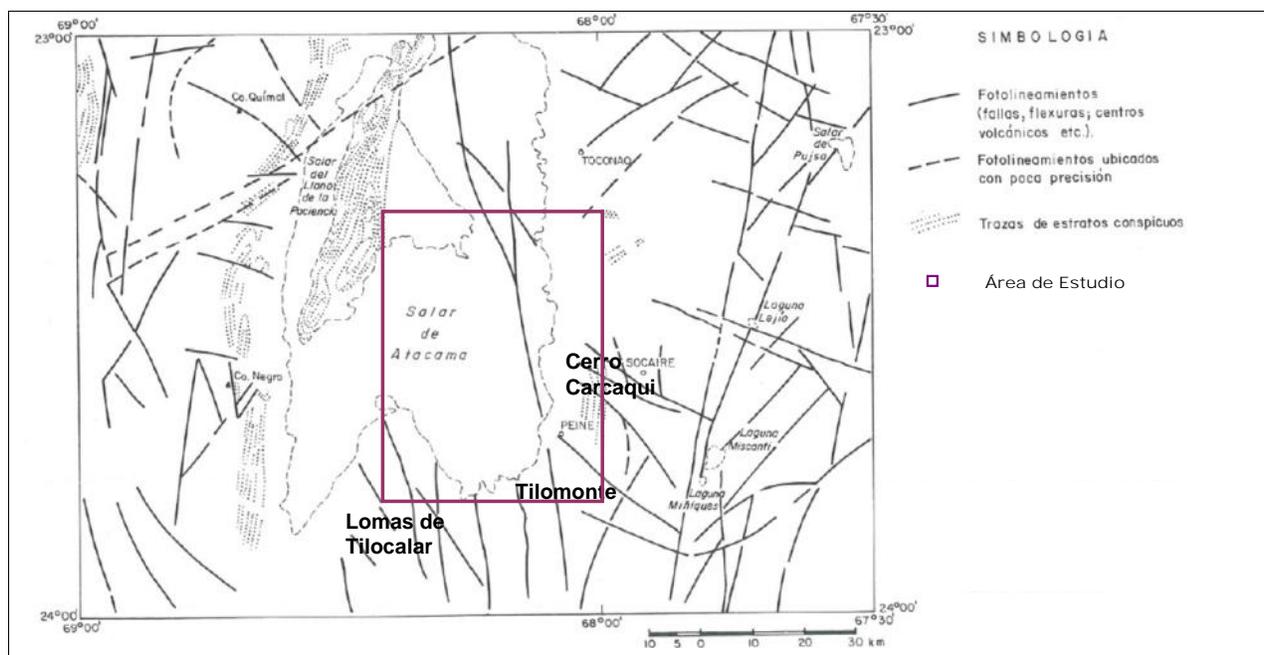


Figura 8. Principales fotolineamientos del área.

3.3.3 Geología local

En base a los trabajos realizados por Ramírez y Gardeweg (1982) en la Hoja Toconao, de y Moraga y Chong (1974) se describen a continuación las unidades geológicas que afloran en el área de estudio, las que se clasifican y describen como sigue:

Depósitos Salinos: Se trata de una cubierta evaporítica o “costra” con niveles freáticos someros que se divide en varias unidades mapeadas diferenciadas por su composición química y mineralogía.

En el salar es posible diferenciar tres grupos de unidades, que en los bordes norte, sur y este mantienen una sectorización bien definida. Esta zonación corresponde a una deposición fraccionada de los materiales clásticos y precipitación de sólidos disueltos controlada por una saturación paulatina hacia el centro del salar de acuerdo a su granulometría y solubilidad.

De acuerdo a las características físicas y químico mineralógicas del Salar de Atacama se han diferenciado las siguientes unidades salinas:

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

Tabla 5. Diferenciación de las Costras Salinas (Moraga, 1974)

Fuente: Modificado de Moraga, 1974

- *Costra de Limos Salinos:* Las fracciones más finas de los materiales aluviales que limitan al salar se ubican en los márgenes de este cono de depósitos de limos y arcillas de gran contenido salino consistente principalmente en yeso (Qs-1a) y cloruro sódico (Qs-1b). No existen contactos definidos y variaciones locales entre estas dos unidades pero se estima que los cloruros aumentan hacia el centro del salar. En zonas donde hay escurrimientos superficiales aparecen materiales más gruesos, arenas y gravilla en parte cementados con sales. Las unidades son pardo rojizas con agrietamientos poligonales y estructuras de disolución. El contenido en agua varía estacionalmente.
- *Costras Cloruro Yesífera:* A continuación de la zona de limos salinos y hacia el centro del Salar se reconocen tres unidades formadas principalmente por halita y yeso con carbonatos esporádicos

- i) Costras de cloruros y Limos (Qs-2a): Corresponde a una zona de transición entre las unidades limosas y salinas propiamente dichas. En general mantienen el mismo aspecto que los limos salinos pero con un contenido de halita significativamente mayor manteniéndose cantidades subordinadas de yeso.
 - ii) Costra de cloruros formando glóbulos (Qs-2b): Se observan en general en zonas de lagunas someras con fondos de limos orgánicos. En su mayoría están secas y sobre ellas se han formado glóbulos de cloruro sódico que tienen un aspecto coloforme y un espesor no superior a 1.5 cm bajo los que se encuentran limos oscuros. En forma irregular la sal blanca presenta manchas amarillas claras.
 - iii) Costra acordonada de Cloruros con incrustaciones de yeso (Qs-2c): Es una costra seca de color crema claro con microrelieve áspero de altura promedio 25 cm y agrietamiento poligonal con crecimiento de cloruro sódico entre las fracturas.
- *Costras Yesíferas*: se diferencian tres tipos dispuestos desde afuera hacia a dentro del salar:
- i) Costras de superficie plana con sulfatos (Qs-3a) Superficie plana y seca formada por yeso pulverulento con una cubierta superficial de unos 2 cm, siguiendo hacia yeso granular en algunos casos con intercalaciones detríticas.
 - ii) Costra de Sulfatos con escasos cloruros (Qs-3b). Costra crema claro con micro relieve áspero de altura promedio de 25 cm con una altura máxima de 50 cm, su composición es casi exclusivamente yeso y las costras poseen agrietamientos poligonales con crecimientos de sal blanca y rosada.
 - iii) Costras de sulfatos y cloruros (Qs-3c) En general presenta el mismo aspecto físico que la unidad (Qs-3b) pero hay un aumento gradual en la cantidad de cloruro y el yeso forma una cubierta sobre los cloruros.
- *Costra de Transición de cloruros*. Se encuentran rodeando al núcleo en una franja de unos 100 metros de promedio, se sitúa en la zona de transición de cloruros de color blanco a crema claro y están constituidos fundamentalmente por cloruro de sodio, De acuerdo a su aspecto físico se diferencia en tres tipos.
- i) Costra de cloruros superficie coloforme (Qs-4a), son de color blanco con costras nodulares de hasta 50 cm de alto con cuarteamientos poligonales.

Hay abundantes lagunas y la costra es, a veces, solo una delgada cubierta sobre una superficie de salmuera con materia orgánica.

- ii) Costra de cloruros superficie Plana con grietas rellenas de cloruros (Qs-4b)
Es una superficie plana de color crema claro, relativamente dura, sobre la cual se encuentra un reticulado con un relieve positivo de color blanco grisáceo de unos 10 cm formado por el crecimiento de sales en las fracturas de los polígonos.
 - iii) Costra de cloruros, superficie algo rugosa, Limo a solo 10 cm de la superficie (Qs-4c): Unidad blanco grisácea, lisa, con abundante agrietamiento en polígonos. Superficialmente presenta cloruros de sodio, apareciendo limos con pequeñas cantidades de carbonatos a los 10 cm de profundidad. Son abundantes las burbujas de sal.
- *Costra Núcleo de cloruros*. Ocupan aproximadamente dos tercios de la superficie del salar y con un microrelieve promedio de 0.50 m sobre el resto de eflorescencias y costras, por su aspecto se diferencian dos tipos:
- i) Costra de cloruros (Qs-5a): Superficialmente es pardo medio a oscuro y blanco, son costras duras de bordes dentados e intensamente fracturados por agrietamientos poligonales, sobrelevantamientos, rotación, y crecimiento de sales en las fracturas.
 - ii) Costra de cloruro Pardo claras originadas por un mayor aporte de agua. (Qs-5b): aparece principalmente en el borde este de la cordillera de la sal.
 - iii) Costra de cloruro Pardo oscuro originado por un mayor aporte de agua (Qs-5c): Aparecen en la parte este de la península Chépica y en el delta del río San Pedro.

3.3.4 Estructuras locales

De acuerdo con el trabajo efectuado por Ramírez y Gardeweg (1982), en el área de emplazamiento del proyecto se distinguen principalmente las siguientes estructuras:

Al sur del Salar, en el Cordón de Lila, se distingue una falla inversa de rumbo N-S y manteo de 45° hacia el oeste. Se observa que el bloque occidental formado por el granitoide del Paleozoico inferior cabalga hacia el este sobre un bloque oriental constituido por granitoides del Paleozoico Inferior. Esta falla tiene asociada fallas normales menores con rumbo NNE que cortan a la Ignimbrita Tucúcaro.

Los elementos estructurales más característicos encontrados al oriente de Peine, son principalmente las fallas inversas descritas a continuación:

La “Falla de Cerro Carcaqui” presenta un rumbo noroeste, una longitud de 6 km y un manteo de 54° al este. El bloque oriental, constituido por la granodiorita Lánquir y Estratos de Quepe, asciende sobre el bloque occidental formado por los Estratos de Quepe. La falla se produce con anterioridad a la deposición de la Ignimbrita Patao y con posterioridad a los estratos de Quepe.

La “Falla de Aguada Pinosa” posee un rumbo noreste y manteo hacia el sureste. La unidad constituida por la formación Cas asciende sobre los miembros inferior y medio de la formación Peine.

La “Falla de la Quebrada Nacimiento” se caracteriza porque coincide con un lineamiento a nivel regional. Se observa en el borde oeste de la laguna Miscanti. Presenta un rumbo norte sur y una longitud de 15 km. Afecta a los estratos de Quepe y a la Ignimbrita Patao.

La “Falla Talabre” presenta un rumbo norte sur, manteo hacia el oeste y un desplazamiento vertical de entre 10 a 15 km. Aquí, el bloque occidental formado por la Ignimbrita Patao y Atana asciende sobre el bloque oriental constituido por las mismas unidades.

Por último destacar que entre el borde del Salar de Atacama y la quebrada Nacimiento se extienden fotolineamientos muy marcados rumbo noroeste, que desplazan los afloramientos de las unidades mesozoicas y terciarias.

La costra salina del borde sur está compuesta principalmente por material evaporítico acompañado de una cantidad variable de material detrítico de grano fino que, en ningún caso supera el 50%.

La figura a continuación ilustra las características discutidas en este apartado.

3.3.5 Geología de sub-superficie

3.4 Unidades Hidrogeológicas

En el Salar de Atacama se han podido diferenciar varias unidades hidrogeológicas. La diferenciación se establece en función de la naturaleza y origen de las mismas y de sus cualidades hidrogeológicas. Por lo anterior, estas se diferencian en tres sectores: (i) Borde Este, (ii) Borde Sur y (iii) Núcleo del Salar de Atacama.

3.4.1 Descripción de las unidades

Borde Este del Salar de Atacama

La hidrogeología del borde este fue caracterizada en base a una serie de perforaciones realizadas que permitieron definir cinco unidades hidrogeológicas (Dalannais, 1979).

En las unidades hidrogeológicas descritas se definieron dos acuíferos: un acuífero inferior semiconfinado, que en algunos casos se puede comportar como confinado y que está separado de un acuífero libre superior por un acuitardo ignimbrítico con una potencia media de 10 m.

En este sector fueron definidas cinco unidades hidrogeológicas (Figura 10):

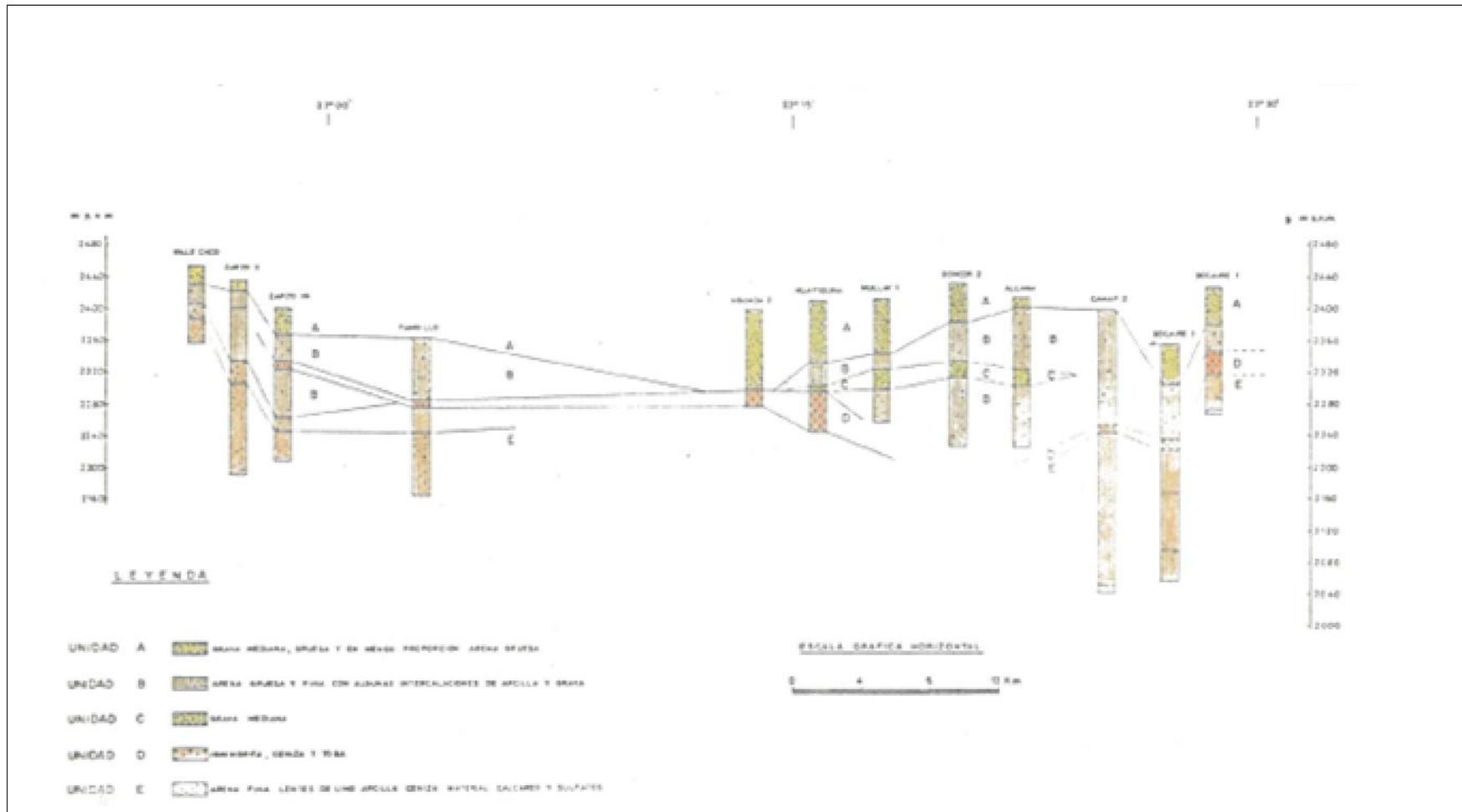


Figura 10. Correlación de unidades hidrogeológicas (Dalannais,1979)

- *Unidad A:* Corresponde fundamentalmente a depósitos sedimentarios de tamaño grava media-gruesa, en menor proporción se encuentra arena gruesa y cantos rodados. Los clastos corresponden a lavas andesíticas porfíricas y a lavas ignimbríticas, son subredondeados y subangulares. Esta unidad alcanza una potencia de algo más de 50 m.
- *Unidad B:* Esta unidad considera depósitos de naturaleza arenosa, con pequeños lentes arcillosos y con algunas capas de grava fina. Esta unidad en algunos sectores, alcanza los 140 m de espesor y su espesor promedio es de 30 m y se sitúa por debajo de la unidad A.
- *Unidad C:* Se reconoció una unidad de gravas con clastos subredondeados y con clastos predominantemente de naturaleza andesítica e ignimbrítica. Esta unidad se acuña hacia el Sur . Su mayor espesor se alcanza en el pozo Mullay (25 m) y su promedio es de unos 20 metros. Se desarrolla un acuífero con características de semiconfinado y libre.
- *Unidad D:* Esta unidad corresponde a un flujo ignimbrítico-tobáceo de color gris. Corresponde a un acuitardo.
- *Unidad E:* Corresponde a materiales de tamaño fino, arena fina, lentes de limo, arcilla, ceniza, materiales calcáreos y sulfatos. Esta unidad es la que presenta una mayor potencia y distribución areal. Su espesor promedio está en los 100 m y se encuentra apoyada sobre el eventual basamento. En esta unidad se desarrolla un acuífero semiconfinado y en algunos casos confinado.

Borde Sur del Salar de Atacama.

En este sector se definen dos unidades claramente diferenciadas, con un comportamiento y origen distinto, uno tiene origen volcano-sedimentario y el otro predominantemente evaporítico.

- *Unidad Volcano-sedimentaria:* Esta unidad está 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. La naturaleza de los depósitos sedimentarios es muy heterogénea, al igual que el grado de retrabajamiento de los mismos, se trata de materiales que van desde el tamaño arcilla hasta el tamaño canto, incrementándose la proporción de finos hacia zonas distales. 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.

- *Unidad salina:* Esta unidad comprende depósitos salinos, generalmente halita, con intercalaciones de limos y arcillas, que pueden tener una importante cantidad de materia orgánica y que corresponderían a los depósitos de fondo de antiguas lagunas. Esta halita generalmente tiene forma cristalina y mayormente presenta aspecto bandeado con abundantes cavidades.

Núcleo del Salar de Atacama

En este sector se encuentra con una única unidad, constituida por depósitos de halita cristalina, que se comportan como un acuífero libre. Esta halita puede presentar un aspecto granular o masivo, con abundantes cavidades. Intercalada con la halita se encuentran capas de pequeño espesor (<1 m) de limos y arcillas, las cuales tienen su origen en los depósitos de fondo de las lagunas temporales que se forman en la superficie de la unidad salina. El origen de esta unidad es evaporítico.

Esta unidad conforma un acuífero que se comporta como libre y localmente como semiconfinado.

Las condiciones meteorológicas actuales como la alta evaporación, los vientos, precipitaciones escasas pero concentradas, escurrimientos superficiales y variación de los niveles de agua subterránea junto con la tectónica y el volcanismo moderno, son sin lugar a dudas los responsables de la actual geomorfología que presenta el Salar. El resultado es una unidad casi horizontal con una zonación de unidades limo-salinas y salinas con una amplia variedad de relieves. Mardones, 1986 describe las siguientes unidades:

- *Materiales Detríticos.* Principalmente limos, arenas finas arcillas de origen aluvial cementados localmente por cloruros y sulfatos. Su distribución es las márgenes del salar, especialmente en los frentes de los conos aluviales, marcados por líneas de vegetación.
- *Eflorescencias y costras salinas.* Corresponde a la llamada también zona de transición que se caracteriza por depósitos salinos con la presencia de lagunas y vegas que forman una franja entre los depósitos detríticos y el núcleo del salar.

Esta unidad presenta una zonación, de afuera hacia adentro de las siguientes costras salinas. Costra cloruro-yesífera, Costra de Yeso y Carbonatos y Costra de Transición de Cloruro.

- *Costra Núcleo de Cloruros.* Corresponde a una superficie irregular y esquirloza de costra de color pardo, originada por un mayor aporte de agua y costra de cloruro de color blanco

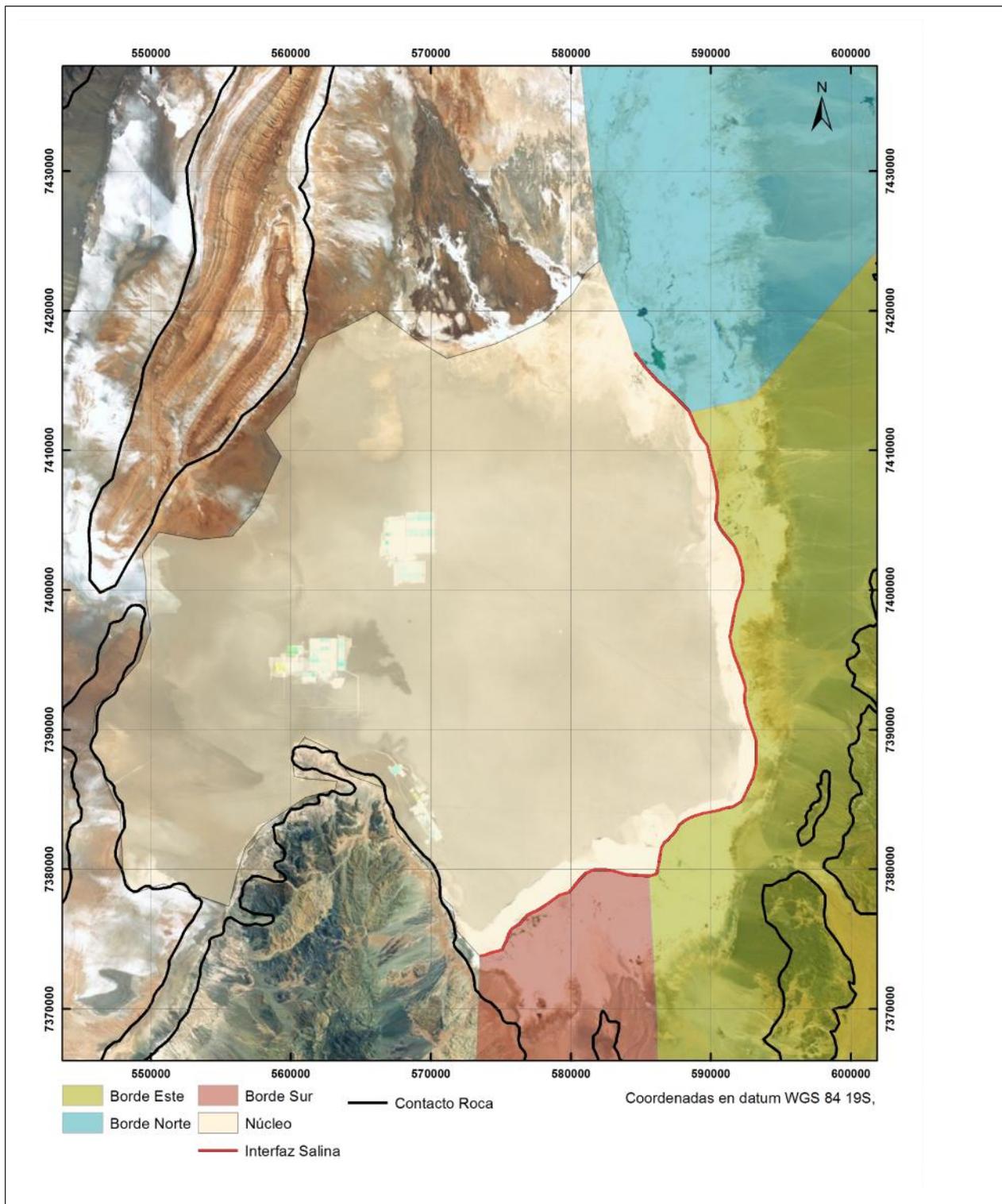


Figura 11. Unidades Hidrogeológicas Salar de Atacama.

3.4.2 Geometría de las unidades

El acuífero del sector Sur del Salar de Atacama, se encuentra confinado dentro de una cuenca de origen tectónico, cuya geometría se debe a los esfuerzos con componente principal E-W, los cuales dieron lugar a la formación de fallas normales con rumbo predominante N-S. El funcionamiento de estas fallas dio lugar a un movimiento de bloques que provocó la aparición de una cuenca tipo graben, con afloramientos con alineación N-S, que corresponden a horst, lo que provoca que la morfología de la cuenca no sea la típica, si no que se presente un escalonamiento en sus bordes.

En este sector, se ponen en contacto dos acuíferos cuyos fluidos tienen características muy distintas el uno del otro. Por un lado está la masa de salmuera, que ocupa principalmente el núcleo del Salar, y por otro encontramos el agua salobre perteneciente al acuífero Negrillar-Monturaqui y a las recargas superficiales del sector suroriental. La gran diferencia entre las densidades de estos fluidos hace que la zona de interfaz entre ellas tenga unas características especiales. La masa de 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 Este principalmente, se sitúan las unidades sedimentarias, que dan lugar a unidades hidrogeológicas menores. Estas unidades corresponden a depósitos aluviales que se acuñan y disminuyen su espesor hasta desaparecer hacia el interior de la cuenca.

3.5 Superficie freática y evolución de niveles

La explotación en la salmuera por parte de las compañías mineras del sector, para sus procesos productivos, han provocado un descenso de nivel en el núcleo del salar como se puede observar en las figuras 12 y 13 respectivamente.

En estas figuras, se puede observar como en la zona de extracción de salmuera se ha formado una depresión que coincide con el campo de bombeo.

En cuanto al acuífero en la zona de Tilopozo ha mantenido sus niveles estables en el periodo de tiempo entre años 2001 y 2012.

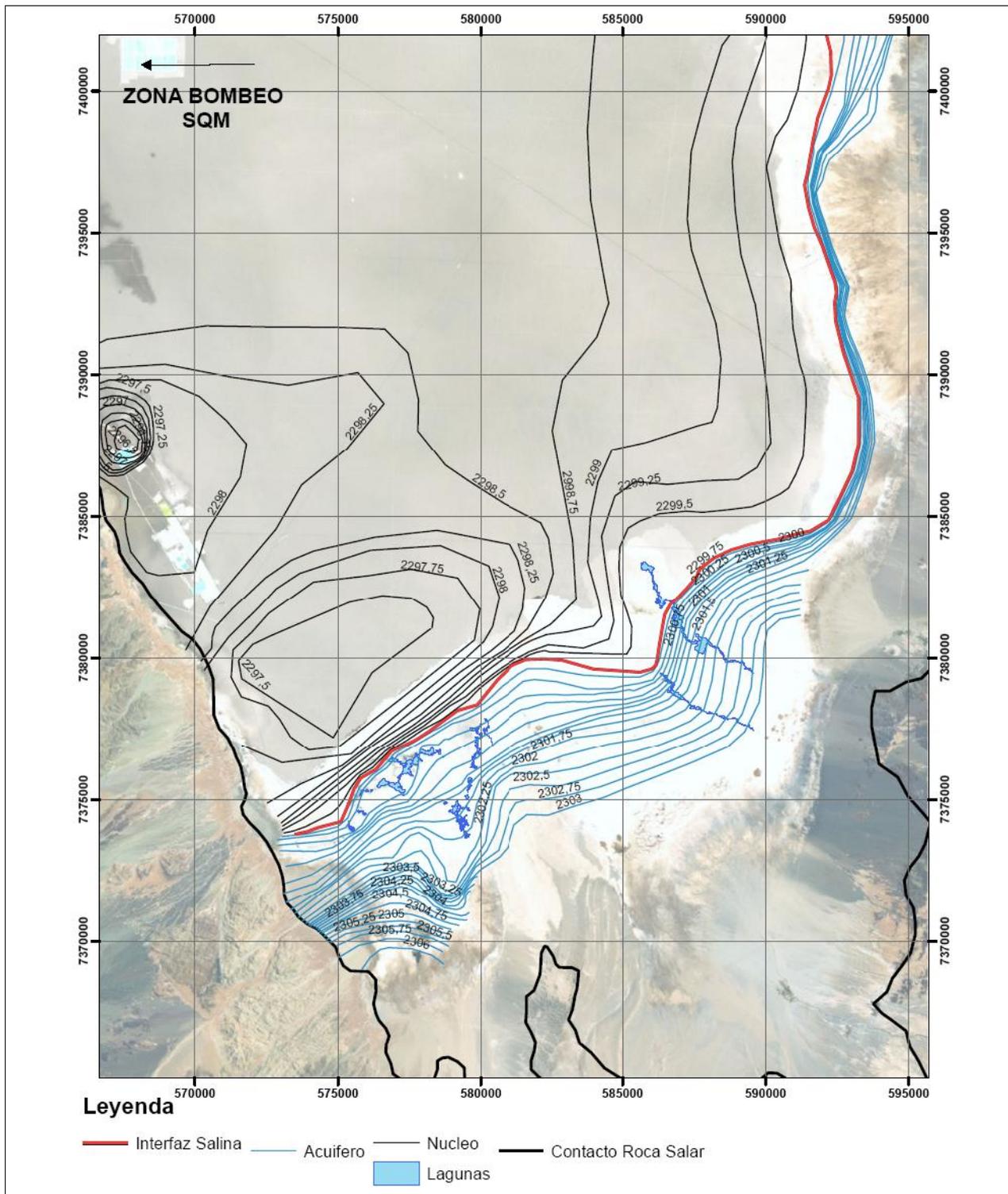


Figura 12. Superficie piezométrica del año 2001

Fuente: Rockwood

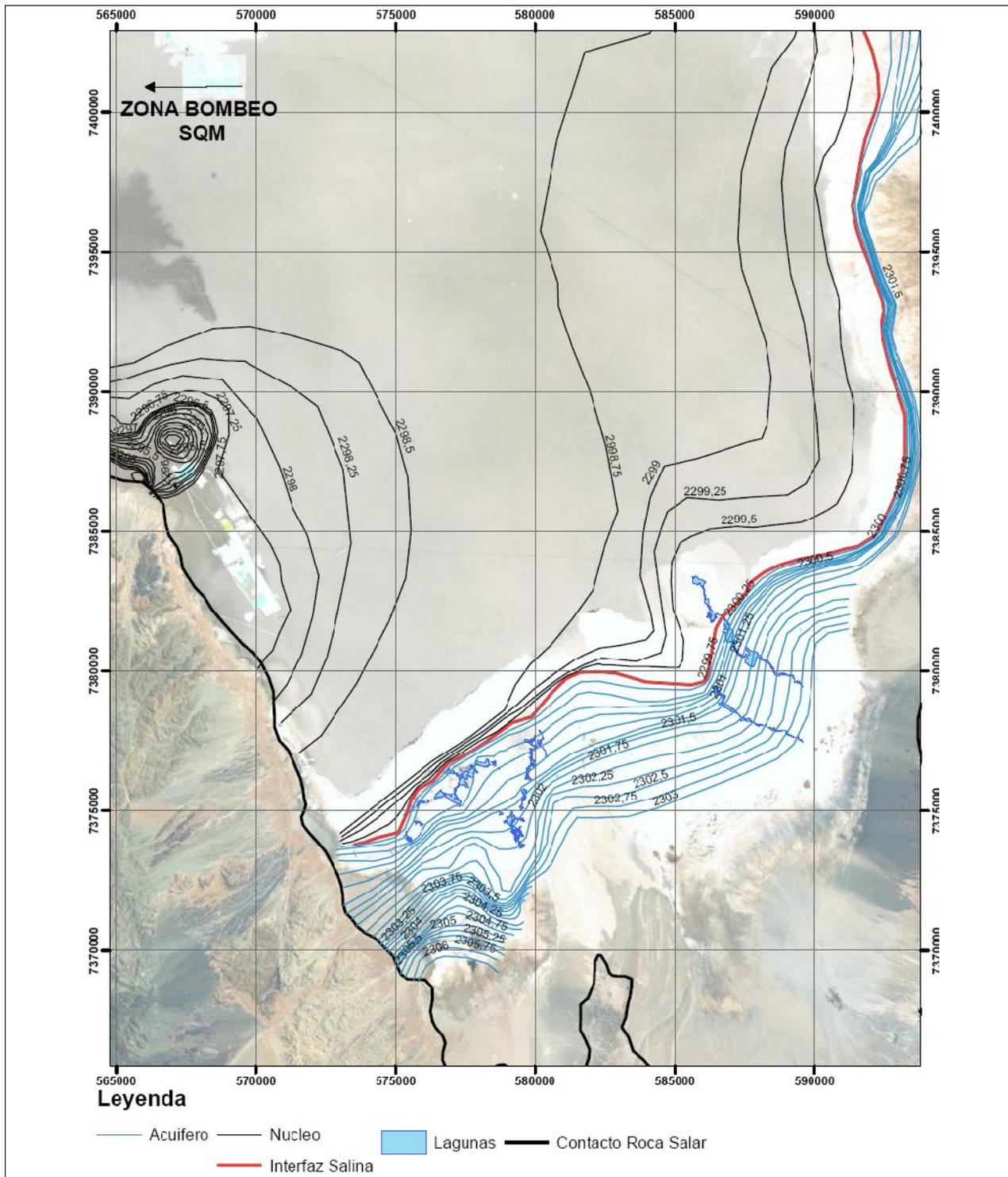


Figura 13. Superficie piezométrica del año 2012

Fuente: Rockwood

En la figura 14, se puede observar la evolución de niveles de salmuera (en verde) para los puntos de control S-4 y Zanja Camino a Peine, en los que se puede observar una tendencia de descenso. Los pozos del acuífero (en azul), Tilopozo y Tucúcaro, de Rockwood no muestran esta tendencia, aunque este último presenta variaciones estacionales. También se representa el nivel de uno de los puntos de monitoreo (E) del nivel de la laguna Interna realizado por MEL que tampoco presenta variación de nivel.

La ubicación de estos puntos se puede consultar en la tabla 5

PUNTO	Coordenadas WGS 84		Tipo Punto	Tipo medición
	Norte	Este		
CL-10	7.386.399	567.208	Pozo Obs	Nivel salmuera
CL-11	7.386.174	566.409	Pozo Obs	Nivel salmuera
CL-12	7.386.411	566.897	Pozo Obs	Nivel salmuera
CL-13	7.385.682	567.385	Pozo Obs	Nivel salmuera
CL-18	7.387.345	565.988	Pozo Obs	Nivel salmuera
CL-6	7.376.997	572.421	Pozo Obs	Nivel salmuera
E	7.376.919	577.936	Limnómetro	Nivel Agua
S-1	7.380.191	570.230	Pozo Obs	Nivel salmuera
S-2	7.380.576	570.481	Pozo Obs	Nivel salmuera
S-3	7.380.961	570.735	Pozo Obs	Nivel salmuera
S-4	7.388.872	575.944	Pozo Obs	Nivel salmuera
Tilopozo	7.369.536	577.673	Pozo Obs	Nivel Agua
Tucúcaro	7.373.201	572.933	Pozo Obs	Nivel Agua
Zanja Camino a Peine	7.383.658	588.477	Zanja	Nivel salmuera

Tabla 6. Ubicación de los puntos representados

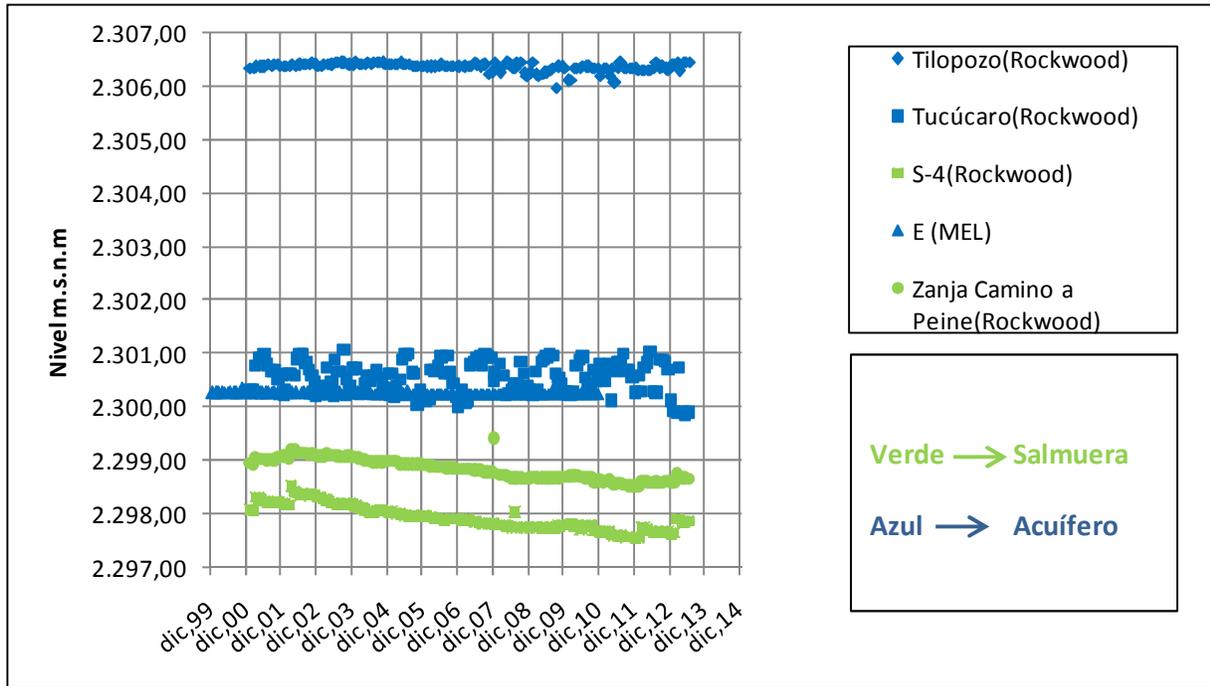


Figura 14. Evolución del nivel de agua y salmuera

Fuente: Rockwood

Los pozos de observación S-1, S-2, S-3, S-4 y CL-6 están alejados de la zona de extracción y presentan una evolución de nivel muy pareja, como se puede ver en la figura 15. Por otro lado los pozos de observación representados en la figura 16 se encuentran próximos a la zona de extracción y su nivel está más condicionado por el régimen de bombeo de la explotación. Los pozos del primer grupo son una mejor referencia para entender la evolución histórica de los niveles de salmuera en el núcleo aunque todos presentan una evolución similar.

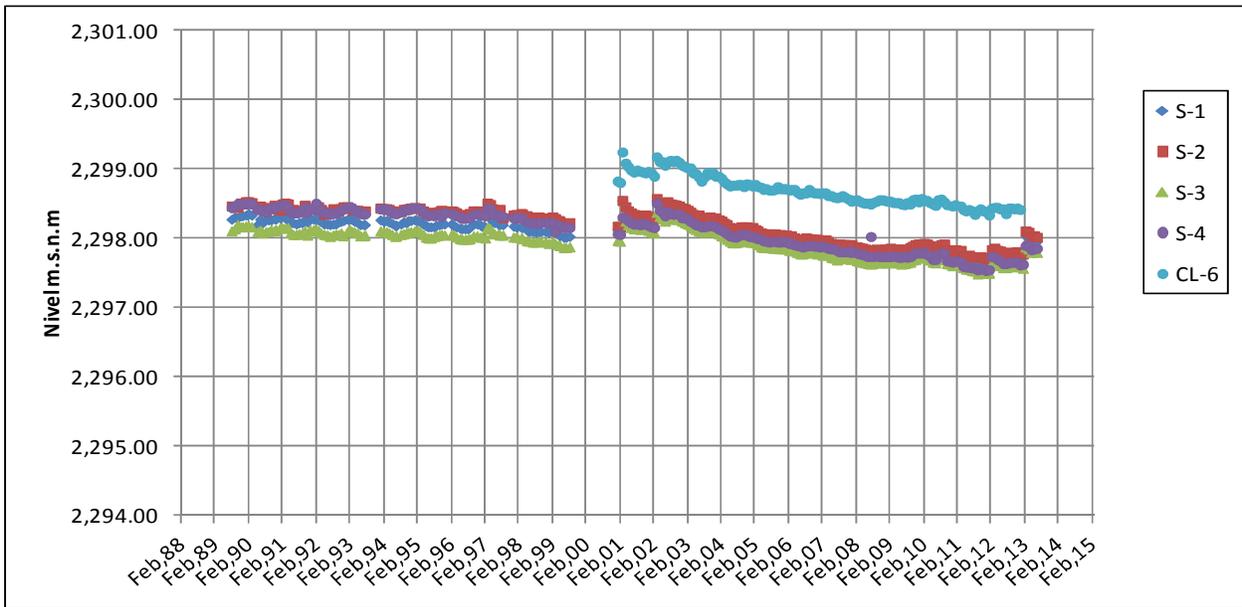


Figura 15. Evolución del nivel en pozos de observación alejados zona de extracción.

Fuente: Rockwood

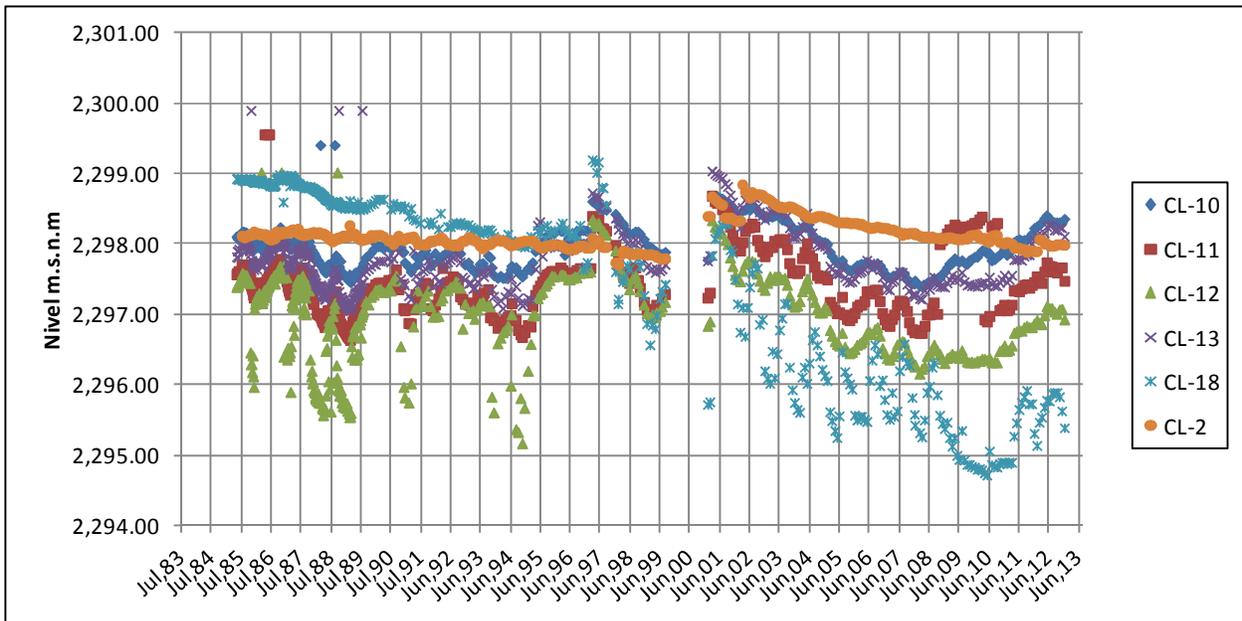


Figura 16. Evolución del nivel en pozos de observación próximos a zona de extracción.

Fuente: Rockwood

3.6 Geofísica

3.6.1 *Métodos electromagnéticos Aplicados:*

La técnica de TEM (Sondeo electromagnético transitorio en el dominio del tiempo) al igual que su modalidad Nano-TEM, son métodos de prospección geofísica. Consisten en la aplicación de una corriente eléctrica variable a una espira de cable aislado desplegado con una forma usualmente cuadrada sobre el terreno. Esta corriente genera un campo magnético (principal) que induce corrientes de conducción en el subsuelo. Luego se interrumpe la corriente y se mide el campo magnético (secundario) generado por las corrientes de conducción, el cual posee una respuesta transitoria, es decir, dependiente del tiempo. Esta respuesta se mide como voltaje inducido en un “loop” o bobina receptora. En este caso, la modalidad NanoTEM tiene la particularidad de medir los tiempos muy cercanos, lo que permite tener información de detalle de la resistividad somera (Geodatos, 2013).

Las corrientes inducidas en el subsuelo se distribuyen en profundidad de acuerdo con el mecanismo físico de difusión y el comportamiento que muestran depende de las resistividades, tamaños y formas de las estructuras geoeléctricas subsuperficiales. En zonas de bajas resistividades, la difusión de las corrientes es lenta, con una amplitud inicial pequeña, a diferencia de zonas con altas resistividades, donde se tiene una amplitud inicial mayor, pero el decaimiento es más rápido. El análisis numérico de la curva transitoria, o de decaimiento en el tiempo del voltaje registrado, permite inferir información cuantitativa acerca de los parámetros geoeléctricos del subsuelo. Ambas técnicas son inductivas, es decir, evitan el problema que enfrentan los métodos galvánicos al intentar inyectar corriente directamente al subsuelo en terrenos de muy alta resistencia de contacto; por ejemplo, costras salinas secas superficiales muy resistivas (como el caliche), característico en ciertos lugares del norte chileno.

La curva transitoria se mide en una serie intervalos de tiempo (ventanas) de pequeña duración (fracciones de segundo), lo que permite obtener datos de resistividad aparente directamente relacionada con el decaimiento de la curva transitoria dentro de los intervalos de registro.

En el modo de NanoTEM se usan las frecuencias de 32 y 64 Hz, mediante circuitos electrónicos de muy alta velocidad, que permiten muestrear las curvas con mayor detalle. Así se logra una mejor resolución de la estructura geoeléctrica más somera (correspondiente a tiempos menores o más cercanos). Se disminuyen también las dimensiones de las espiras transmisora y receptora en torno al punto de sondeo. Por su parte, el método TEM considera frecuencias de repetición que usualmente fluctúan entre 0.5 y 32 Hz.

En general, los métodos electromagnéticos TEM y NanoTEM son muy apropiados para detectar y visualizar capas conductoras; sin embargo, no tienen buena capacidad para detectar estructuras resistivas subyacentes a estratos conductores.

3.6.2 Interpretación de los métodos electromagnéticos

El objetivo general del presente trabajo geofísico es la determinación cuantitativa de las propiedades eléctricas del subsuelo en la zona de interés. Estas propiedades geoelectricas dependen de la mineralogía (litología) y microestructura (porosidad, granulometría, fracturación) de las rocas. Afecta de manera importante a la resistividad, el tipo de fluidos que contengan las rocas, especialmente el grado de saturación y salinidad, que en ambientes como los salares, juegan un papel preponderante.

A partir de las secciones de resistividad (L1 a L4) provenientes del método TEM se realizará la interpretación de estas secciones, en términos de posibles litologías asociadas a los valores de resistividad observados.

En las figuras a continuación se observan las secciones de resistividad realizadas en terreno:

A partir de las secciones de interpretación TEM es posible distinguir de modo general 5 unidades geoelectricas principales, cuya definición se ve facilitada por el claro contraste de resistividades lateral y en profundidad que se aprecia en los perfiles realizados:

a) Unidad de baja - media resistividad: este horizonte somero se aprecia discontinuo y de mínima potencia (cercano a 5 metros y máximo en torno a los 15 metros), con resistividades eléctricas que fluctúan entre los 2,9 y 250 [Ohm-m].

Esta unidad pudiera asociarse a la presencia de sedimentos saturados bajo costra salina. La baja resistividad se puede atribuir a la disolución de la costra salina con agua dulce.

b) Unidad de baja resistividad somera: este estrato conductor sub horizontal se observa discontinuo a lo largo de las secciones, con una potencia en promedio cercana a 2 metros y se visualiza a una cota prácticamente constante (techo de la unidad se sitúa aproximadamente a los 2.290 m.s.n.m). Las resistividades son del orden de los 0,2 [Ohm-m], y se correlaciona con sedimentos finos (arcillosos) saturados.

c) Unidad de baja resistividad profunda: esta unidad se desarrolla en profundidad con gran potencia y subyace las dos unidades descritas sucintamente con anterioridad. Se extiende a lo largo de todas las secciones desde su techo, a aproximadamente 15 metros en los extremos Norte y en promedio 40-50 metros hacia la mitad Sur de los perfiles. Corresponde a una unidad de resistividades que fluctúan entre los 0,2 y 0,9 [Ohm-m], el promedio en torno a los 0,3 [Ohm-m] que pueden ser interpretadas como sedimentos saturados con agua salobre (salmueras disueltas). Esta unidad profunda presenta un incremento gradual de la resistividad hacia los extremos septentrionales de las secciones extendidas hacia el núcleo del Salar, alcanza resistividades del orden de los 35 [Ohm-m], lo que se puede asociar a una disminución de permeabilidad y no atribuible a un cambio de granulometría de los sedimentos saturados con agua salobre.

d) *Unidad de media resistividad*: esta unidad se aprecia discontinua a lo largo de todas las secciones, corresponde a una unidad de resistividades cuyo valores fluctúan entre los 1 y 79 [Ohm-m] (el promedio se sitúa en torno a los 10 [Ohm-m]), en ocasiones se aprecia más superficial (subyaciendo bajo los sedimentos húmedos y/o costra salina) y en otras subyaciendo unidades comparativamente más resistivas. Esta unidad se aprecia discontinua asociada a la zona de transición de agua dulce a agua salobre. Corresponde a una zona de interfaz por efecto de densidades de las aguas subterráneas dulce - salobre, la primera aflora coincidiendo con la localización de las lagunas altiplánicas en esta zona. Esta unidad puede interpretarse como sedimentos saturados con agua dulce.

e) *Unidad de alta resistividad somera*: Esta unidad se aprecia en el extremo sur. Se desarrolla con potencias cercanas a 10-50 metros y presenta resistividades comprendidas en un amplio rango de valores 65 – 3.100 [Ohm-m]. Se manifiesta hasta una cota que permanece constante en los perfiles donde se aprecia, correspondiente a los 2.305 m.s.n.m, que se interpretaría como el nivel freático bajo el cual los estratos se presentan saturados. Esta unidad puede asociarse a sedimentos secos no consolidados del tipo afloramientos de depósitos aluviales secos.

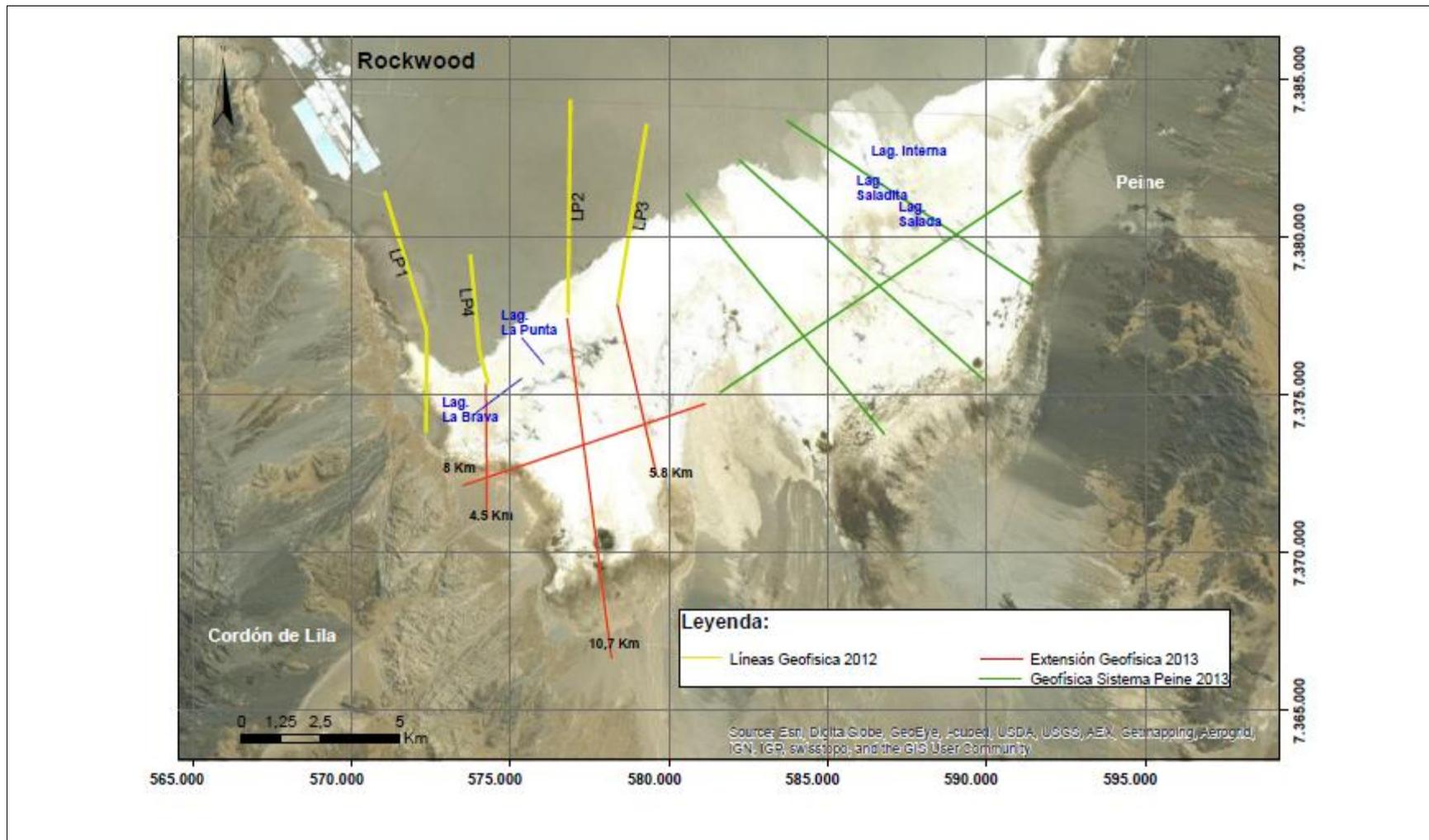


Figura 17. Trazado Geofísica 2012 y 2013



Fotografía 3. Equipo de prospección geofísica electromagnética

Mediante las secciones TEM es posible observar la dinámica de las mezclas de aguas con diferentes contenidos de salinidad, lo que provoca, por contrastes de densidad, la generación de la interfaz salina, como se observa tanto en los perfiles L2 y L4 del sector sur como oriental del Salar de Atacama.

- Interpretación de perfiles NanoTEM

En las secciones TEM de los perfiles ejecutados en el sector Sur del Salar de Atacama, se puede observar una zona de agua dulce y/o mezcla con salmuera, lo que permite explicar, debido al cambio de densidades, la presencia de lagunas de agua dulce que afloran.

De los perfiles de resistividad se pueden distinguir 5 unidades geoelectricas principales (Apéndice A), que se describen a continuación.

- a) *Unidad de baja -media resistividad*: esta unidad de mínima potencia (espesor cercano a 2 metros) presenta resistividades del orden de los 1,5 [Ohm-m]. Este dominio pudiera asociarse a sedimentos saturados bajo costra salina. La baja resistividad se puede atribuir a la disolución de la costra salina con agua dulce.
- b) *Unidad de baja resistividad somera*: esta unidad subyace a la descrita anteriormente y es comparativamente más conductora que la unidad a), presenta resistividades del orden de los 0,2 [Ohm-m]. Este horizonte (unidad sub horizontal) puede asociarse a la presencia de Sedimentos finos (arcillosos) saturados.

- c) *Unidad de baja resistividad profunda:* esta unidad se extiende desde el piso de la unidad anterior (5 metros de profundidad aproximadamente) hasta la profundidad de investigación alcanzada y se observa en casi todos los perfiles. Presenta resistividades del orden de los 0,3 [Ohm-m], fluctuando entre los 0,7 y 0,2 [Ohm-m], lo que se asocia a presencia de Sedimentos Saturados con aguas salobres (Salmueras disueltas).
- d) *Unidad de Media Resistividad:* Esta unidad se aprecia discontinua asociada a la zona de transición de agua dulce (fresca) a agua salobre. Corresponde a una zona de interfaz, con resistividades del orden de los 10 [Ohm-m]. Debido a los cambios de densidad de las aguas, se produce el afloramiento de agua dulce la que conforma lagunas. Esta unidad pudiera interpretarse como Sedimentos Saturados con Agua Dulce.
- e) *Unidad de Alta Resistividad Somera:* En los extremos de varios perfiles se ha descrito una unidad somera de altas resistividades lo que puede correlacionarse a presencia de Depósitos Aluviales Secos. Las resistividades eléctricas fluctúan en un amplio rango, comprendidas entre los 250 y más de 4.000 [Ohm-m].

- DISCUSIÓN

En general, en las secciones se observa un comportamiento homogéneo lateralmente, con estratificación clara, además de una concordancia en la definición de unidades mediante ambos métodos. Dada la configuración de resistividades del medio, los resultados mediante NanoTEM y TEM permitieron definir con mejor resolución la estratificación somera y a la vez determinar estructuras más profundas respectivamente en el sector sur del Salar de Atacama.

En las secciones TEM de los perfiles ejecutados en el sector Sur del Salar de Atacama, se puede observar una zona de agua dulce y/o mezcla con salmuera, lo que permite explicar, debido al cambio de densidades, la presencia de lagunas de agua dulce que afloran.

Es importante mencionar que el agua dulce aflora sobre la unidad conductora descrita como sedimentos finos (arcillosos) saturados en agua salina, que corresponde a una unidad de permeabilidad nula.

Este estudio ha permitido conocer el cambio de profundidad o gradiente de la interfaz agua dulce- salada, en su prolongación hacia el lado SE del Salar de Atacama. Las secciones TEM en el mismo sector, permiten observar el descenso gradual de la cota correspondiente a dicha interfaz, estimando un acuñamiento de pendiente cercana a un 1%.

Las conclusiones obtenidas mediante técnicas geofísicas, se complementaran con información hidrogeológica y otros antecedentes como sondeos y/o descripción litológica de pozos.

Solo las secciones TEM se presentan con interpretación de posibles unidades litológicas asociadas a la respuesta geoelectrica obtenida, pero para la definición de las unidades someras en los cuatro perfiles se han considerado los resultados obtenidos a partir del método NanoTEM, que indican de mejor manera el comportamiento geoelectrico superficial, por lo que se recalca la complementariedad de ambos métodos geofísicos.

3.7 Marco Hidrometeorológico Regional

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

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

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

Entre los 2.000 y 3.500 metros sobre el nivel del mar, donde se ubica el salar de Atacama, se localiza el clima *desértico marginal de altura*, el cual presenta mayor volumen de precipitaciones en los meses de verano; entre 20 y 60 mm. Esto permite el asentamiento de poblados cordilleranos como San Pedro de Atacama, Toconao o Peine.

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

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

En esta región, los únicos ríos con escorrentía permanente son el río Loa, el río San Pedro y el río Vilama, estos dos últimos afluentes del sector norte del Salar. El río Loa, que constituye el recurso hídrico de mayor relevancia, posee casi 400 km de longitud y un caudal medio anual variable entre 0,5 y 5 m³/s. Otros recursos hídricos superficiales escurren por algunos cursos de agua menores situados en la zona altiplánica y cordillera principal, además de numerosas aguadas en quebradas y bordes de salares, especialmente hacia el oriente de la Cordillera de Domeyko.



Figura 18. Ríos de escorrentía permanente en el sector

3.8 Caracterización de la Cuenca y el Salar

3.8.1 *Caracterización de la cuenca y el salar*

La cuenca del Salar de Atacama se ubica en una zona de clima muy árido, y presenta una marcada zonación de este a oeste. La zona oriental es definida como del tipo “Desértico Marginal de Altura” y la zona occidental, incluyendo al área misma del Salar, como del tipo “Desértico Normal” (Mardones, 1986). Las escasas precipitaciones sobre el sector occidental del Salar, se atribuyen a la inversión térmica que afecta la masa de aire situada entre la costa y la cordillera de los Andes, de tal forma que ocurre un descenso del aire, reforzado por el efecto enfriador de la corriente de Humboldt. Las precipitaciones ocurren principalmente desde Enero a Marzo, producto de la humedad transportada desde la cuenca Amazónica (invierno boliviano), y en menor importancia entre Abril y Agosto debido al desplazamiento de frentes fríos desde la Antártica. Éstas disminuyen desde 300 mm/año en la Cordillera de los Andes hasta 5 mm/año en la cordillera de Domeyko, y sobre el Salar mismo el promedio es de unos 16 mm/año.

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

La principal zona de recarga de la cuenca tiene su origen en las precipitaciones sobre las altas cumbres que limitan la cuenca por el norte y oriente del salar. La mayoría de los cauces no tienen flujo permanente y presentan escurrimientos eventuales con ocasión de eventos importantes de precipitación.

3.8.2 *Escurrimientos Superficiales*

Los principales cursos fluviales presentes en el entorno del Salar son el río San Pedro, con un caudal promedio del orden de 1000 l/s, y episodios torrenciales de hasta 25000 l/s, y el río Vilama, con un caudal promedio de 160 l/s. Ambos desembocan en el margen norte del Salar. El río San Pedro forma un delta seco, mientras que el río Vilama, sometido a una fuerte presión extractiva, se infiltra y desaparece al sur de San Pedro de Atacama. Los máximos caudales se registran entre los meses de enero a marzo, coincidiendo con los máximos pluviométricos. En el margen este del Salar, una serie de torrentes efímeros circulan por quebradas cuyas zonas de cabecera se sitúan en la zona del altiplano andino.

La Dirección General de Aguas, cuenta con varias estaciones de aforo en la cuenca, que son las señaladas en la tabla y figura a continuación:

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

(*) Estaciones de aforos sistemáticos

Tabla 7. Estaciones de aforo, DGA

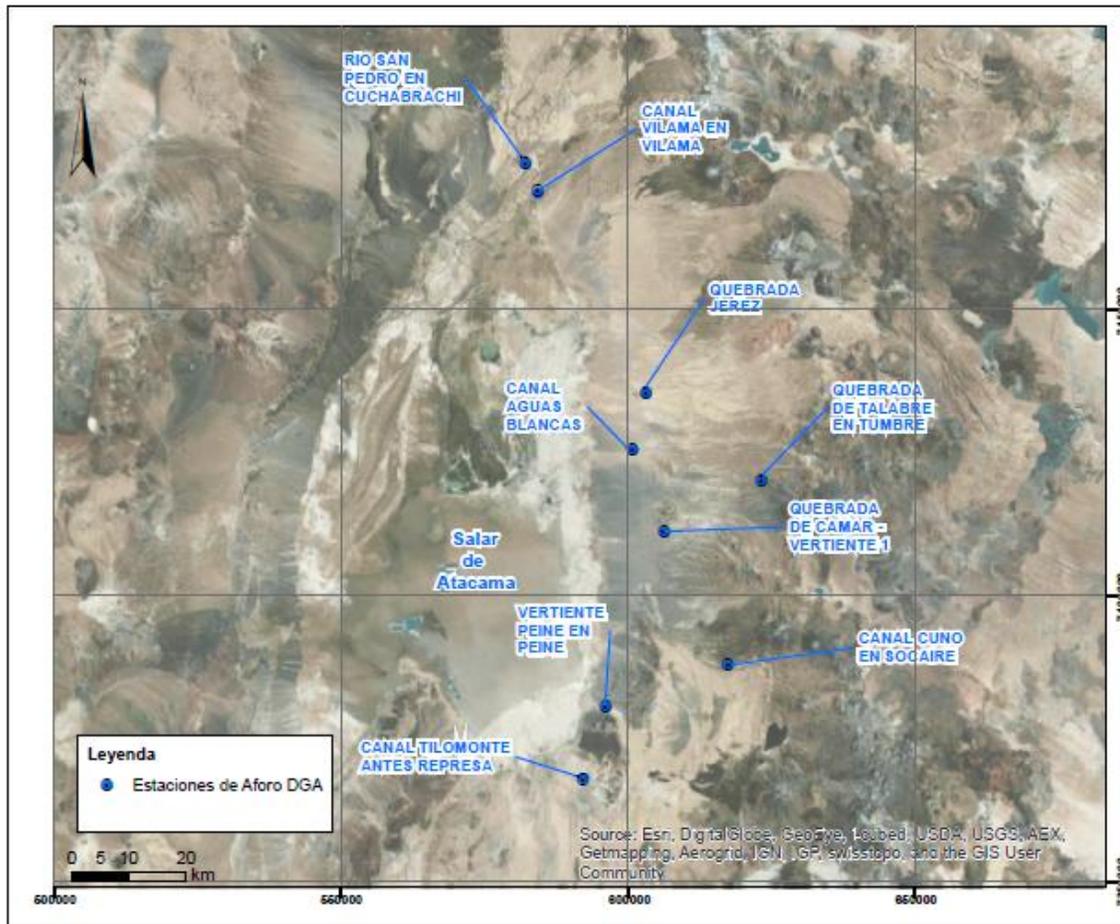


Figura 19. Ubicación estaciones de aforo, DGA.

En la tabla a continuación, se señalan los caudales medios mensuales para las estaciones consultadas que cuentan con registro continuo y en la figura la variación estacional de los caudales medios mensuales, donde se observa que sólo el río San Pedro presenta un aumento de su caudal debido a las mayores precipitaciones de los meses de verano, en cambio los demás cauces no reflejan este aumento de las precipitaciones debido a que su principal fuente sería de origen subterráneo.

Mes	Río San Pedro en Cuchabrachi	Río Vilama en Vilama	Canal Aguas Blancas	Canal Cuno en Socaire	Canal Tilomonte
Enero	894	154	101	133	30,0
Febrero	1043	154	99	143	28,7
Marzo	1136	161	94	150	29,3
Abril	783	165	91	160	30,7
Mayo	912	176	90	165	32,1
Junio	868	174	105	173	31,4
Julio	861	171	115	179	28,6
Agosto	843	160	107	183	27,3
Septiembre	806	132	114	190	26,7
Octubre	739	142	117	166	26,7
Noviembre	709	150	96	122	25,3
Diciembre	733	156	101	124	28,0
Promedio	861	158	102	157	28,7

Tabla 8. Caudales medios mensuales cauces afluentes al Salar.

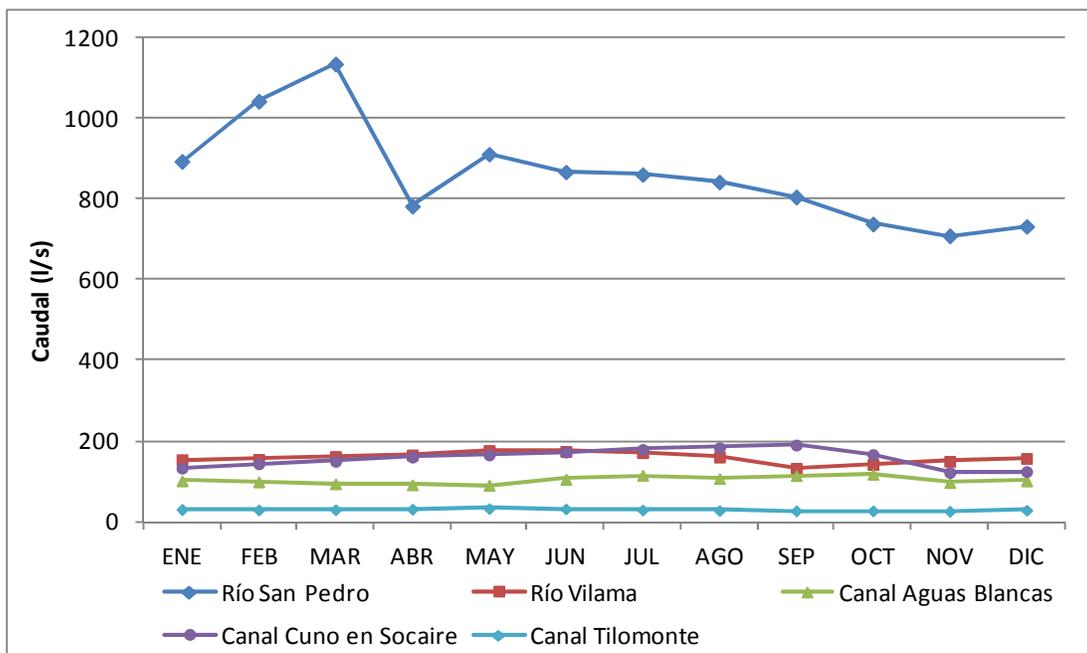


Figura 20. Variación estacional de caudal en cauces afluentes al salar

3.8.3 Precipitaciones

En la zona del salar las precipitaciones importantes comienzan a partir de los 2.000 m.s.n.m, aumentando con la altura hacia el oriente. Bajo esta cota, las precipitaciones son muy esporádicas y de baja magnitud.

Las precipitaciones están influenciadas por la altura y por un sistema convectivo que genera lluvias estivales en el Altiplano. Estas tormentas son generalmente de corta duración y de poca extensión territorial. Si bien es común observar tormentas de menos de 20 mm/día, hay una ocurrencia ocasional de tormentas de hasta 280 mm/día. Las variaciones anuales de precipitación son grandes, presentándose series de años muy secos (DGA, 2010).

En cuanto a la ocurrencia de las precipitaciones, éstas se concentran preferentemente en los meses de verano siendo el mes de febrero donde en general se acumulan los valores más altos.

Si bien no existe un registro extenso, se estima que la precipitación media anual en el salar, asciende a 16 mm anuales (DGA-Dictuc, 2005).

- Evaluación de las Precipitaciones

En la cuenca del Salar de Atacama existen nueve estaciones meteorológicas pertenecientes a la DGA. Adicionalmente, Rockwood tiene otra estación en su planta (planta SCL), en la tabla a continuación es posible observar la precipitación media anual para cada una de las estaciones con información disponible:

Estación	Precipitación Media Período 1974-2012 (mm)												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
CAMAR	6,9	12,3	8,2	0,1	0,7	2,9	0,2	0,7	0,5	0,0	0,2	0,7	33,4
EL TATIO	48,4	45,1	34,2	1,0	2,8	2,8	1,0	1,7	1,6	0,5	0,9	7,0	146,9
PEINE	2,4	6,4	5,1	0,5	1,1	1,7	0,5	0,4	0,5	0,1	0,0	0,2	19,0
RIO GRANDE	21,1	25,5	15,2	0,5	1,0	3,4	0,9	1,1	0,7	0,1	0,2	1,7	71,3
SAN PEDRO DE ATACAMA	5,1	8,7	5,6	0,0	0,6	1,1	0,1	0,3	0,2	0,0	0,3	0,3	22,4
SOCAIRE	10,9	13,2	5,4	1,2	2,3	2,6	0,9	0,9	0,9	0,3	0,3	0,8	39,6
TALABRE	16,0	22,8	11,5	1,4	2,0	5,7	1,1	1,6	0,9	0,0	0,4	1,3	64,4
TOCONAO EXPERIMENTAL	7,1	13,0	6,2	0,2	1,0	2,4	0,2	0,3	0,4	0,1	0,1	1,0	31,9
PLANTA SCL	1,7	1,2	6,6	0,4	0,4	0,7	1,0	0,9	0,2	0,0	0,0	0,7	13,8
MONTURAQUI	17,1	21,2	12,2	0,5	1,3	5,3	0,3	1,3	0,9	0,0	0,4	1,1	61,4

Tabla 9. Estaciones meteorológicas salar de Atacama

Adicional a la información pluviométrica de las estaciones de la DGA, se tiene estadística de lluvias en las estaciones de Soquimich y Rockwood, ubicadas al interior del Salar ;la ubicación de todas las estaciones mencionadas se muestra en la siguiente figura.

De acuerdo con el promedio de datos de esta información, la precipitación media anual en el salar es 16,47 mm.

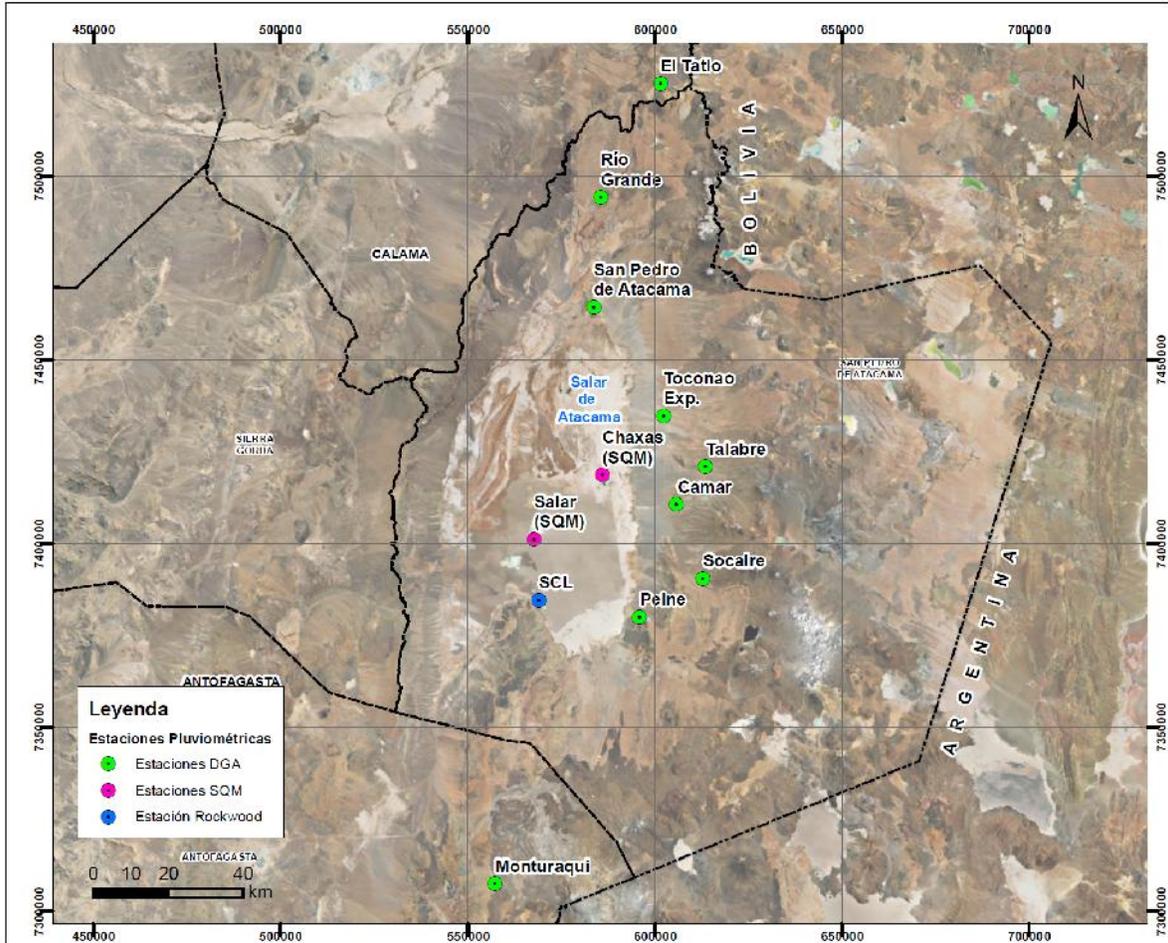


Figura 21. Ubicación estaciones pluviométricas

AÑO	Planta SCL	Salar (SQM)	Chaxas (SQM)
1990	2,78	2,8	
1991	7,73	7,7	
1992	6,42	6,4	
1993	0,44	0,4	
1994	0,48	0,5	
1995	2,87	2,9	
1996	9,93	9,9	
1997	34,50	34,5	
1998	5,50	5,5	
1999	8,5	8,5	
2000	9,4	9,4	17,6
2001	85,9	85,9	59,6
2002	42	42,0	18,4
2003	2	2,0	4,2
2004	1,5	1,5	
2005	8,5	8,5	
2006	7,6	7,6	
2007	0	0,0	
2008	10	10,0	
2009	2,4		
2010	0		
2011	17		
2012	0		

Tabla 10. Precipitación Interior Salar, estaciones SCL y SQM (mm)

Fuente: Rockwood

Con los valores de precipitación determinados, se presenta a continuación, un plano de isoyetas de precipitación anual para la cuenca del salar. Para su elaboración, considerando que no se tiene una buena cobertura de estaciones en toda la cuenca, se tuvo en cuenta también la elaborada en el Balance Hídrico de Chile

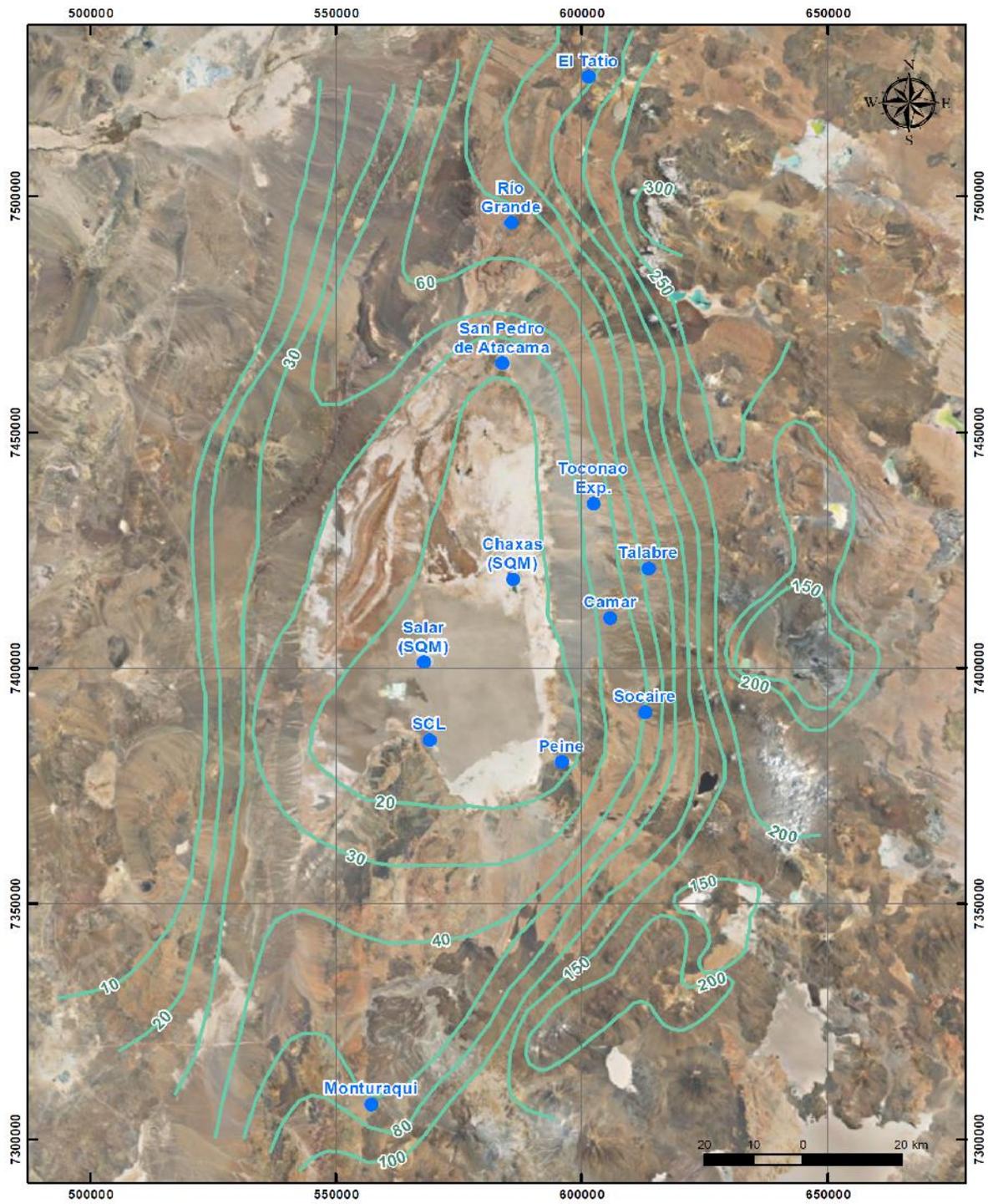


Figura 22. Plano Isoyetas Precipitación Anual

3.8.4 Evaporación Y Evapotranspiración Media Anual

- Evaporación y evapotranspiración media anual

Como referencia, se ha considerado el estudio desarrollado por Mardones (1986) "Características geológicas e hidrogeológicas del Salar de Atacama". En él, el autor definió distintas zonas con tasas promedio de evaporación, en base a la geología superficial, profundidad del nivel de agua o salmuera y medidas de evaporación.

Las mediciones realizadas por Mardones fueron localizadas en distintos sectores del salar, los cuales fueron caracterizados también por tipo de suelo y características del agua evaporada (dulce o salmuera). Estas mediciones consistieron en 8 lisímetros ubicados en las distintas zonas y en ellas se midió la evaporación para diferentes profundidades del agua subterránea.

Las tasas de evaporación obtenidas en el mencionado estudio dependen, en primer lugar, de la densidad del agua, ya que a mayor densidad menor es la evaporación, y en segundo lugar, de la profundidad a la que se encuentra el nivel de agua, puesto que a menor profundidad mayor es la evaporación.

La tabla 11 presenta la zonificación del salar realizada por Mardones y la figura 23, su representación espacial:

Area	Tipo de cobertura superficial	Profundidad Agua (m)	Tasa promedio de evaporación (mm/día)
A1	Costra de limo salino blando	0,53	0,400
A2	Costra de limo salino sobre costra dura de carbonato de calcio	0,37	0,100
A3	Costra delgada sobre sal granulada	0,34	1,450
A4	Yeso limoso blando	0,72	0,300
A5	Yeso limoso blando	1,11	0,100
A6	Costra de cloruro de sodio	1,00	0,012
A7-1	Costra salino limosa de yeso y halita	0,31	1,000
A7-2	Costra salino limosa de yeso y halita	0,50	0,500
A8-1	Limo salino sobre costra dura de carbonato de calcio	0,47	0,100
A8-2	Limo salino	0,27	1,000
A9-1	Limo salino	0,32	1,500
A9-2	Limo salino	0,60	0,100
A10-1	Limo salino sobre costra dura de carbonato de calcio	0,25	1,000
A10-2	Limo salino sobre costra dura de carbonato de calcio	0,25	0,200
A11	lagunas	0,00	5,800
A12	Vegas	0,00	0,300
A13	Núcleo, costra dura de cloruro de sodio	0,67	0,005

Tabla 11. Zonas de Evaporación definidas por Mardones

Fuente: Mardones, 1986

De acuerdo a este método, la evaporación total promedio del Salar de Atacama es 5,4 m³/s, considerando de todas maneras la diferencia de evaporación entre zonas, ya que los valores son muy elevados en las zonas de lagunas y muy bajos en el área del núcleo.

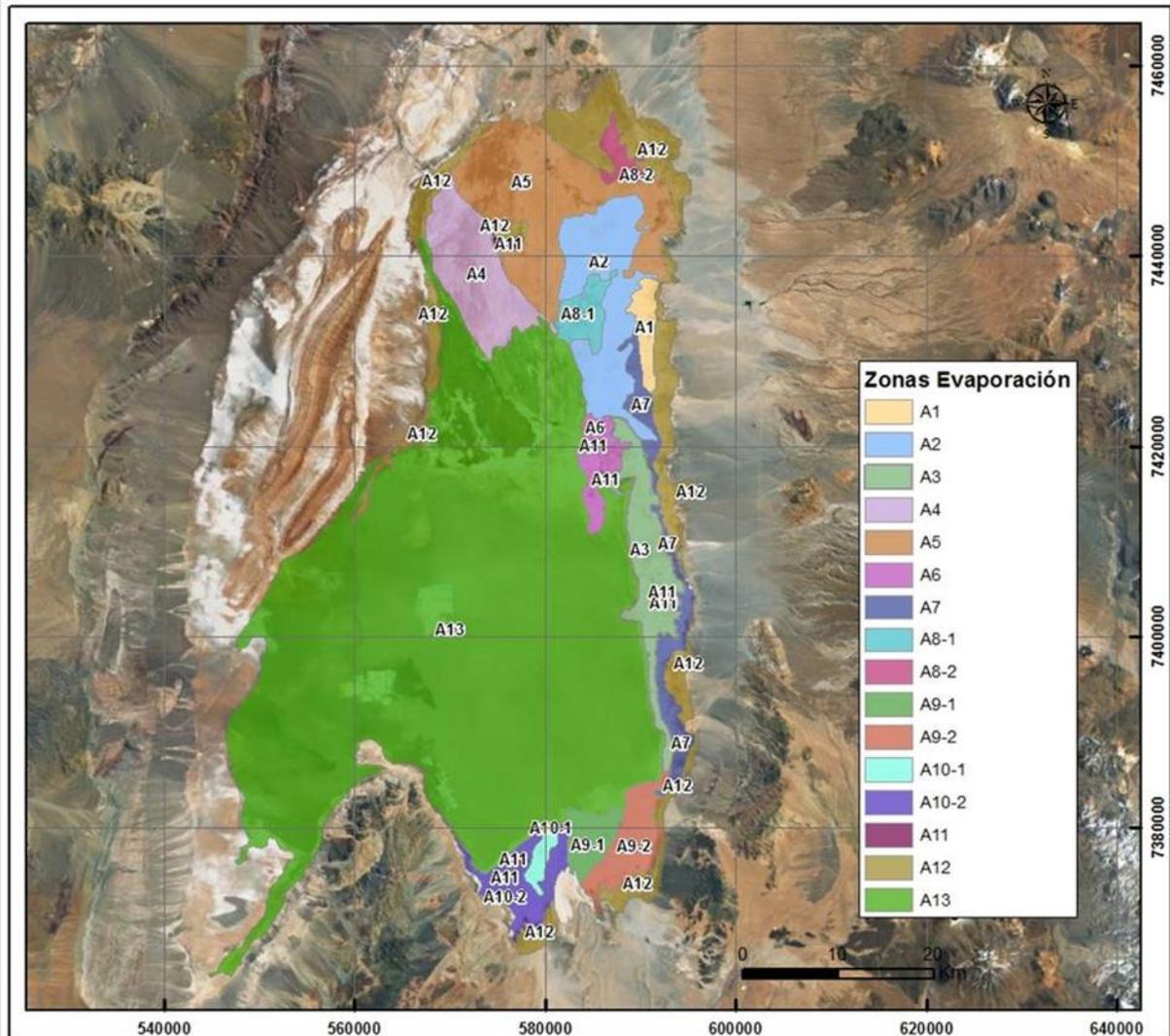


Figura 23. Delimitación áreas de evapotranspiración de Mardones

3.8.5 Evaporación de Tanque

La evaporación de la superficie de agua libre es medida en cinco estaciones meteorológicas de la DGA. Al interior del salar, la evaporación se mide en dos estaciones propiedad de Soquimich (Chaxas y Salar) y una que es propiedad de Rockwood (Planta SCL). Las estaciones consideradas son las siguientes:

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

Tabla 12. Estaciones con Estadística de Evaporación de Tanque

Considerando la estabilidad interanual de la evaporación mensual, donde el coeficiente de varianza de los datos es inferior al 20%, no se estima necesario homologar el periodo estadístico para caracterizar la evaporación de superficie libre en la zona.

En la tabla 12 se muestran los valores de evaporación media mensual y total media anual obtenida de la estadística recopilada. En la la figura 24 se muestran gráficos de variación estacional en 4 estaciones de la cuenca del salar, donde se observa la clara influencia estacional, donde las más altas tasas de evaporación se producen en verano, con picos en los meses de diciembre y enero en todas las estaciones, y las más bajas tasas en invierno, siendo en junio y julio las menores en todas las estaciones.

Se observa, además, una clara disminución de la evaporación con el aumento en altura, siendo la estación Planta SCL ubicada al interior del Salar donde se registran los valores más altos, con una evaporación media anual de 3.404 mm.

Mes	El Tatio	San Pedro A. Toconao	Peine	Monturaqui	Planta SCL	Chaxas SQM	Salar SQM
ENE	165,9	332,8	383,6	365,3	262,6	417,1	393,7
FEB	138,0	281,1	334,6	319,4	227,8	352,2	329,3
MAR	151,5	280,6	337,9	326,1	283,8	335,2	287,1
ABR	124,3	213,2	274,1	265,9	197,0	249,0	230,7
MAY	99,8	163,3	220,0	213,0	165,4	175,6	151,3
JUN	72,8	133,8	161,0	167,7	114,2	133,9	110,1
JUL	91,0	144,8	169,2	176,1	139,9	143,0	120,6
AGO	90,0	189,3	221,9	206,9	159,4	194,0	173,6
SEP	127,3	243,8	270,0	244,7	225,4	264,0	234,9
OCT	169,5	306,5	326,6	313,1	278,2	339,3	314,7
NOV	168,4	330,9	368,3	340,3	275,0	381,0	340,8
DIC	183,2	355,6	402,2	370,3	333,6	419,2	380,1
Anual	1581,5	2975,4	3469,3	3308,8	2662,3	3403,6	3066,9

Tabla 13. Evaporación de Tanque Media Mensual (mm)

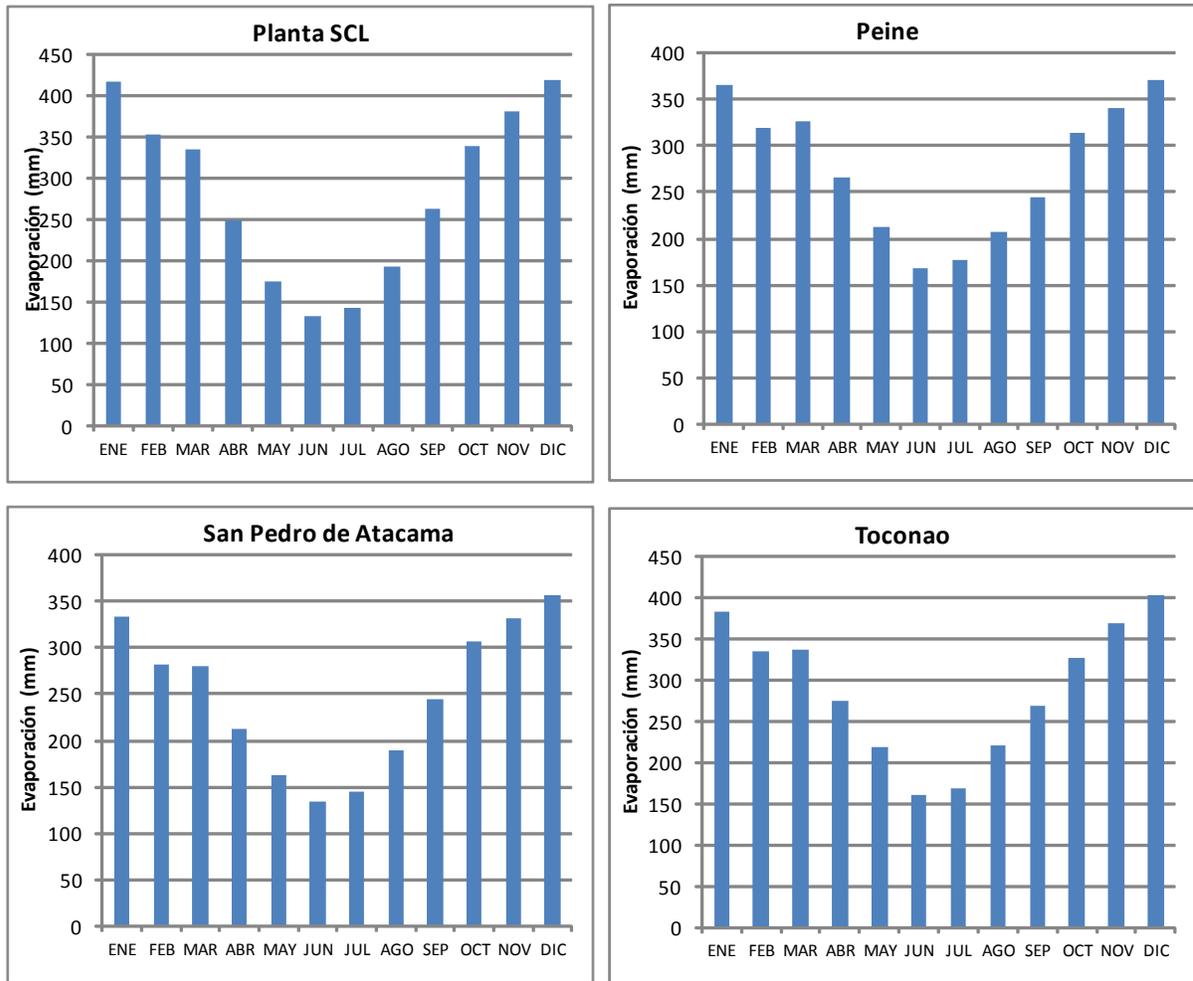


Figura 24. Variación Estacional de la Evaporación

3.8.6 Recarga y descarga

- Recarga y Descarga Efectiva

- ✓ Recarga

Los aportes de aguas superficiales y subterráneas que recargan el salar, tienen su origen en el drenaje de las subcuencas altas que rodean al mismo. Este volumen afluente se origina a raíz de la fracción de las precipitaciones que se convierten en escorrentía, la cual descarga finalmente en el borde del núcleo del salar. Por consiguiente, la recarga viene dada por el volumen afluente al núcleo del salar por efecto de la precipitación efectiva en las áreas aportantes.

De esta forma, la recarga queda definida por la siguiente expresión.

$$Q_{\text{recarga}} = Q_{\text{sub}} + Q_{\text{sup}} + Q_{\text{ppe}}$$

Donde:

Q_{recarga} = Caudal de recarga efectiva afluyente al núcleo del salar.

Q_{sub} = Caudal de aguas subterráneas afluyente al núcleo del salar.

Q_{sup} = Caudal de escorrentía superficial afluyente al núcleo del salar.

Q_{ppe} = Caudal por efecto de la precipitación efectiva caída sobre el núcleo del salar.

Las componentes afluentes al salar por vía superficial y subterránea, Q_{sub} y Q_{sup} , se originan durante eventos de precipitaciones en las cuencas hidrográficas que rodean al salar. Del volumen total de agua precipitada en dichas cuencas, la parte que no se evapora se convierte en precipitación efectiva, y esta precipitación efectiva, que escurre tanto de forma superficial como subterránea, pasa por zonas de cultivos, vegas, bofedales, forestaciones y lagunas de las subcuencas, donde una parte se perderá por evapotranspiración.

Cabe mencionar que no se consideró el efecto en la escorrentía ocasionado por la acumulación de nieve en las cotas mayores de las subcuencas aportantes del lado este. Esto porque la cuenca aportante al salar no cuenta con glaciares ni acumulación de nieve de un año a otro, por lo que en la determinación de un balance medio anual, que es lo que se busca en este caso, la variación mensual de la línea de nieves no tendrá influencia alguna.

Otro factor importante a considerar dentro de la recarga del núcleo del salar, es la precipitación que cae directamente sobre él, de la cual la precipitación efectiva contribuirá directamente como recarga.

De acuerdo a lo anterior, la precipitación efectiva se dividirá como se presenta en la siguiente expresión.

$$P_{\text{efectiva}} = EV_{\text{lagunas}} + EVT + Q_{\text{recarga}}$$

Donde:

P_{efectiva} = Precipitación efectiva, fracción de la precipitación que cae en las áreas aportantes y que se transforma en escorrentía.

EV_{lagunas} = Evaporación en las lagunas pertenecientes a las áreas aportantes.

EVT = Evapotranspiración producida en vegas, bofedales y zonas cultivadas en las áreas aportantes al salar.

Q_{recarga} = Caudal de recarga afluyente al núcleo del salar.

De esta forma, se define a la recarga proveniente de las cuencas aportantes como la diferencia entre la precipitación efectiva y las pérdidas producidas en ellas por los procesos de evaporación y evapotranspiración.

$$Q_{\text{recarga}} = P_{\text{pfectiva}} - EV_{\text{Lagunas}} - EVT$$

✓ Descarga

El salar de Atacama se trata de un sistema hidrogeológico cerrado, lo que significa que no existen pérdidas de agua en forma de escorrentía superficial o subterránea, y todos los aportes de las cuencas que lo rodean drenan hacia el núcleo del salar. De esta forma, la única salida del sistema corresponde a la evaporación y evapotranspiración que se desarrollan en el núcleo del salar.

Para determinar la evapotranspiración en el núcleo del salar, se utilizó directamente el volumen de evaporación calculado en el estudio DGA-GCF, 2010. En dicho estudio se llevó a cabo una corrección del valor calculado originalmente por Mardones luego de efectuar una nueva estimación de las áreas representativas. De esta forma, se alcanzó un valor de 5,6 m³/s, estimado como el promedio del valor original de Mardones y el valor corregido en DGA-GCF.

Mardones, 1986 (m ³ /s)	Corrección DGA-GCF, 2010 (m ³ /s)	Promedio adoptado (m ³ /s)
5,44	5,84	5,60

Tabla 14. Caudales de Evaporación en el núcleo del Salar de Atacama

✓ Determinación de la cuenca aportante

Para efectos de determinar los caudales afluentes al núcleo del salar, se determinó la cuenca aportante al sector de estudio. Para delimitar la cuenca se tomaron en consideración criterios geográficos e hidrogeológicos, de acuerdo a la cartografía disponible en el sector. Como principal antecedente cartográfico se emplearon las cartas del Instituto Geográfico Militar (I.G.M.) en escala 1:250.000, delimitándose la cuenca hidrográfica aportante utilizando las curvas de nivel del área. Para una adecuada caracterización de los caudales afluentes al núcleo, mediante análisis cartográfico se dividió el área total en estudio en 17 subcuencas, de acuerdo a sus características de ubicación y drenaje. Las subcuencas 16 y 17 corresponden al área del núcleo del salar, mientras que de la 1 a la 15 son cuencas aportantes. En la figura 25 se presenta la división efectuada.

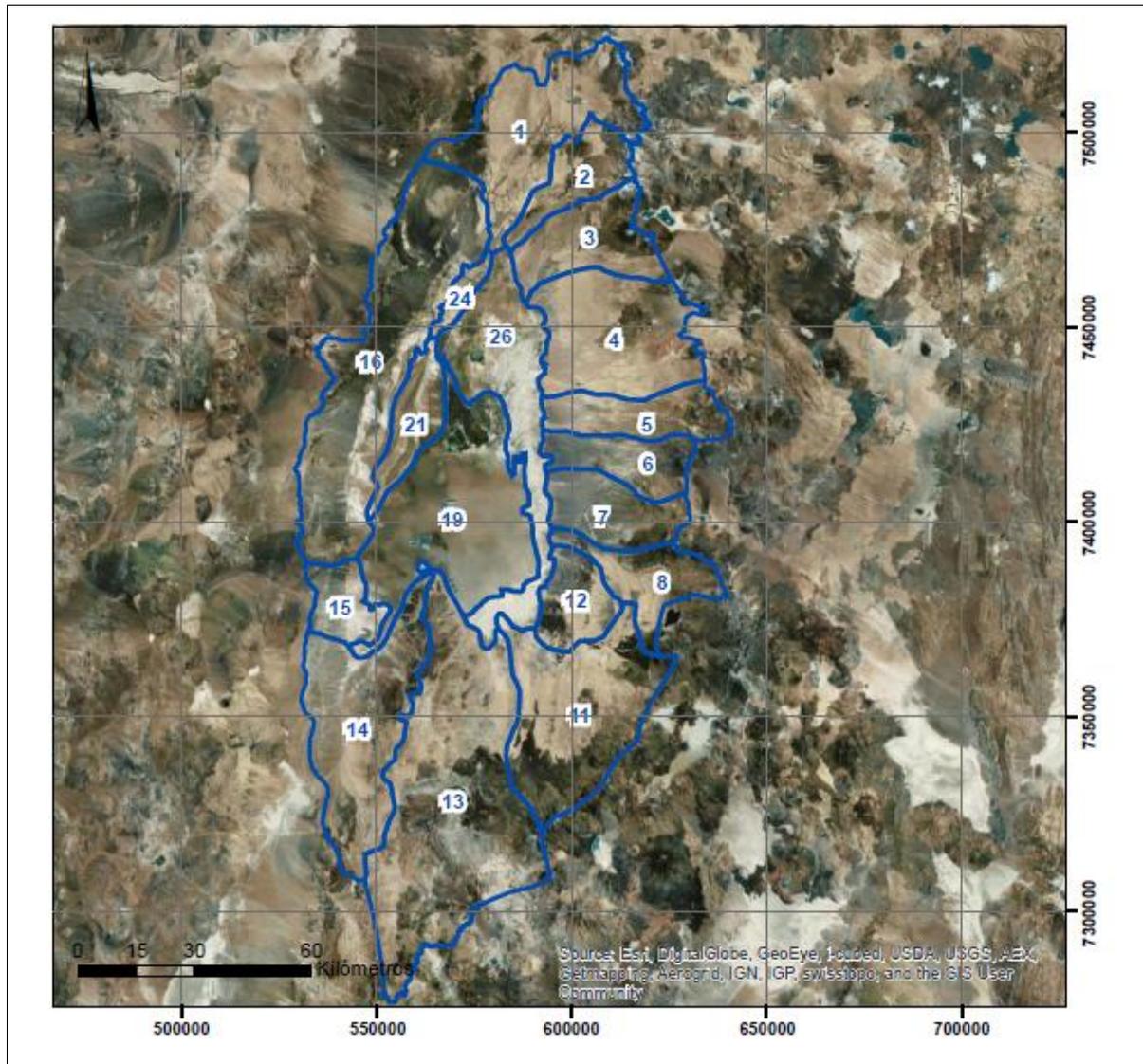


Figura 25. Subcuencas aportantes

Subcuenca	EV Lagunas (m ³ /s)	EVT Cultivos (m ³ /s)	EVT Vegas (m ³ /s)	EVT Bofedales (m ³ /s)	EVT Forestaciones (m ³ /s)	EVT Total (m ³ /s)
1	0	0,03	0,01	0,03	0	0,07
2	0	0	0	0,12	0	0,12
3	0	0,01	0	0	0	0,01
4	0,005	0,03	0,02	0,14	0,08	0,27
5	0	0	0	0,05	0	0,05
6	0	0,01	0,01	0,01	0	0,03
7	0	0,05	0,01	0,01	0	0,07
8	0	0,01	0	0	0	0,01
9	0	0,01	0,01	0	0	0,02
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0

Tabla 15. Caudales de Evaporación en el núcleo del Salar de Atacama

3.8.7 Balance Hídrico

Se realizó un balance hídrico para relacionar todos los componentes hidrológicos y determinar la recarga efectiva afluyente al núcleo del salar desde cada subcuenca.

No toda la escorrentía generada en las subcuencas aportantes llega al núcleo, sino que parte de ella funciona como recarga de los elementos con demandas evaporativas que rodean al núcleo, especialmente en los sectores este y sur, correspondientes a lagunas y vegas. Siguiendo los lineamientos propuestos en el informe técnico de la DGA, SDT N°339, las subcuencas aportantes se agruparon de acuerdo a la zona a la cual descargan sus caudales. Este agrupamiento se llevó a cabo considerando la distribución de zonas colindantes al núcleo del salar.

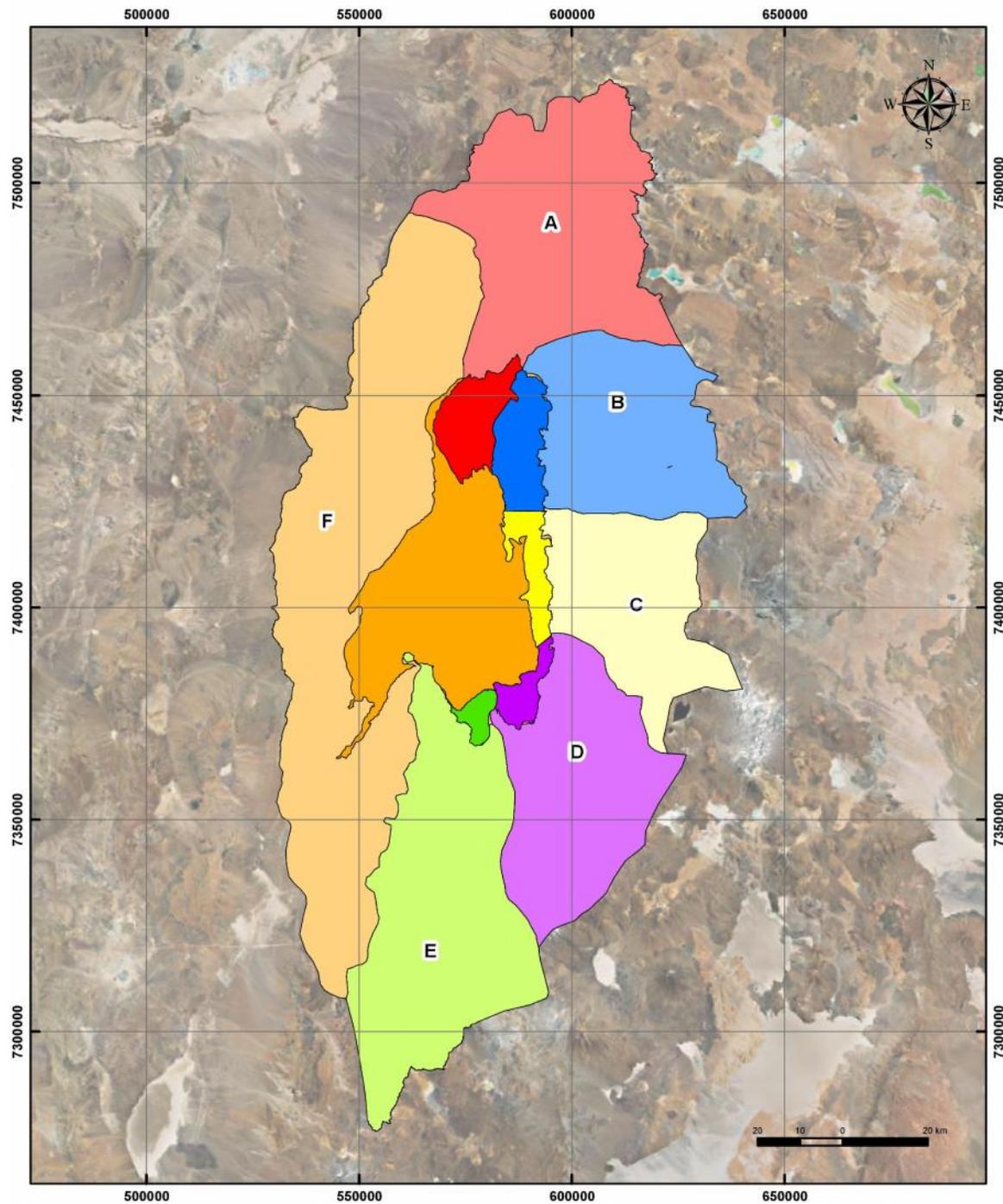


Figura 26. Sectores de demanda evapotranspirativa

Sectores	Subcuencas
A	1 - 2 - 3
B	4 - 5
C	6 - 7
D	8 - 9
E	10
F	11 - 12 - 13 - 14 - 15

Tabla 16. Agrupación subcuencas por sectores de demanda evapotranspirativa

Para el cálculo de caudal generado en cada subcuenca, se utiliza la expresión determinada anteriormente:

$$Q_{recarga} = Pp_{efectiva} - EV_{lagunas} - EVT$$

Para el cálculo de la precipitación efectiva se utilizó la metodología empleada en el estudio de la DGA-GCF, 2010, la cual relaciona la precipitación total con la efectiva mediante un factor adimensional. De esta forma, la precipitación efectiva queda definida mediante la siguiente fórmula:

$$Pp_{efectiva} = (1-f_k) \cdot Pp_{total\ i}$$

Donde:

$Pp_{efectiva\ i}$ = Precipitación efectiva en la subcuenca i.

f_i = Factor utilizado en la calibración, adopta valores entre 0 y 1.

$Pp_{total\ i}$ = Precipitación total en la subcuenca i, según los resultados de la tabla

Para asignarle valor a los coeficientes f, y por consiguiente a la precipitación efectiva y la recarga de cada subcuenca, se realiza un balance hídrico que considera los caudales afluentes a cada zona de demanda evapotranspirativa del núcleo del salar, desde las subcuencas aportantes determinadas, y la evaporación desde cada una de ellas. Además, a diferencia del estudio del DGA-GCF (2010), se tomó en consideración la precipitación efectiva que cae directamente sobre la superficie del salar, y que también contribuye a la recarga. De acuerdo a lo anterior, se obtiene la siguiente expresión de balance:

$$EV_{núcleo} = \sum_{i=1}^{16} (Pp_{efectiva\ i} - EVT_i - EVL_i) + Pp_{efectiva\ núcleo}$$

Donde:

$EV_{núcleo}$ = Evaporación en el núcleo del salar. Corresponde a la única salida del salar, y adopta el valor de 5,6 m³/s.

$Pp_{efectiva\ i}$ = Precipitación efectiva en la subcuenca i. Es el valor a calibrar en el balance, mediante la variación del coeficiente f.

EVT_i = Caudal de demanda evapotranspirativa en la subcuenca i, considerando vegas, bofedales, zonas de cultivo y forestaciones.

EVL_i = Caudal de demanda evapotranspirativa de lagunas en la subcuenca i.

$Pp_{efectiva\ núcleo}$ = Precipitación efectiva sobre el núcleo del salar.

Para la obtención de la precipitación efectiva en el núcleo, y de acuerdo a los antecedentes consultados (DICTUC, 2004), se consideró que se evaporan 5 mm inmediatamente luego de eventos de precipitación. De esta forma, la precipitación efectiva en el núcleo del salar se estimó utilizando estación Planta SCL, correspondiente a la estación ubicada dentro del salar que cuenta con un período más extenso de registros, obteniendo la precipitación media anual en el período de 1974 a 2012 y restándole luego los 5 mm, para luego distribuir dicha precipitación en toda la superficie del núcleo. Con el procedimiento anterior, se obtuvo una precipitación efectiva de 786 l/s como promedio anual. Finalmente, una vez se contó con todos los valores requeridos, se realizó el balance hídrico anual, obteniéndose los valores entregados en la tabla 17.

Subcuenca	Pp Total (m3/s)	EVT Total (m3/s)	EV Lagunas (m3/s)	f	Pp Efectiva (m3/s)	Recarga (m3/s)
1	4,05	0,07	0	0,874	0,51	0,441
2	1,55	0,12	0	0,874	0,20	0,073
3	1,81	0,01	0	0,874	0,23	0,219
4	3,17	0,27	0,005	0,734	0,84	0,571
5	1,45	0,05	0	0,734	0,38	0,334
6	1,14	0,03	0	0,503	0,57	0,539
7	2,85	0,07	0	0,503	1,42	1,345
8	0,54	0,01	0	0,814	0,10	0,087
9	4,03	0,02	0	0,814	0,75	0,729
10	6,76	0	0	0,959	0,28	0,274
11	2,28	0	0	0,948	0,12	0,119
12	0,23	0	0	0,948	0,01	0,012
13	2,27	0	0	0,948	0,12	0,119
14	0,07	0	0	0,948	0	0,004
15	0,17	0	0	0,948	0,01	0,009

Tabla 17. Balance Hídrico

3.9 Caracterización Hidroquímica

La caracterización hidroquímica de las aguas superficiales y subterráneas de la cuenca del Salar de Atacama se ha realizado a partir del análisis de resultados químicos de una serie de campañas de muestreo mensual que se están realizando en el marco de este proyecto desde Febrero 2013. Estas actividades consisten en la medición mensual de parámetros físico-químicos *in situ* y análisis de la calidad físico-química del agua en laboratorio. Posteriormente se realiza en gabinete la interpretación de estos resultados, los cuales se han utilizado para entender de mejor forma las características del acuífero.

Para el tratamiento e interpretación de resultados químicos se han realizado agrupaciones de muestras según el sector en el que se encuentran, como se describe a continuación:

- **Núcleo (N):** incluye todos los pozos que se encuentran en el área del salar donde sólo se encuentran salmueras en el acuífero.
- **Sistema La Punta y La Brava (PB):** incluye las lagunas con estos mismos nombres.
- **Sistema Peine (P):** incluye las lagunas denominadas Salada, Saladita e Interna.
- **Sector Tilopozo (TZ):** incluye todos los puntos de agua subterránea ubicados en el sector sur del salar, dentro del área con costra salina importante y que recibe recarga de aguas subterráneas desde el acuífero de Monturaqui.
- **Borde Sector Tilopozo (BTZ):** incluye todos los afloramientos y puntos de agua subterránea ubicados en el sector sur del salar, fuera del área con costra salina importante y que recibe recarga de aguas subterráneas desde el acuífero de Monturaqui.
- **Borde Sector Tilomonte (BTM):** incluye todos los afloramientos y puntos de agua subterránea ubicados en el sector sureste del salar.
- **Borde Oriental (BO):** incluye todos los afloramientos de aguas superficiales ubicados en el sector oriental del área de estudio, en el borde exterior del salar
- **Sistema Norte (SN):** incluye las lagunas del sector norte del salar, denominadas Chaxas, Quelana y Barros Negros.

Punto	WGS 84			Tipo de Punto	Propiedad del Punto	Sector
	Norte	Este	Altura (m.s.n.m)			
S-3	7.380.963	570.769	2.313	Pozo	Rockwood Lithium	Núcleo
S-4	7.388.857	575.982	2307	Pozo	Rockwood Lithium	Núcleo
CL-6	7.376.975	572.421	2.308	Pozo	Rockwood Lithium	Núcleo
TPB-5	7.380.932	576.841	2.310	Pozo	Minera Escondida	Núcleo
Piezo-1	7.384.032	572.836	2304	Pozo	Rockwood Lithium	Núcleo
Piezo-2	7.376.979	572.468	2306	Pozo	Rockwood Lithium	Núcleo
Piezo-3	7.384.211	579.260	2312	Pozo	Rockwood Lithium	Núcleo
Laguna La Punta	7.376.600	578.263	2.311	Laguna	-	Sistema La Punta La Brava
Laguna La Brava	7.375.129	577.265	2.311	Laguna	-	Sistema La Punta La Brava
Laguna Brava Punto C	7.375.129	577.265	2.312	Laguna	-	Sistema La Punta La Brava
Laguna Salada	7.380.623	587.679	2.311	Laguna	Comunidad Peine	Sistema Peine
Laguna Saladita	7.381.467	587.109	2.313	Laguna	Comunidad Peine	Sistema Peine
Laguna Interna	7.382.075	586.500	2.312	Laguna	Comunidad Peine	Sistema Peine
TPZ-6S	7.371.707	578.506	2.305	Pozo	S/I	Sector Tilopozo
TPZ-7S	7.373.277	577.630	2.310	Pozo	S/I	Sector Tilopozo
TM-6	7.362.006	580.451	2.424	Pozo	Minera Escondida	Sector Tilopozo
TP-1	7.367.609	578.502	2.327	Pozo	Minera Escondida	Sector Borde Tilopozo
TP-2	7.368.807	578.501	2.325	Pozo	Minera Escondida	Sector Borde Tilopozo
TP-3	7.366.866	578.924	2.336	Pozo	Minera Escondida	Sector Borde Tilopozo
Tilopozo	7.368.717	577.712	2.314	Pozo	Rockwood Lithium	Sector Borde Tilopozo
TS-8	7.370.743	590.469	2.351	Pozo	S/I	Sector Borde Tilomonte
Vertiente Tilomonte	7.368.684	590.777	2.376	Vertiente	-	Sector Borde Tilomonte
Quebrada Camar	7.411.194	606.314	2.722	Quebrada	-	Sector Borde Oriental
Vertiente Peine	7.380.542	596.010	2.461	Vertiente	-	Sector Borde Oriental
Laguna Chaxas	7.424.471	584.434	2.309	Laguna	CONAF	Sistema Norte
Lagunas de Quelana	7.403.903	593.855	2308	Laguna	CONAF	Sistema Norte
Laguna Barros Negros	7.415.908	586.194	2298	Laguna		Sistema Norte

Tabla 18. Detalle puntos de muestreo

En la siguiente figura se presenta la ubicación de todos los puntos de agua superficial y subterránea que forman parte de la actual red de muestreo. Esta corresponde a un total de 15 pozos, 2 vertientes, 1 quebrada o escurrimiento superficial y 9 aguas de lagunas o pozas.

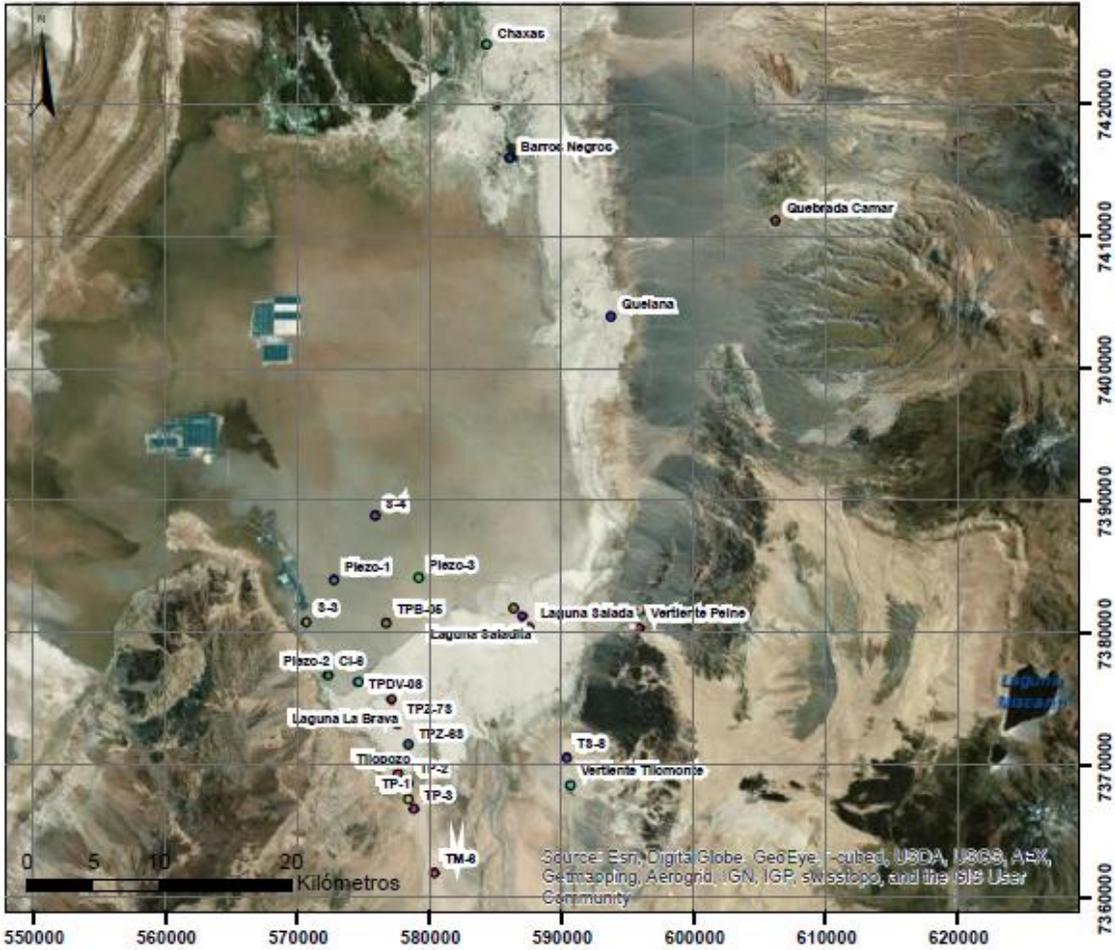


Figura 27. Ubicación Puntos de muestreo

3.9.1 Tratamiento de datos

Para todas las muestras, con los análisis entregados por el laboratorio, se calculó en primer lugar el error de balance mediante la siguiente fórmula donde se consideran los cationes y aniones mayoritarios (Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-}) y algunos de los elementos menores que en aguas salobres y saladas del salar presentan también concentraciones relativamente importantes, como son el Nitrato, Boro, Litio y Estroncio:

$$\text{Error}(\%) = 100 \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}}$$

Dado que las aguas deben mostrar un equilibrio eléctrico entre las cargas de sus especies disueltas, el error de balance admitido para aguas dulces es comúnmente de un máximo

de un 10%, en valor absoluto. Los errores de balance negativos indican que la concentración de alguna (o algunas) de sus especies aniónicas ha sido sobreestimada, o bien que los análisis de las especies catiónicas han subestimado alguna de estas concentraciones. El error de balance positivo, indica lo contrario.

El error dependerá de los métodos analíticos empleados y su admisibilidad suele ser especificada por cada laboratorio. Para soluciones muy concentradas, como los suelos áridos o las salmueras, hay que diluir la muestra, lo que provoca una mayor probabilidad de error (Comisión Docente del Curso Internacional de Hidrología Subterránea, 2009).

Como se menciona anteriormente, para aguas hipersaladas como lo son las salmueras que se encuentran en esta cuenca, es difícil determinar con una alta exactitud las concentraciones de cada uno de los compuestos químicos disueltos en las muestras debido a que muchos de ellos se encuentran cerca de su índice de solubilidad.

Cuando los análisis entregados por el laboratorio presentaron errores superiores a estos valores de error de balance, se solicita la revisión y/o re-análisis de los mismos para tener mejores resultados. Si una vez revisadas y/o reanalizadas, se corroboran las concentraciones detectadas, estas no son tenidas en cuenta para el análisis químico de las aguas.

3.9.2 Concentraciones y composiciones químicas

A continuación se presenta el análisis de los parámetros físico-químicos, las concentraciones de las muestras de agua superficial y subterránea tomadas durante las campañas de muestreo químico realizadas hasta el mes de septiembre, donde se analizan además las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos del acuífero de agua salobre presente en el sector sur y el borde Este del Salar, los sistemas de lagunas La Punta-La Brava; Peine (Salada, Saladita e Interna) y Sistema Norte (Quelana, Chaxas y Barros Negros), y la salmuera del sector de la zona de transición y del núcleo. Para este análisis, como se mencionó anteriormente, se realizaron 8 agrupaciones de muestras según los sectores en los que se encuentran.

3.9.3 Parámetros físico químicos

En la tabla 19, se presentan los resultados máximo, mínimo y promedio de los parámetros *in situ* y analizados en el laboratorio para cada una de las 8 agrupaciones realizadas por sectores, en los que se observa que no existen diferencias apreciables a los medidos en laboratorio.

Ubicación de Puntos para análisis	Sector	Valores de Concentración	Parámetros In Situ				Parámetros de laboratorio			
			pH	Cond (µS/cm)	T (°C)	Alcalinidad (mg/L)	pH	Cond (µS/cm)	T (°C)	Alcalinidad (mg/L)
Sistema Norte	SN	Mínimo	6,8	103.600	9,6	540	6,9	115.300	22,0	382
		Máximo	8,5	187.600	29,1	1.273	8,1	234.000	22,0	776
		Promedio	7,8	142.600	18,1	745	7,7	170.116,7	22,0	547,5
Borde Oriental	BO	Mínimo	7,0	1.569	20,3	<400	7,6	1.744	19,0	129,7
		Máximo	8,2	4.300	25,3	621	8,6	4.210	22,0	689
		Promedio	7,7	3.264,15	23,4	482,2	8,0	3.219,1	20,9	380,1
Borde Sector Tilomonte	BTM	Mínimo	7,3	5.779	9,9	<400	7,4	5.390	19,0	31
		Máximo	9,1	9.745	25,0	783	8,9	10.700	23,0	344,9
		Promedio	8,4	6.372,87	17,4	471,5	8,4	6.499,23	21,2	138,7
Sistema Peine	P	Mínimo	7,8	28.820	-4,0	<400	7,9	36.000	21,0	196
		Máximo	9,7	65.940	28	807	8,4	67.700	22,0	271
		Promedio	8,4	46.694,29	15,7	481,7	8,1	4.8261,1	21,6	238,7
Sistema La Punta Brava	PB	Mínimo	7,6	27.110	7,3	<400	8,0	26.900	20,0	310
		Máximo	9,3	77.160	30,4	675	8,6	77.800	23,0	493
		Promedio	8,3	41.536,25	16,8	541,6	8,3	39.447,7	21,5	397,0
Sector Tilopozo	TZ	Mínimo	7,2	6.558	10,4	<400	7,5	6.280	19,0	160
		Máximo	8,3	40.800	25,5	647	8,6	37.000	24,0	416
		Promedio	7,7	15.998,57	17,2	464,7	7,9	15.540	21,8	319,3
Borde Sector Tilopozo	BTZ	Mínimo	6,9	2.435	19,3	<400	7,1	2.210	19,0	272
		Máximo	7,5	9.059	28,4	700	8,1	9.300	25,0	487,2
		Promedio	7,1	3.931,41	24,9	503,5	7,5	3.770,8	21,8	388,5
Núcleo	N	Mínimo	6,5	79.060	10,3	434	6,3	84.800	19,0	272,6
		Máximo	8,5	>200.000	29,8	1.231	8,3	611.500	24,0	1.121
		Promedio	7,1	>200.000	20,6	735,8	7,0	481.570,2	21,6	612,6

Tabla 19. Mínimo, máximo y promedio parámetros físico químicos (in situ y laboratorio)

A continuación se analizan los valores mínimos, máximos y promedio de los parámetros pH, conductividad, temperatura y alcalinidad medidos *in situ* y en laboratorio para los 8 sectores definidos para el análisis químico de las aguas.

Los valores de pH medidos en terreno y en laboratorio para los puntos muestreados presentan valores neutros a alcalinos entorno a los 7,8, donde se observa además que los sectores Sistema Peine y Sistema La Punta-La Brava, y que representan los sistemas de Lagunas del mismo nombre, muestran los valores promedio más alcalinos (8,4 y 8,3 respectivamente), alcanzando valores máximos entorno a los 9,3 y mínimos alrededor de 7,6. Al igual que estos sistemas, el Borde del Sector Tilomonte presenta valores promedio alcalinos (8,4); valores máximos en torno a 9,1; y su valor mínimo presenta tendencia a la neutralidad (7,3).

El sistema Norte, que agrupa a los sistemas de Lagunas Quelana y Soncor presenta valores promedio más neutro (7,8); valor máximo de 8,5 y su valor mínimo es menos alcalino (6,8) que los sistemas de lagunas del borde sur

Los sectores Tilopozo y Borde Oriental presentan valores promedio de 7,7, y sus valores máximos y mínimos se encuentran en torno a 8,2 y 7,0 respectivamente. Los sectores del borde Tilopozo y Núcleo, presentaron valores promedio de 7,1; máximos de 7,5 y 8,4 respectivamente, y mínimos de 6,9 y 6,5, siendo este último el menos alcalino de todos los sectores analizados, lo indicando que los flujos de agua salobre provenientes de los del bordes Este y Sur del Salar, al igual que los sistemas de lagunas presentan tendencias a ser más alcalinos en relación a la salmuera del núcleo y la zona de transición.

Los valores de conductividad medida *in situ* y la medida en laboratorio no presentan variaciones importantes y estas a su vez presentan gran variabilidad en función del sector muestreado, siendo el sector del Núcleo el que presenta las mayores conductividades las medidas *in situ*, las cuales son mayores en todos los casos, a los 200.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valores promedio de conductividad medida en el laboratorio de 481.570 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y valor máximo de 611.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (muestra del Piezómetro-3 durante el mes de Julio).

El sector Sistema Norte, presenta conductividades promedio *in situ* y medidas en el laboratorio entorno a los 150.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, alcanzando su máximo valor en la Laguna Barros Negros durante la campaña desarrollada en el mes de septiembre 2013 (187.600 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y su mínimo valor (103.600 $\mu\text{S}/\text{cm}$) se determinó en marzo (Laguna Chaxas) .

Los sectores Sistema Peine y Sistema La Punta-La Brava, presentan conductividades promedio *in situ* y medida en laboratorio alrededor de 47.000 y 40.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente, mostrando su máximo y mínimo valor en la Laguna La Brava en el cuerpo de agua principal (77.160 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y en un afluente de esta misma (27.110 $\mu\text{S}/\text{cm}$), en el caso del Sistema La Punta La Brava. En el sistema Peine, la Laguna Interna en el mes de febrero presentó el máximo valor (65.940 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y la Laguna Salada el mínimo (28.820 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

En el sector Tilopozo, la conductividad promedio medida *in situ* y medida en laboratorio alrededor de 15.600 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La conductividad promedio *in situ* y medida en terreno del borde del Sector Tilomonte mostró valores de ~6.400 $\mu\text{S}/\text{cm}$..

Los Sistemas del Borde Sector Tilopozo y Oriental, presentaron las menores conductividades promedio *in situ* y medidas en el laboratorio, con valores que se encuentran entorno a los 3.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, el mínimo valor se obtuvo en el mes de febrero en el pozo TM-6 (2.435 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en el caso del sector Borde Sector Tilopozo, su máximo valor *in situ* fue 9.059 $\mu\text{S}/\text{cm}$, medido en el punto TP-2 en el mes de febrero y 4.300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para la Vertiente Peine en el mes de agosto, en el caso del Borde Oriental.

Para la interpretación de las concentraciones de elementos mayoritarios y minoritarios, al igual que los parámetros físicoquímicos, las muestras se han agrupado en los ocho sectores descritos anteriormente. En la tabla 20 se muestra el resumen de las concentraciones promedio, máximas y mínimas obtenidas en cada sector.

Ubicación de puntos para análisis	Concentraciones	Cationes					Aniones		
		Na (mg/L)	K (mg/L)	Mg (mg/L)	Ca (mg/L)	Cl (mg/L)	SO4 (mg/L)	HCO3 (mg/L)	NO3 (mg/L)
Sistema Norte	Mínimo	22430	3128	2090	537	48528	5540	487	3,42
	Máximo	53893	7198	3605	1301	85637	10981	770	5,41
	Promedio	40996,2	5327,8	2742,2	889	62797,2	8709,4	639,6	4,76
Núcleo	Mínimo	68524	2899	4167	304	158546	4931	455	2,53
	Máximo	135841	29175	12960	789	207195	20506	981,5	31,54
	Promedio	109059,7	17384,6	8294,3	503,3	189864,1	12738,2	769,2	10,0
Borde Oriental	Mínimo	232	0,25	64,2	115	219	438	144	1,09
	Máximo	612	29,5	135	306,12	1000	757	631	5,48
	Promedio	440,3	20,0	97,5	207,2	564,8	682,8	417,5	3,7
Borde Sector Tilomonte	Mínimo	701	31,2	34,3	111	1361	3,33	17	0,61
	Máximo	1187	75,5	393	295	2064	747	231	21,8
	Promedio	924,2	64,4	135,5	199,5	1749,8	370,8	121,49	3,173
Sistema Peine	Mínimo	5473	811	629	566	13209	1686	239	1,97
	Máximo	15110	2297	1826	1093	27466	4174	336	13
	Promedio	8818,6	1330,4	947,58	704	17010,7	2347,7	288,8	3,2
Sistema La Punta La Brava	Mínimo	1003	715	523	160	7271	1546	378	1,56
	Máximo	20189	2715	1262	481	29494	4727	578	5,86
	Promedio	8620,5	1291,7	767,3	302,4	14637,5	2806,9	464,4	3,3
Sector Tilopozo	Mínimo	230,1	2,6	8,14	83,3	250	388	380	2,29
	Máximo	9294	997	809	250	38818	4684	507	8,02
	Promedio	3943,2	493,9	363,94	172,56	7837,6	2384	448,2	5,55
Borde Sector Tilopozo	Mínimo	312,2	33,86	60,62	99	412	387	456	0,4
	Máximo	1427	249	160	182	4605	517	515	5,49
	Promedio	692,8	84,79	83,85	145,8	1319,8	421,33	476,61	4,44

Tabla 20. Mínimo, máximo y promedio elementos mayoritarios

3.9.4 Elementos mayoritarios

En cuanto a la concentración de cationes, en general para todos los sectores analizados, el sodio es el catión mayoritario, mostrando mayor concentración promedio en el sector del Núcleo (109059,7 mg/l), seguido del Sistema Norte (40996,2 mg/l), y los sectores Sistema Peine, La Punta La Brava y sector Tilopozo (8818,6; 8620,5 y 3943,2 mg/l respectivamente), y finalmente los sectores Borde Tilomonte, Borde Tilopozo y Borde Oriental, siendo este último el que presenta menor concentración de Sodio (440,3 mg/l). Al igual que el sodio, el potasio presenta la mayor concentración promedio en el sector del Núcleo (17384,6 mg/l) y la menor concentración en el Sector Borde Oriental (20 mg/l).

El magnesio también presenta sus mayores concentraciones promedio en los sectores del Núcleo (8294,3 mg/l) y Sistema Norte (2742,2 mg/l), pero su menor concentración se presenta en el sector del Borde Tilopozo (83,85 mg/l).

En cuanto al catión calcio, este reporta su mayor concentración promedio en el Sistema Norte (889 mg/l) y el Sistema Peine (704 mg/l) respectivamente, mientras que las

menores concentraciones de magnesio se observan en el sector Borde Tilopozo (145,8 mg/l).

En el caso de los aniones, se observa que el Cloruro es predominante en todos los sectores de análisis.

En cuanto al anión Sulfato, los sectores Núcleo y Sistema Norte muestran mayores concentraciones promedio en relación a los demás sectores (12738,2 y 8709,4 mg/l respectivamente), seguidos de los sistemas La Punta La Brava (2806,9 mg/l), Tilopozo (2384 mg/l) y Peine (2347,7 mg/l), y finalmente los Sectores Borde Oriental (682,8 mg/l), Borde Tilopozo (421,3 mg/l) y Borde Tilomonte (370,8 mg/L).

El anión Bicarbonato muestra mayores concentraciones en los sectores Núcleo (769,2 mg/L) y en el sector Sistema Norte (639,6 mg/L). Concentraciones similares de bicarbonato se observan en los sectores Borde Tilopozo, La Punta La Brava, Sistema Tilopozo y Borde Oriental (476,61; 464,4; 448,2 y 417,5 mg/L respectivamente). La menor concentración de bicarbonato se detectó en el sector Borde Tilomonte, con 121,49 mg/L.

El anión Nitrato muestra su mayor concentración en el sector Núcleo, con 10 mg/L, mientras los sectores Tilopozo, Sistema Norte y Borde Tilopozo registran concentraciones de 5,55; 4,76 y 4,44 mg/L en promedio. Los otros tres sectores restantes; Borde Oriental, La Punta La Brava, Sistema Peine y Borde Sector Tilomonte muestran concentraciones de 3,7; 3,3; 3,2 y 3,17 mg/L respectivamente.

3.9.5 Elementos minoritarios y trazas

Los elementos menores y trazas se analizaron en su fracción disuelta (filtrada a 0,45 µm) y total. Los elementos analizados como disueltos fueron el Arsénico, Boro, Bario, Estroncio, Litio, Plata, Silicio y Zinc. Los elementos analizados como totales fueron Calcio, Magnesio, Sodio, Potasio, Plata, Aluminio, Arsénico, Boro, Bario, Berilio, Cadmio, Cobalto, Cromo, Cobre, Hierro, Litio, Manganeso, Molibdeno, Níquel, Plomo, Selenio, Estroncio, Vanadio y Zinc.

De éstos, Plata, Aluminio, Arsénico, Boro, Bario, Berilio, Cadmio, Cobalto, Cromo, Cobre, Hierro, Molibdeno, Manganeso, Níquel, Plomo, Selenio y Vanadio presentaron concentraciones bajo el límite de detección en la mayoría de las muestras de agua tomadas.

De estos elementos, las concentraciones totales de Berilio, Cadmio, Cromo, Molibdeno, Plomo y Vanadio para las muestras que detectaron estos elementos, es inferior a 1 mg/l. En el caso de la Plata, Aluminio, Bario, Cobre, Hierro y Zinc no exceden los 5 mg/l en las muestras que mostraron estos elementos

Finalmente, el Cobalto, Manganeseo y Níquel, total, en las muestras con trazos de estos, cada uno de estos elementos no exceden los 10 mg/l.

Cabe indicar que algunos de los puntos muestreados, en especial, los correspondientes a la salmuera, presentan aumento en su concentración de Hierro, lo que pudiese indicar aporte de la oxidación que se producen en los pozos por efecto de la salmuera sobre la tubería.

Las concentraciones de Arsénico, Boro Silicio, Estroncio y Zinc presentaron traza de estos en las aguas analizadas, de los cuales, sus valores promedios no superan los 5 mg/l.

Referente a los elementos medidos en su fracción disuelta, en la tabla 21 se muestra el resumen de las concentraciones promedio, máximas y mínimas obtenidas en cada sector, para los elementos minoritarios disueltos que a lo largo del muestreo químico han presentado concentraciones superiores a 10 mg/l.

Ubicación de Puntos para análisis	Sector	Valores de Concentración (mg/L)	Metales Minoritarios disueltos					
			As (mg/L)	B (mg/L)	Sr (mg/L)	Li (mg/L)	Si (mg/L)	Br (mg/L)
Sistema Norte	SN	Mínimo	0,92	107,0	0,3	64,7	7,1	4,2
		Máximo	4,19	210,0	28,0	285,0	16,0	14,9
		Promedio	2,28	146,0	14,5	189,5	13,5	10,2
Borde Oriental	BO	Mínimo	0,07	4,6	0,5	0,3	19,0	<0,02
		Máximo	0,50	8,6	7,4	1,1	43,0	5,9
		Promedio	0,25	6,5	2,9	0,6	31,6	1,8
Borde Sector Tilomonte	BTM	Mínimo	<0,01	6,3	1,1	0,5	0,5	<0,02
		Máximo	0,23	12,5	8,4	7,1	37,0	11,0
		Promedio	0,08	9,0	3,7	1,4	22,4	3,1
Sistema Peine	P	Mínimo	<0,01	30,4	5,0	19,4	16,0	<0,02
		Máximo	8,03	82,6	24,0	147,0	31,0	6,3
		Promedio	1,42	45,1	13,0	68,8	24,4	3,6
Sistema La Punta La Brava	PB	Mínimo	1,28	39,7	2,1	16,9	21,0	<0,02
		Máximo	4,67	94,2	12,0	143,0	37,0	8,6
		Promedio	2,20	57,9	7,0	59,9	28,7	5,3
Sector Tilopozo	TZ	Mínimo	0,14	8,6	0,8	8,1	20,2	<0,02
		Máximo	2,95	56,0	12,0	53,6	45,0	66,0
		Promedio	0,89	21,2	4,1	17,3	30,8	5,6
Borde Sector Tilopozo	BTZ	Mínimo	0,18	6,7	0,9	0,9	29,0	0,2
		Máximo	0,42	20,2	10,0	15,5	118,0	55,0
		Promedio	0,34	10,4	2,8	3,9	46,9	5,0
Núcleo	N	Mínimo	<0,01	40,2	0,8	48,9	<2	<0,02
		Máximo	20,20	587,0	195,0	1.928,0	42,0	384,0
		Promedio	2,57	292,2	22,3	763,0	5,3	73,8

Tabla 21. Mínimo, máximo y promedio elementos minoritarios

En general se observa que el sector del Núcleo presenta mayor concentración química de los elementos minoritarios, donde el Litio es el elemento más abundante en todos los sectores, a excepción del sector Borde Oriental presenta como elemento de fracción disuelta más abundante el Silicio. Seguido de este, se encuentra el Boro, donde al igual que el Litio, las mayores concentraciones se presentan en el Núcleo y Sistema Norte; y el sector Borde Oriental el que presenta menor concentración promedio de este metal disuelto.

Adicional a esto, se denota que el sector Borde Tilopozo, presenta menor concentración de la mayoría de elementos minoritarios en relación a los otros sectores.

La definición de composición de un agua se realiza mediante el análisis de las concentraciones relativas de los iones mayoritarios Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{+2} , K^+ y Mg^{+2} , utilizando diagramas tales como el de Piper o de Stiff modificado (Custodio, 1983).

De acuerdo a la información obtenida en los muestreos, se observa en la figura 28 que el agua tomada mensualmente, desde febrero hasta septiembre, en los pozos ubicados en el Núcleo presenta una composición clorurada sódica.

Las muestras de agua de los Sistemas La Punta-La Brava, Peine y Norte figuras 29,30 y 31 respectivamente, correspondientes a las lagunas del borde del salar, son en general cloruradas sódicas, donde se denota que el sistema Norte presenta levemente, una mayor proporción de los iones Cloruro y Sodio en relación a los otros sistemas ubicados en el sector sur del Salar.

En las figuras 32 y 33 se presentan las aguas muestreadas en los puntos de agua de los sectores Tilopozo y Borde Sector Tilopozo, donde se denota que, en general, estas aguas son cloruradas sódicas, a excepción de la muestra TM-6 que es de tipo sulfatada sódica.

En el Borde Oriental y el Borde Sector Tilomonte, se observó que composicionalmente las aguas son cloruradas sódicas, pero a su vez muestran enriquecimiento del ión magnesio.

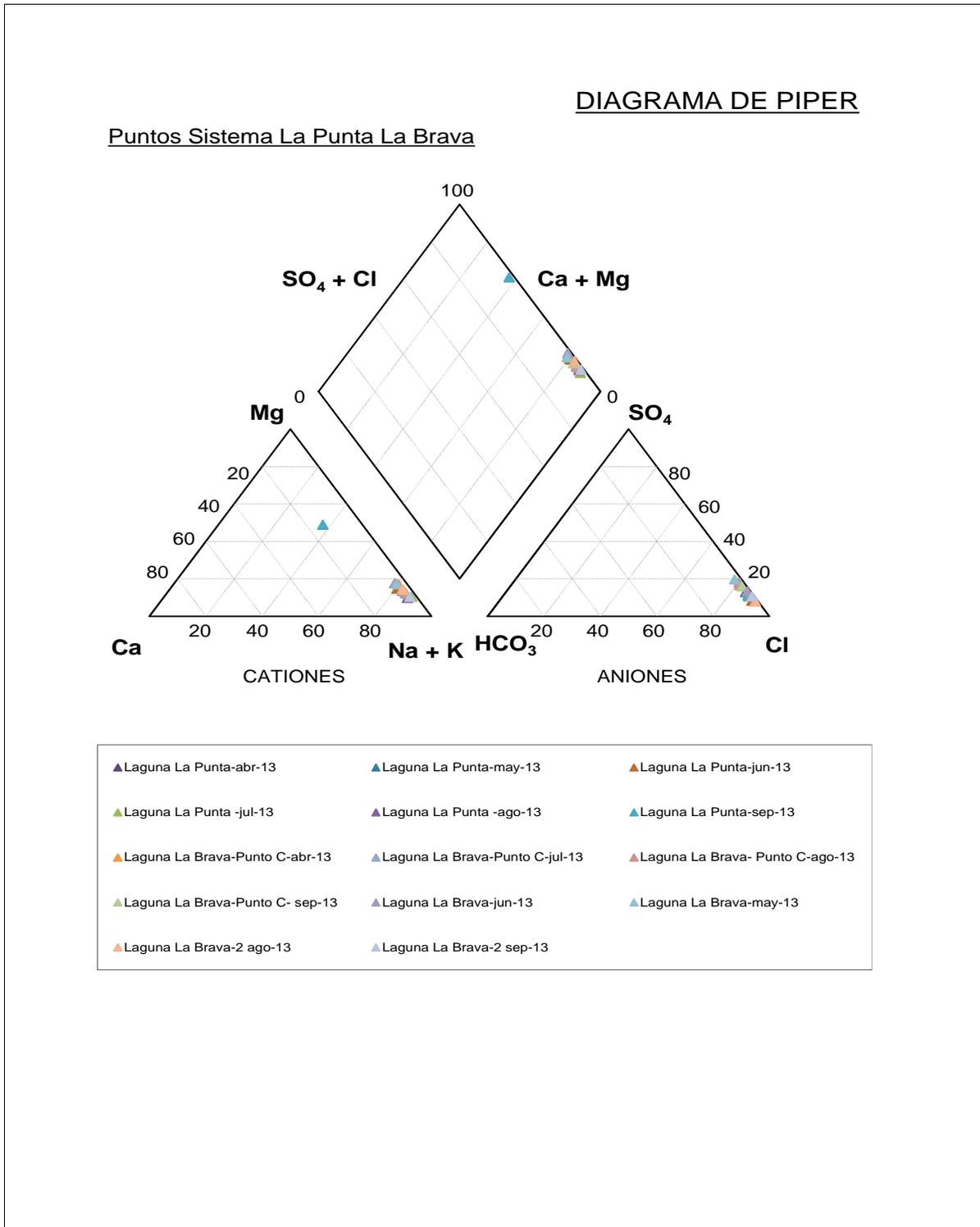


Figura 29. Diagrama de Piper Sistema La Punta La Brava

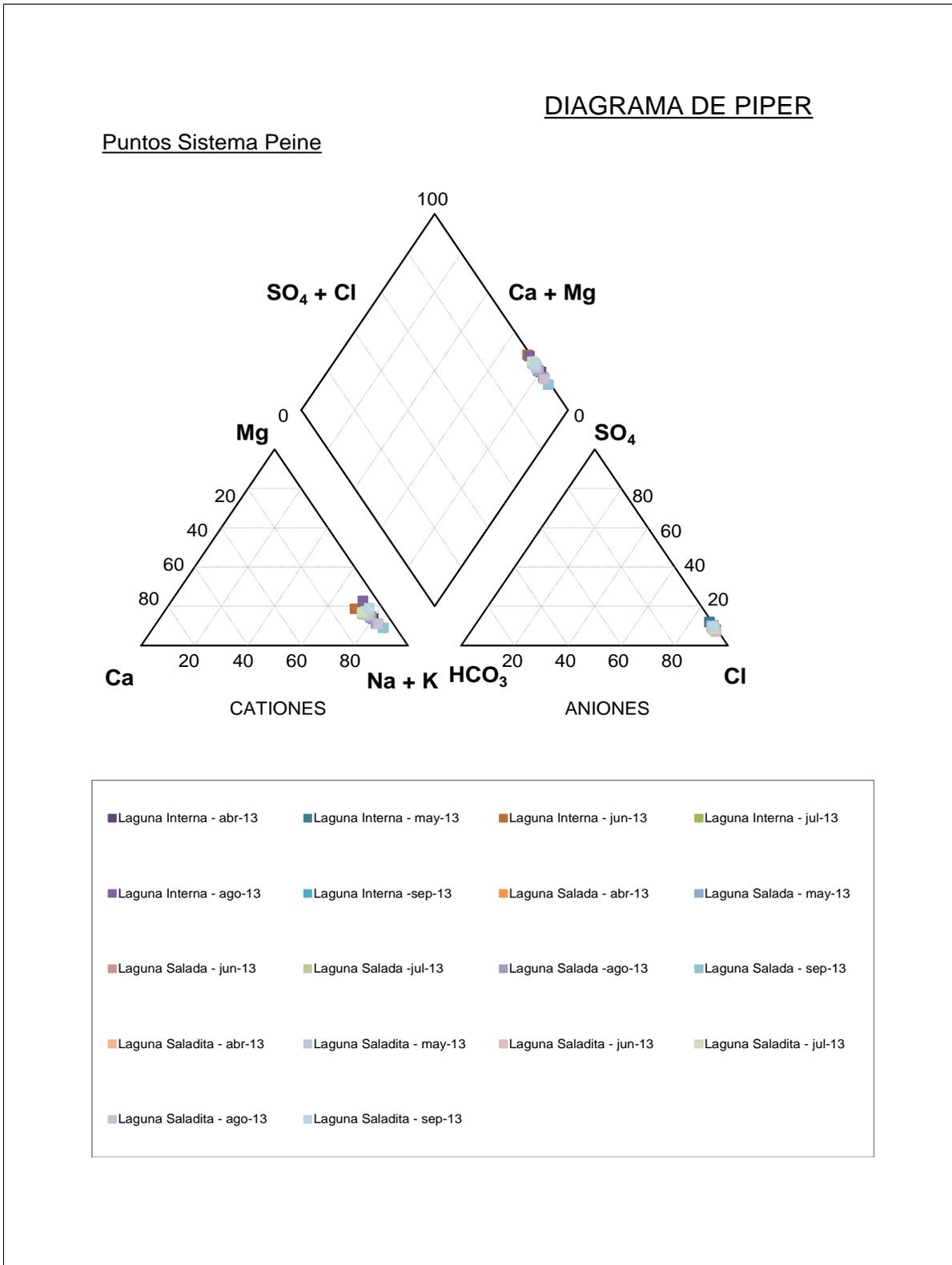


Figura 30. Diagrama de Piper Sistema Peine

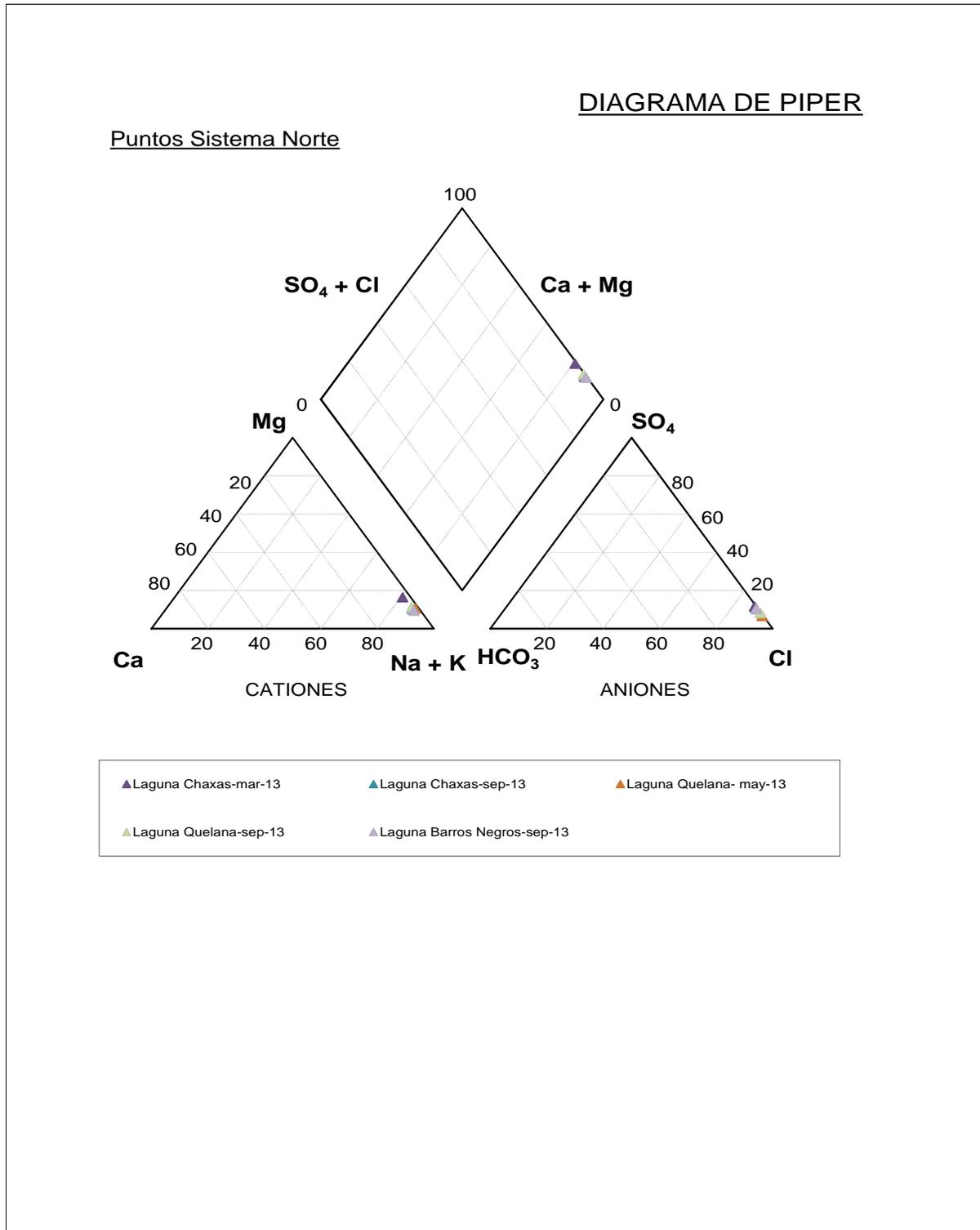


Figura 31. Diagrama de Piper Sistema Norte

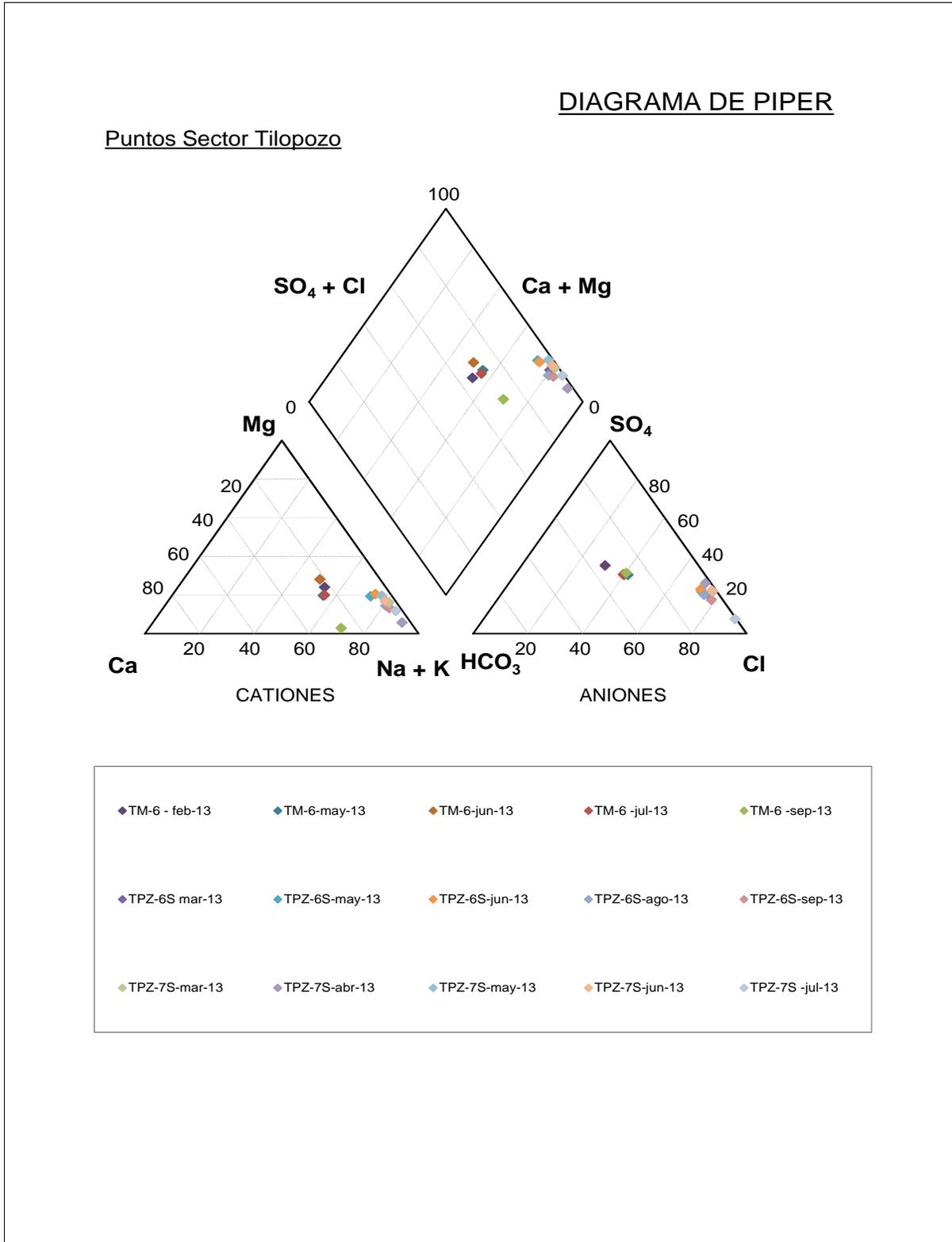


Figura 32. Diagrama de Piper Sector Tilopozo

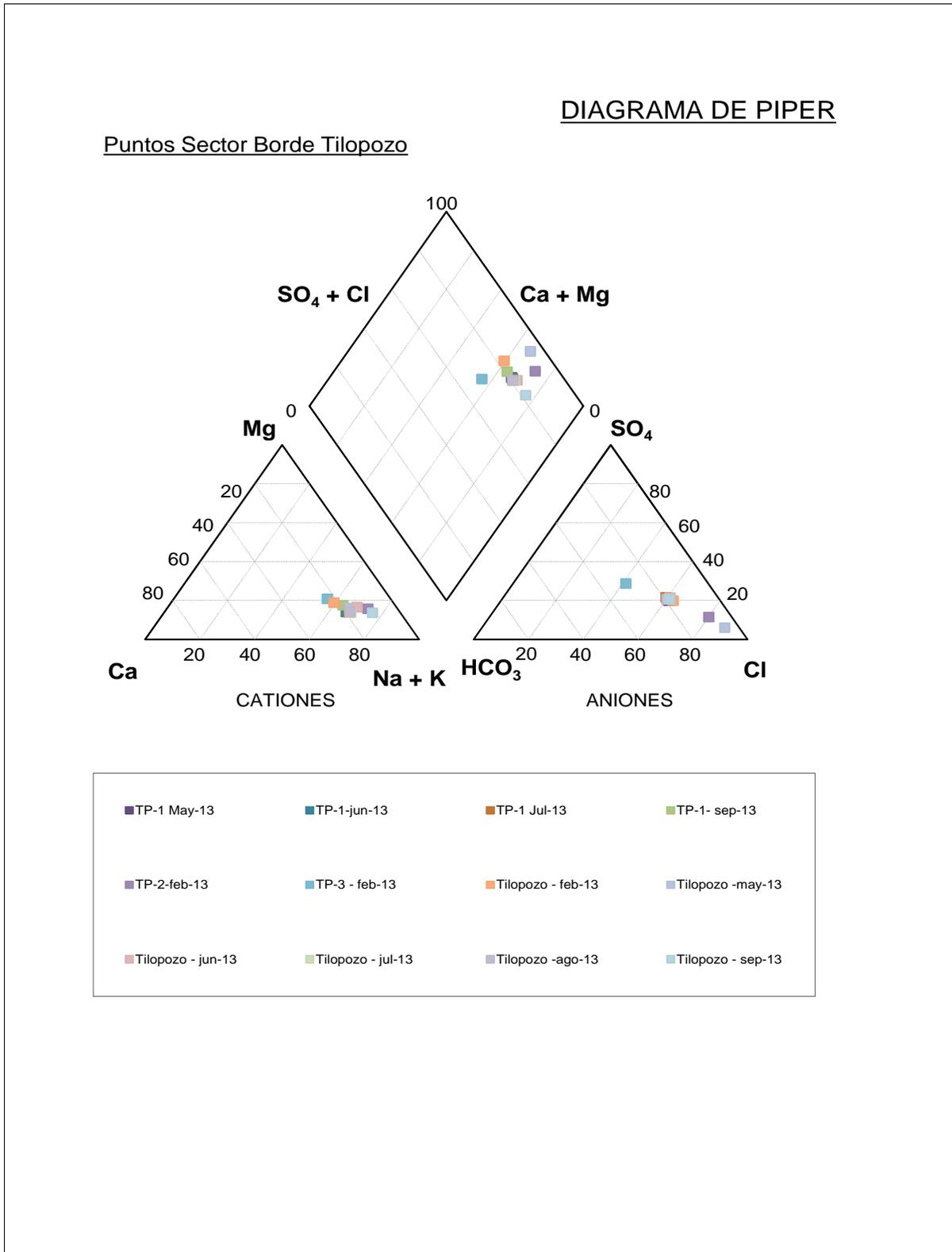


Figura 33. Diagrama de Piper Sector Borde Tilopozo

4 Conclusiones

- Las unidades hidrogeológicas reconocidas en el área de estudio se diferencian principalmente en tres sectores:
Borde este, que en sus configuración somera se compone principalmente de depósitos sedimentarios y arenosos, para en profundidad estar compuesto de ignimbritas.
Borde sur, que se compone de dos unidades, una volcánico sedimentaria y otra salina.
Núcleo, el cual se reconoce como una unidad de depósitos de halita cristalina.
- La aplicación de técnicas geofísicas TEM permitió reconocer la configuración somera del sector sur del salar de Atacama. En el sector sur se puede observar una zona de agua dulce y/o mezcla con salmuera, lo que explicaría el afloramiento de las lagunas.
- De acuerdo al balance hídrico realizado, la recarga del acuífero salar de Atacama, corresponde a 0,325 m³/s.
- Las campañas de muestreo químico de las aguas, y los posteriores análisis de laboratorio, han permitido comprobar que la concentración en iones cloruro y sodio es preponderante en todas las muestras de agua analizadas, y que hacia los sectores borde Oriental y borde Tilomonte, la composición de las aguas evoluciona hacia composiciones que contienen mayor proporción de magnesio y calcio.

5 Bibliografía

Börgel 1983. Geografía de Chile Tomo 2 Geomorfología. Instituto Geográfico Militar, Santiago

CPH Consultores Limitada, 2011. Informe: Hidrología e Hidrogeología Salar de Atacama. Adenda 2 EIA Planta de Producción de Sales de Potasio SLM NX UNO de Peine.

Custodio E., Llamas M.R., 1983. Hidrología subterránea. Ediciones Omega, S.A. Barcelona.

Dalannais, L. 1979. Hidrogeología del Borde Oriental del Salar de Atacama. Tesis para optar al título de Geólogo. Universidad del Norte. Departamento de Geología. Antofagasta.

DGA – Dictuc (2005) “Hidrogeología de la II Región y Asesoría para la Revisión de Informes de Estudios de Evaluación de Recursos Hídricos. Informe Final Salar de Atacama”.

DGA, 2013. Informe Técnico. Análisis de la oferta hídrica del Salar de Atacama. SDT N°339. Santiago, Abril de 2013.

DGA, Departamento de Administración de Recursos Hídricos, 2012. Evaluación de los recursos Hídricos Subterráneos del Acuífero del Salar de Atacama.

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

Escuder R. et al, 2009. Hidrogeología. Comisión Docente Curso internacional de Hidrología Subterránea.

GCF Ingenieros 1999. Actualización del modelo de simulación hidrogeológico del salar de Atacama

Kunasz 1979. Salar de Atacama Lithium reserves high calcium brine exploration.

L. Mardones 1986. Características Geológicas e Hidrogeológicas del Salar de Atacama”, El litio un nuevo recurso para Chile, Editorial Universitaria

Moraga, A; Chong, G; Fortt, M.A. 1974. Estudio Geológico del Salar de Atacama, provincia de Antofagasta. Instituto de Investigación Geológica (Chile), Bol N° 29.

Ramírez C. y Gardeweg M., 1982. Hoja Toconao. Carta Geológica de Chile N° 54, Escala 1:250.000. Servicio Nacional de Geología y Minería.

