



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA  
DEL SALAR DE SURIRE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

VALERIA FRANCISCA TORT MONTES

PROFESORA GUÍA:  
DOLORINDA DANIELE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
BERNARDO CAPINO DÍAZ  
SASKIA ROELS

SANTIAGO DE CHILE

2017

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE: GEÓLOGA  
POR: VALERIA FRANCISCA TORT MONTES  
FECHA: 7/09/2017  
PROFESORA GUÍA: LINDA DANIELE**

## **RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL SALAR DE SURIRE**

En la XV región de Chile existe un déficit hídrico que, sumado a la creciente demanda de agua, hace necesario estudiar el recurso hídrico. Este estudio se focaliza en la subcuenca endorreica altiplánica del Salar de Surire, y busca comprender el origen las aguas de la cuenca, sus procesos hidrogeoquímicos, y su calidad.

Esta cuenca se encuentra constituida principalmente por formaciones volcánicas y por depósitos de clastos volcánicos. En su base se forma un salar con ocasionales cuerpos lacustres. El clima es desértico-subdesértico, en donde en el verano austral ocurren los mayores eventos de precipitación. La esorrentía del salar se encuentra marcada por el Río Surire, vertientes frías menores a lo largo del perímetro del salar, y por una zona de manifestaciones termales en el costado SE.

Se analizaron 16 muestras que cumplieron el BI, distribuidas en 3 campañas: 6 muestras de noviembre del 2015, 5 muestras de mayo del 2016 y 4 muestras de agosto del 2016. Su temperatura fluctúa entre los 2,3°C a 46°C, siendo la mayoría de las muestras clasificadas como agua termal. El pH es neutro/alcalino, variando de 6,5 a 9,5. La CE es lo que más varía, desde los 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a los 71.500  $\mu\text{S}/\text{cm}$

El tipo de agua varía de bicarbonatadas cálcico-magnésico sódicas a aguas cloruradas sódicas, siendo las primeras de menor mineralización y lejanas al salar, y las segundas de mayor mineralización y cercanas o sobre el salar.

A partir del contexto geológico y del análisis de diagramas binarios, se sugiere la presencia de procesos de disolución de carbonatos y sulfatos de calcio y magnesio en la química del agua analizada. Las muestras presentan un exceso de sulfato que puede indicar un aporte diferente al mencionado. Las concentraciones de sílice están directamente relacionadas con la temperatura sugiriendo que la interacción agua/roca puede ser el origen de este elemento. Los datos isotópicos indican que las muestras poseen, en general, un origen meteórico, y algunas presentan procesos de fraccionamiento isotópico asociado a evaporación.

Las simulaciones en PHREEQC corroboraron los procesos de interacción agua/roca y disolución evaporítica. Los resultados de las simulaciones geoquímicas permitieron diferenciar las probables litologías en contacto con las muestras estudiadas. Esto, junto con una definición de unidades hidrogeológicas a partir de trabajos anteriores, logró resumir que: depósitos aluviales y fluviales Pa, Ha, y tobas fracturadas de OMI(b), poseen capacidad acuífera; la de los depósitos glaciales Qg es media/baja; la de estructuras volcánicas es variable; y, finalmente, los depósitos evaporíticos del salar pueden poseer capacidad acuífera ya sea a partir de permeabilidad primaria o secundaria. Finalmente, las aguas no cumplen con la norma de agua potable y siete de las ocho muestras tampoco cumplen con la norma de riego NCh1333. La muestra que sí cumple, es posible utilizarla para ese fin con un monitoreo constante asociado.

*No me interesa saber qué haces para ganarte la vida.  
Quiero saber lo que ansías, y si te atreves a conocer lo que tu corazón quiere.*

*No me interesa saber tu edad.  
Quiero saber si te arriesgarías a quedar como una tonta  
por amor,  
por tus sueños,  
por la aventura de estar viva.*

*Quiero saber si te detendrás en el centro del fuego conmigo  
y no retrocederás.*

Extracto de *La invitación*  
por Oriah Mountain Dreamer

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a la consultora ICASS por responder a mi petición de memoria en hidrogeología y realizar los trámites correspondientes para facilitarme los datos, al igual que por haberme acompañado en todo el proceso. A su vez, quiero agradecer a la Dirección General de Aguas, dueños de los datos, al entregarlos.

Agradecer a los miembros de mi comisión: Dra. Linda Daniele, académica del departamento de Geología, Universidad de Chile; Mag. Bernardo Capino, Gerente e Hidrogeólogo en ICASS Ltda.; y Dra. Saskia Roels, investigadora Postdoctoral de la Universidad de Chile. Les agradezco el tiempo invertido y la voluntad de formar a una nueva profesional.

Quiero agradecer a mis papás, de quienes siento su intención y su amor en cada cosa que hacen. A su esfuerzo en todo aspecto, cuyos frutos se ven en el presente de ellos, el mío y de mis hermanos, donde percibo la influencia de los valores de la simpleza, la conexión con la naturaleza y la importancia de la felicidad que han tenido siempre. A mis hermanos Karina, Catalina y Vicente, compañeros de vida, con quienes no me puedo imaginar sin, ya sea para perderme cosas (o yo perder cosas de ellos, pero me pasa menos) o pasar momentos inolvidables, hermosos, completos y mañosos.

A mis abuelos, en especial a la Lali, a quien aún recuerdo con todo mi corazón. También a la familia Montes y a la familia Tort, por muchísimos recuerdos que no se detienen y por los que se sumarán. A mis primos, en particular, que se sienten como hermanos.

Al [56], mis compañeros de colegio, que ya no son amigos sino que son familia, y que es una relación que todos sabemos que seguirá por el resto de la vida. Es una trayectoria de conocernos desde tal pasado, que la conexión apañará a cualquier futuro. A los gabros, compañeros de todos los terrenos y de innumerables carretes, geobienvenidas, estudios y momentos de estrés; a la Fani, compañera y amiga de la mayoría de estos años en beauchef; a la Romi, amiga infaltable con quien siempre me siento entendida; a la Cata, apañadora sobre todo en los primeros años de geología; a la Gis y a la Coni, dos joyitas que conocí en Rapa Nui, además de la Jesu, que resultó una compañera invaluable en este proceso de la memoria, siempre a la par en los procesos, hasta terminar presentando incluso el mismo día. A la agrupación de jóvenes hidrogeólogos por las reuniones conversadas y aprendidas, por los comentarios constructivos en este proceso, por la buena onda y por los futuros proyectos que espero que podamos concretar.

## TABLA DE CONTENIDO

Introducción .....	1
Estado del arte .....	1
Objetivos .....	2
Objetivos generales.....	2
Objetivos específicos .....	2
Hipótesis de trabajo .....	2
Metodología .....	3
Ubicación .....	4
Estudios anteriores .....	5
Marco teórico.....	7
Descripción técnica.....	7
Procesos hidrogeológicos en ambientes desérticos.....	10
Salinidad en suelos desérticos.....	10
Caso de cuencas endorreicas .....	10
Marco geográfico, geológico e hidrogeológico .....	12
Geomorfología.....	12
Hidrología .....	14
Aspectos generales del clima.....	14
Precipitaciones .....	14
Escorrentía superficial.....	15
Contexto geológico regional.....	16
Geología del área de estudio .....	18
Unidades litológicas .....	19
Estructuras.....	24
Perfiles Estructurales Esquemáticos.....	25
Hidrogeología.....	26
Manifestaciones termales .....	29
Datos hidroquímicos anteriores .....	30
Resultados .....	32

Discusión .....	38
Elementos mayores.....	38
Diagramas binarios .....	40
Sílice.....	47
Isótopos del agua .....	48
PHREEQC .....	52
Fases minerales .....	52
Índices de Saturación .....	53
Simulaciones Hidrogeoquímicas.....	53
Conclusiones de PHREEQC .....	73
Esquema de circulación .....	74
Calidad de las Aguas.....	76
Conclusiones.....	79
Bibliografía .....	81
ANEXOS .....	84

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: El Salar de Surire se encuentra en la XV región de Chile de Arica y Parinacota, en el sur de la comuna de Putre. La cuenca del Salar de SURire se encierra en negro.....	4
Figura 2: Unidades morfoestructurales en la latitud 19°S en Chile. Modificado de Muñoz (1996). .....	12
Figura 3: Principales estructuras de la cuenca hidrográfica del Salar de Surire. La máxima elevación, de color blanco grisáceo, corresponde a una altura sobre los 5480 m.s.n.m. Cada franja de color indica una altura de 266 mts. El nivel base del salar se encuentra en la cota 4300 m.s.n.m. Imagen trabajada en arcgis a partir de DEM.....	13
Figura 4: diagrama con los valores promedios DE precipitación mensual desde el año 1980 al año 2016 (rojo), máximo de precipitación mensual (naranja) y mínimo de precipitación mensual (verde). Este último valor es cero en todos los meses excepto enero, el cual posee un valor de 3,2 [mm]. Datos obtenidos de la estación meteorológica de Chilcaya de la DGA. ....	15
Figura 5: SFVE y SFVO a nivel regional, entre las regiones XV y I. Se presenta la falla inversa de Jaropilla y el anticlinal de Chucal en el borde Noroeste de la cuenca hidrográfica de estudio. Modificado de Farias (2005). ....	17
Figura 6: Mapa geológico de la zona de estudio. modificado de García (2004). Posee la línea de 3 perfiles A-A', B-B' y C-C'.....	19
Figura 7: Perfiles estructurales con las Principales unidades litológicas de la zona de estudio. Las líneas de perfil de encuentran en el mapa geológico de la zona (Figura 8).....	25
Figura 8: Escorrentía superficial, subterránea y área geotermal del Salar de Surire. La flecha azul indica la ubicación y la dirección de flujo del río Surire. ....	27
Figura 9: Diagrama de Piper con los análisis hidroquímicos recopilados de trabajos anteriores.....	31
Figura 10: Precipitaciones ocurridas entre las campañas de toma de muestras de agua de la cuenca del Salar de Surire. Datos obtenido de la estación meteorológica de Chilcaya de la DGA. ....	32
Figura 11: Puntos muestreados. El río Surire corresponde a los puntos 6, 4 y 5. El punto 9 corresponde al sistema hidrotermal, el punto 7 corresponde a un cuerpo lacustre menor del salar, y los puntos 2, 3 y 8 corresponden a vertientes.....	33
Figura 12: Diagrama de Piper. Se incluyen las muestras de las 3 campañas. ....	38
Figura 13: Diagramas de Stiff ubicados sobre los puntos analizados. Las diferencias de concentraciones entre muestras varía hasta en un factor de 300, por lo que las figuras se escalan de manera logarítmica: de 0 a 9 meq/L; 0-90 meq/L; y 0-900 meq/L. ....	39

Figura 14: Gráficos binarios de elementos mayores vs cloruro [mmol/l]. En el gráfico Na vs Cl se presenta la línea de disolución de halita. ....	42
Figura 15: Gráfico molar de Ca vs HCO <sub>3</sub> . ....	43
Figura 16: gráfico molar de (calcio+magnesio) vs HCO <sub>3</sub> .....	45
Figura 17: Gráfico molar de sulfato vs calcio+magnesio .....	46
Figura 18: Gráfico molar de Ca+Mg vs SO <sub>4</sub> +HCO <sub>3</sub> .....	47
Figura 19: Gráfico de temperatura vs silicio. La línea negra indica la línea de tendencia. No aparece la campaña 1 debido a que en ella no se analizaron datos de silicio total. ....	48
Figura 20: Diagrama 2H vs 18O. La recta meteórica del Lago Chungará se considera representativa del altiplano para usarse como referencia en la cuenca del Salar de Surire. *Obtenida de Herrera (2012). ....	49
Figura 21: Comparación de los análisis isotópicos de este estudio con los Análisis isotópicos de trabajos anteriores en la cuenca del Salar de Surire. ....	50
Figura 22: Simulación N°1 muestra 2. ....	55
Figura 23: Simulación N°1 muestra 6. ....	56
Figura 24: Simulación N°1 muestra 4. ....	57
Figura 25: Simulación N°2 muestra 4. ....	58
Figura 26: Simulación N°3 muestra 4. ....	59
Figura 27: Simulación N°1 muestra 5. ....	61
Figura 28: Simulación N°2 muestra 5. ....	62
Figura 29: Simulación N°3 muestra 5. ....	63
Figura 30: Simulación N°1 muestra 9. ....	65
Figura 31: Simulación N°2 muestra 9. ....	66
Figura 33: Simulación N°1 muestra 8. ....	67
Figura 34: Simulación N° 2 muestra 8. ....	69
Figura 35: Simulación N°3 muestra 8. ....	70
Figura 36: Simulación N°1 muestra 7. ....	71
Figura 37: Simulación N°2 muestra 7. ....	72
Figura 38: Esquema de circulación para la cuenca del Salar de Surire. Las líneas de los perfiles se encuentran en la fig. 8. ....	75
Figura 39: Asociaciones minerales graficadas según su temperatura relativa de equilibrio. Imagen obtenida de Best (2003). ....	86



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Abundancia de los isótopos de los elementos del agua en la naturaleza.....	8
Tabla 2: Definición de unidades hidrogeológicas y aproximación cualitativa de la permeabilidad a partir de las características geológicas de las unidades. ....	28
Tabla 3: Muestras por campaña con el resultado del balance iónico.....	34
Tabla 4: Observaciones de terreno de los puntos de muestreo.....	34
Tabla 5: Elementos mayores de las aguas muestreadas.....	37
Tabla 7: Índices de saturación de las muestras con respecto a los minerales representativos de la zona. Se obtuvieron a partir de las especies químicas mayores, especies de Aluminio y silicio (según el caso), el pH y la temperatura.....	53
Tabla 8: Simulación N°1 muestra 2. ....	54
Tabla 9: Simulación N°1 muestra 6. ....	55
Tabla 10: Simulación N°1 muestra 4.....	57
Tabla 11: Simulación N°2 muestra 4.....	58
Tabla 12: Simulación N°3 muestra 4. ....	59
Tabla 13: Simulación N°1 muestra 5.....	60
Tabla 14: Simulación N°2 muestra 5. ....	62
Tabla 15: Simulación N°3 muestra 5.....	63
Tabla 16: Simulación N°1 muestra 9.....	64
Tabla 17: Simulación N°2 muestra 9.....	66
Tabla 20: Simulación N°1 muestra 8.....	67
Tabla 21: Simulación N°2 muestra 8. ....	68
Tabla 22: Simulación N°3 muestra 8.....	70
Tabla 23: Simulación N°1 muestra 7.....	71
Tabla 24: Simulación N°2 muestra 7. ....	72
Tabla 26: Norma chilena de calidad de agua para el riego NCh 1333. Otros elementos incluidos en la norma pero se que encuentran bajo el límite de detección en la zona son cadmio, cianuro, cobre, hierro, plomo, manganeso, mercurio, plomo, selencio, zinc. En rojo los valores que no cumplen con la norma. ....	78
Tabla 27: Norma chilena de agua potable NCh 409. Otros elementos incluidos en la norma pero se que encuentran bajo el límite de detección en la zona son cadmio, cianuro, cobre, cromo, hierro, manganeso, mercurio, nitritos, plomo, selenio, zinc. En rosado los valores que no cumplen con la norma. ....	78
Tabla 28: Parámetros fisicoquímicos medidos in situ. C2 no se incluye debido a que la sonda multiparámetro no se pudo calibrar.....	85
Tabla 29: Especies químicas de elementos menores analizadas.....	85

# INTRODUCCIÓN

## ESTADO DEL ARTE

En el sector oriental de la XV Región de Arica y Parinacota se encuentra el altiplano chileno, el cual se caracteriza principalmente por su altura sobre los 4000 m.s.n.m. El recurso de agua en esta zona proviene en forma casi exclusiva de la precipitación y de recursos de agua fósil (Salazar, 1997). Los rellenos volcánicos cuaternarios, característicos de su geología reciente, generalmente son permeables, donde existen procesos de infiltración y transmisión del recurso hídrico. En el verano austral (diciembre-marzo) ocurren eventos de precipitación gracias a la llegada de masas húmedas de aire desde la cuenca amazónica, y el resto del año se caracteriza por su aridez.

En general, la calidad de aguas en el altiplano es regular, presentándose valores de As y B altos, que usualmente perjudican su uso para consumo y riego particularmente. Otros parámetros que en general afectan la calidad del agua es el sulfato y la conductividad eléctrica (Salazar, 1997).

En esta región existe un déficit hídrico estructural característico de la zona norte del país. Esto, sumado a la creciente demanda de agua debido al aumento progresivo de la actividad económica de la zona, hace necesario estudiar el recurso hídrico en la región. Este estudio se focaliza en la subcuenca altiplánica del Salar de Surire, que es una cuenca hidrográfica endorreica intra-arco ubicada en el altiplano chileno.

Se busca comprender el origen los recursos hídricos de la cuenca, los procesos por los que pasa y cómo afectan éstos a su calidad. La escorrentía del salar se encuentra marcada por el Río Surire, fuertemente estacional, por vertientes frías menores a lo largo del perímetro del salar, y por una zona geotermal en el costado SE.

Los datos hidroquímicos y las observaciones de terreno utilizados en este estudio fueron entregados por la consultora ICASS Ltda., la cual, mediante una oferta de licitación pública de la Dirección General de Aguas (DGA), realizó un estudio para actualizar la situación hídrica de la XV región. Se realizaron 3 campañas de muestreo fisicoquímico e hidroquímico en la cuenca del Salar de Surire.

Actualmente, la empresa minera Quiborax extrae minerales de boro en el sector poniente del salar, y en el sector oriente se encuentra el Monumento Natural Salar de Surire.

La empresa Quiborax realiza actividades extractivas de boratos de baja ley, principalmente ulexita, desde 1989 a la fecha, aunque la actividad minera en la zona se remonta desde tiempos desconocidos. Una vez esta materia prima se extrae, es transportada a una planta de tratamiento. Se considera que tanto las actividades extractivas como el transporte pueden resultar en modificaciones que pueden afectar el ecosistema.

Este salar, como área silvestre protegida, data de 1965 con la formación de la Reserva Forestal Lauca. En 1983 se dividió esta reserva y se cambió de categoría, formándose, de norte a sur, los actuales 'Parque Nacional Lauca', 'Reserva Nacional Las Vicuñas' y 'Monumento Natural Salar de Surire'. El fin de este nombramiento es resguardar su conservación.

Además, el Salar de Surire corresponde a un sitio Ramsar, el cual es una convención sobre los humedales de importancia internacional, cuyo fin es conservar y usar racionalmente los humedales y sus recursos. La convención entró en vigor en Chile en 1981.

## OBJETIVOS

### OBJETIVOS GENERALES

- Analizar la composición química de las aguas para evaluar su calidad para suministro humano y riego.
- Realizar un esquema de circulación de las aguas subterráneas que explique los procesos fisicoquímicos de la cuenca del Salar de Surire.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Determinar los procesos fisicoquímicos en las diferentes aguas muestreadas y esclarecer los principales procesos asociados a la formación del salar y el eventual origen de los componentes químicos.
- b) Analizar los procesos de interacción agua-roca para esbozar un esquema de circulación y evaluar las posibles litologías involucradas en estos procesos que permita aproximar el grado de permeabilidad de las unidades hidrogeológicas de la cuenca.

## HIPÓTESIS DE TRABAJO

Los recursos hídricos subterráneos que aportan al salar provienen principal o únicamente de agua meteórica, la cual interactúa con las litologías presentes en las laderas de los volcanes de la cuenca hidrográfica. En el sistema geotermal de la zona, el agua que ingresa es meteórica e interactúa con un reservorio geotermal.

En este escenario, es posible que existan vertientes en la cuenca del Salar de Surire de una calidad admisible para riego.

## METODOLOGÍA

a) Recopilación bibliográfica: corresponde a la recopilación de fundamentos teóricos del estudio, de los antecedentes de la zona (geología, geomorfología, hidrología, clima, etc.) y de las imágenes de trabajo: Del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) se obtuvo un modelo de elevación digital con una resolución de 30 metros el pixel, y de los satélites de Bing se obtuvo la imagen aérea georreferenciada.

b) Obtención de datos y cálculo del balance iónico:

Para validar los análisis químicos de las muestras obtenidas para el estudio, se verifica que sus componentes se encuentren en equilibrio. Es decir, que la suma de las cargas de sus componentes mayoritarios positivos igualen a la suma de las cargas de sus componentes mayoritarios negativos. Esto se expresa de la siguiente forma:

$$Error (\%) = 200 * \frac{\sum cationes - \sum aniones}{\sum cationes + \sum aniones}$$

Mediante esta fórmula se obtiene el error asociado a la muestra, es decir, su desviación del equilibrio electroquímico. Para este estudio, se considera un error aceptable menor al 5%. Las muestras que se usaron y se eliminaron se indican en la Tabla 3.

c) Determinar el tipo hidrogeoquímico mediante los diagramas de Piper, Stiff y analizar las relaciones iónicas mediante gráficos binarios.

d) Evaluar el origen y/o procesos de las aguas a través del análisis isotópico de  $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$ .

e) Cálculos de parámetros termodinámicos e índices de saturación con PHREEQC e implementación de simulaciones geoquímicas de las aguas.

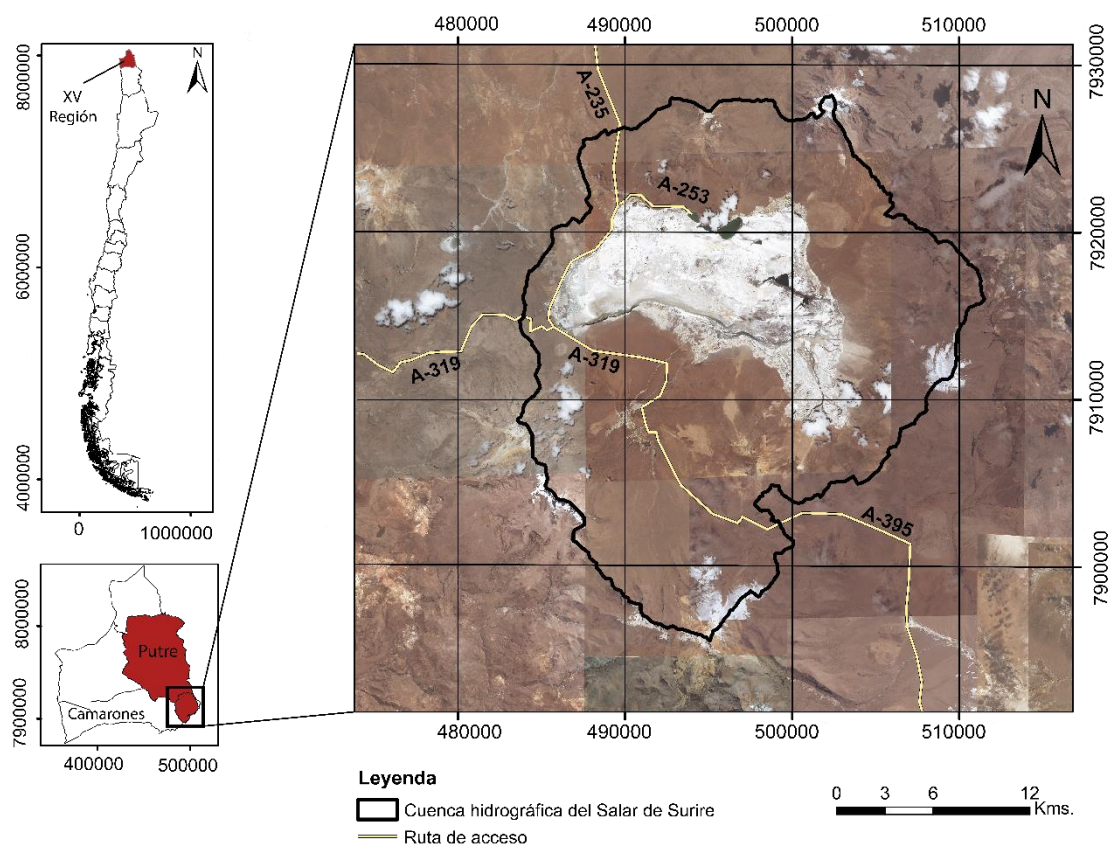
f) Esbozar perfiles estructurales del salar y levantamiento de un esquema de circulación de las aguas asociado a la litología del terreno usando la información geológica disponible.

- g) Determinar la ubicación de sectores de calidad de agua de interés para consumo, riego y actividad recreativa de contacto directo, comparando con normativas vigentes.

## UBICACIÓN

La cuenca hidrográfica del Salar de Surire se ubica en la XV Región de Chile de Arica y Parinacota, en la comuna de Putre. Limita al este con Bolivia, al sur con la I región de Chile de Tarapacá, al oeste con la comuna de Camarones, y al norte con una subcuenca hidrográfica de la misma comuna de Putre (Figura 1).

Para llegar desde Arica se debe tomar la Ruta 5, que conecta las principales ciudades del norte de Chile, y se desvía por la ruta local A-31. Luego se desvía por la ruta A-319 (Figura 1), donde se conecta con el resto de los caminos al salar.



**FIGURA 1: EL SALAR DE SURIRE SE ENCUENTRA EN LA XV REGIÓN DE CHILE DE ARICA Y PARINACOTA, EN EL SUR DE LA COMUNA DE PUTRE. LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE SE ENCIERRA EN NEGRO.**

## ESTUDIOS ANTERIORES

Salas (1975): En este trabajo se realiza un estudio de la geología de la cuenca hidrográfica del Salar de Surire y del salar mismo. Pedido por el Instituto de Investigaciones Geológicas (IIG), su objetivo era conocer antecedentes y detalles de yacimientos minerales. Se realizan sondajes y análisis químicos a las aguas. Consideraciones relevantes de este estudio es la sugerencia del basamento que rellena el salar, la profundidad de este relleno y la litología que tendría. Además, confeccionó los únicos perfiles del salar que se documentaron en este estudio a la fecha.

Cusicanqui (1979): Este estudio, pedido por el Comité de Energía Geotérmica, posee como finalidad explorar el potencial geotérmico del salar. Se realizó un estudio geoquímico en base a análisis químicos de aguas hidrotermales. Corresponde al conocimiento básico documentado correspondiente a la naturaleza de las aguas surgentes del sistema.

Risacher (1999): La DGA, Universidad católica del Norte y el 'Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación' firmaron para la realización de un estudio geoquímico de cuencas cerradas de las 4 primeras regiones del norte de Chile, con fines aplicados y científicos. Su objetivo era evaluar la calidad de las aguas, la realización de balances hídricos, evaluar la hidroquímica de las lagunas saladas, el origen de sus sales y los factores que los determinan. El Salar de Surire se estudia en detalle, y se realizan modelamientos de evaporación a partir de análisis químicos para verificar el origen de las sales.

Chong (2000): En esta publicación, se recopila información sobre los yacimientos de boratos en Chile describiendo su marco geológico, geográfico, detallando sus aspectos químicos y mineralógicos, y discutiendo sus alternativas económicas. Se describen el salar de Surire y el de Ascotán, al ser considerados los depósitos principales del rubro en Chile.

García (2004) realizó la Hoja Arica para el Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile, que consiste en un mapa geológico 1:250.000 y un texto explicativo que describe las unidades litoestratigráficas, la geología estructural y económica, además de análisis químicos. Posee información de las unidades litológicas y

comportamiento estructural de la zona de la cuenca hidrográfica del Salar de Surire.

Aguilera (2008): Esta tesis de doctorado en Geología evalúa el origen de los fluidos en los sistemas volcánicos, geotermales y termales de baja entalpía de la Zona volcánica Central (ZVC). Describe y analiza el área geotermal Polloquere, ubicada en el sector SE del Salar de Surire. Son realizados análisis químicos de las aguas y gases y son analizados y comparados con otros sistemas similares de la ZVC.

Tassi (2010) realizó algo similar a Aguilera (2008); analizó y comparó 6 sistemas hidrotermales del norte de Chile por medio de análisis químicos de agua y gases. Este estudio junto con el de Aguilera son las únicas fuentes recopiladas de análisis de gases de Polloquere. Es un aporte y una confirmación a la información que se posee sobre el origen y los procesos de las surgencias hidrotermales que ocurren en el costado SE del Salar de Surire.

Lagos (2016) busca establecer herramientas geoquímicas para distinguir la influencia de lagos salinos en agua geotermal. Para esto, estudia el Salar de Surire y la Laguna Tuyajto. Toma 10 muestras de la cuenca hidrográfica del salar y otras 13 de su zona geotermal asociada.

# MARCO TEÓRICO

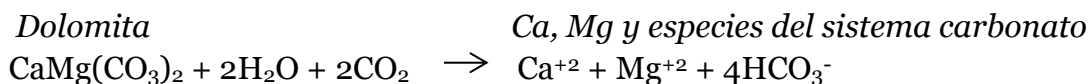
## DESCRIPCIÓN TÉCNICA

Esta sección describe herramientas utilizadas para el análisis de los datos. Primero se describen los diagramas utilizados, luego se explica la teoría del análisis isotópico, y finalmente se especifica el software Phreeqc.

### 1. Diagramas utilizados

Una vez obtenidos los datos hidroquímicos, existen métodos de clasificación de las aguas, de comparación entre ellas y métodos analíticos para dilucidar la evolución u origen de las aguas. Entre ellos se encuentran el diagrama de Piper, de Stiff, y diagramas binarios. Estos últimos se pueden graficar en concentración molar para evaluar procesos de disolución de minerales. A continuación se explicarán en mayor detalle.

Los diagramas binarios son utilizados para visualizar la evolución de un elemento o dilucidar un proceso que pueda simplificarse a dos variables cuantitativas. Así, en el primer caso, se comparan los elementos con un elemento conservativo, de tal manera que puedan indicar factores de concentración y así monitorear incrementos en concentración (Eugster, y otros, 1979). Usualmente, en ese caso, las concentraciones se expresan en [meq/l]. En el segundo caso, los procesos que se evalúan son de dilución/precipitación. En particular, se evalúa si el origen de ciertos elementos o compuestos se puede explicar principalmente sólo por dilución/precipitación de ciertos minerales. Un ejemplo de éste es la dolomita:



En esta ecuación, 1 mol de dolomita se relaciona con 1 mol de  $\text{Ca}^{+2}$  y 1 de  $\text{Mg}^{+2}$ . Así, si existe una relación 1:2 entre un gráfico molar  $[\text{Ca}+\text{Mg}]$  vs  $[\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}]$ , probablemente la principal fuente de los elementos disueltos Ca, Mg y especies de carbonato sea disolución de dolomita. Lo mismo se extrapola al yeso y a sulfatos de Mg; dado que su fórmula química contiene 1 mol del elemento por cada mol de  $\text{SO}_4$ , debe existir una relación 1:1 entre  $[\text{Ca}]$  vs  $[\text{SO}_4]$  o  $[\text{Mg}]$  vs  $[\text{SO}_4]$  para concluir la relevancia de su relación con esos minerales. Las concentraciones deben ser en [mmol/l] para que se puedan hacer las relaciones molares correspondientes.



## 2. Análisis de isótopos

Un átomo puede poseer distinta cantidad de neutrones a partir de una misma cantidad de protones. Un elemento es el que posee la misma cantidad de protones, y sus especies con distintas cantidades de neutrones son su familia isotópica. Gran parte de la tabla periódica se encuentra compuesta por éstas; de hecho, sólo se conocen 21 elementos monoisotópicos. Debido a sus diferentes masas atómicas, los isótopos de un elemento poseen ligeras diferencias en sus propiedades físicas y químicas, las cuales se utilizan para separarlos y cuantificarlos. Este estudio se enfocará en los isótopos que hacen la molécula del agua, hidrógeno y oxígeno. En la Tabla 1 se observa el porcentaje de abundancia de cada uno en la naturaleza.

TABLA 1: ABUNDANCIA DE LOS ISÓTOPOS DE LOS ELEMENTOS DEL AGUA EN LA NATURALEZA.

<i>Isótopos de H y O</i>	<i>Abundancia</i>
<sup>1</sup> H Hidrógeno	99,98%
<sup>2</sup> H Deuterio	0,016%
<sup>3</sup> H Tritio	5*10 <sup>-6</sup> %
<sup>16</sup> O	99,76%
<sup>17</sup> O	0,04%
<sup>18</sup> O	0,2%

Los isótopos de H y O que se utilizan son estables: poseen una vida media superior a los 3000 Ma. El objetivo es establecer la variación entre el isótopo menos abundante del abundante, y, a través de esto, evidenciar procesos involucrados en su fraccionamiento. Para esto, se divide el isótopo minoritario con el mayoritario, razón que se denomina R: <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O y <sup>1</sup>H/<sup>2</sup>H.

A su vez, esta razón R se expresa en relación a un R' de referencia conocido. En el caso del agua, se hace según el estándar internacional SMOW<sub>v</sub> (Vienna Standard Mean Ocean Water), que es el promedio de la razón en el océano. Así, para el oxígeno, la expresión queda:

$$\delta O\text{‰} = \left( \frac{\frac{18O}{16O} \text{ muestra}}{\frac{18O}{16O} \text{ estandar}} - 1 \right) * 1000$$

y para el hidrógeno:

$$\delta H\text{‰} = \left( \frac{\frac{2H}{1H} \text{ muestra}}{\frac{2H}{1H} \text{ estandar}} - 1 \right) * 1000$$

Estos isótopos estables se utilizan para informar sobre el origen del agua y determinar los procesos acaecidos durante su historia. Las moléculas más usuales del agua según sus isótopos son  $\text{H}_2^{16}\text{O}$ ,  $\text{HD}^{16}\text{O}$  y  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ . Estas poseen pequeñas diferencias en su movilidad iónica, tensión de vapor y difusividad, que hacen que el agua natural tenga ligeras diferencias de composición isotópica según su origen en el ciclo hidrológico.

### 3. PHREEQC

PHREEQC es un programa de modelación geoquímica que evalúa parámetros del agua y su interacción agua/roca/sedimentos. En este estudio, este programa se utiliza para tres fines: obtener el índice de saturación de minerales en cada muestra, evaluar su interacción con la roca, y modelar evaporación. Se utilizaron los parámetros de modelación LLNL.

El índice de saturación se define en la sección 'Definiciones y procesos relevantes'. Este valor se calcula en PHREEQC para cada muestra a partir de sus datos fisicoquímicos temperatura, pH y especies químicas mayores ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ). Para las muestras en las que se poseían datos, se agregó también la concentración de silicio y aluminio.

Se modeló la interacción del agua con roca y evaporitas a partir de la definición de un conjunto de fases minerales puras (minerales con composición fija) y los índices de saturación del fluido final. Las fases minerales, al ponerse en contacto con la fase acuosa, reaccionan de forma reversible, disolviendo o precipitando, o disolviéndose completamente, dependiendo del índice de saturación del mineral especificado previamente. A modo de ejemplo: se desea modelar la solución acuosa A a partir de la solución acuosa B y su interacción con el mineral halita ( $\text{NaCl}$ ). Se sabe que el índice de saturación de la halita en A es X. Entonces, se ingresa la composición química y parámetros fisicoquímicos de B, se hace reaccionar con la fase mineral halita bajo el índice de saturación X, y se obtiene una solución de una composición química resultante C. Finalmente, se evalúa si las soluciones A y C coinciden. Si al modelo no se le ingresa un índice de saturación, hará interactuar al fluido con el mineral hasta obtener el valor que las condiciones fisicoquímicas del fluido permitan.

La evaporación se modeló especificando al agua como un reactante irreversible con un coeficiente de reacción negativo. La solución inicial en este estudio corresponde a la solución final del modelo de interacción agua/roca descrito previamente. Ésta se escala para que posea 1 kg de fluido, que es equivalente a 55,5 moles. Luego, la solución se concentra la cantidad de veces deseada, y se obtiene la molalidad de cada especie (mmol/L). Si se desea, se pueden multiplicar los moles

de cada especie de la solución, tal que vuelva a poseer 1 kg, manteniéndose constante la molalidad de la muestra.

## PROCESOS HIDROGEOLÓGICOS EN AMBIENTES DESÉRTICOS

### SALINIDAD EN SUELOS DESÉRTICOS

La salinidad en un medio desértico, en general, es un fenómeno derivado de una acumulación a largo plazo de sales en el suelo y a la falta de su adecuada descarga en la zona no saturada. Esta acumulación se atribuye a la evaporación superficial, a ciclos con y sin presencia de agua, a la capilaridad del suelo, y, de existir rocas fracturadas, al transporte capilar de agua y sales desde la matriz de roca hasta la superficie de fractura (Vengosh, 2013).

Las sales que se acumulan en el suelo, de ser lavadas, pueden alcanzar la zona vadosa o de aireación (entre el suelo y el nivel freático). Dos factores que controlan el lavado son la solubilidad mineral y las propiedades físicas del suelo.

La diferencia de solubilidad entre los minerales causa la separación química a lo largo de la zona vadosa; cuanto más alta es la solubilidad del mineral, más largo es el recorrido de sus sales disueltas. Igualmente, tras un periodo de total desecación, ocurrirá disolución selectiva de minerales más solubles. Esto da como resultado una distribución desigual de iones a lo largo de la zona insaturada:  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ , y  $\text{HCO}_3^-$  tienden a acumularse someramente,  $\text{SO}_4^{-2}$  acumula a profundidades intermedias, y  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  son altamente movilizados.

La permeabilidad del suelo puede obstruirse por la arcilla y la precipitación de minerales, provocando un flujo lateral.

### CASO DE CUENCAS ENDORREICAS

En una cuenca hidrológicamente cerrada, una vez el agua ha interactuado con las sales del suelo desértico, y si existe una hidrología capaz de mantener volúmenes sustanciales de salmuera en superficie, ocurren mecanismos de precipitación de minerales, la dilución selectiva, el intercambio iónico y la desgasificación.

En la mayoría de los sistemas el cloruro se comporta como un elemento conservativo y puede ser usado para monitorear el progreso de la concentración evaporativa. En cambio,  $\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}$  se eliminan de la solución principalmente por precipitación mineral, que implica comúnmente minerales de carbonato. Las especies carbonatadas tienden a agotarse a través de la precipitación mineral, desgasificación y disolución selectiva. El  $\text{K}^+$  es eliminado por sorción e intercambio

iónico. Una vez en las salmueras, el  $K^+$  se conserva generalmente en la solución. En las salmueras más concentradas, el sulfato se acumula a menudo hasta que se alcanza la saturación con respecto a los minerales de sulfato sódico (Eugster, y otros, 1979).

## MARCO GEOGRÁFICO, GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

### GEOMORFOLOGÍA

En la región de Arica y Parinacota, a los 19°S, se pueden distinguir, de O a E, 4 principales unidades morfoestructurales (Figura 2): la cordillera de la costa (CC), que posee un relieve suave de hasta 1200 m.s.n.m.; la depresión central (DC), cuenca endorreica de hasta 1000 m.s.n.m.; la Precordillera (1500–3600 m.s.n.m.), superficie de manto oeste de 1500 a 3600 m s.n.m.; y el altiplano, con la cordillera occidental a su oeste (CO), con una variación de altura de 3800 a 4700 m s.n.m. (Muñoz et al., 1996).

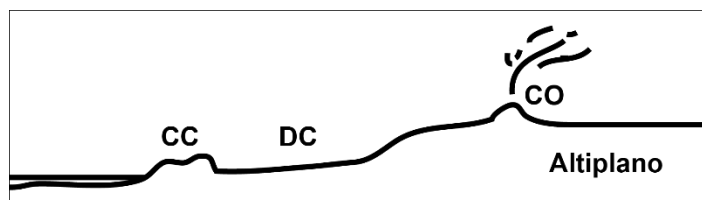


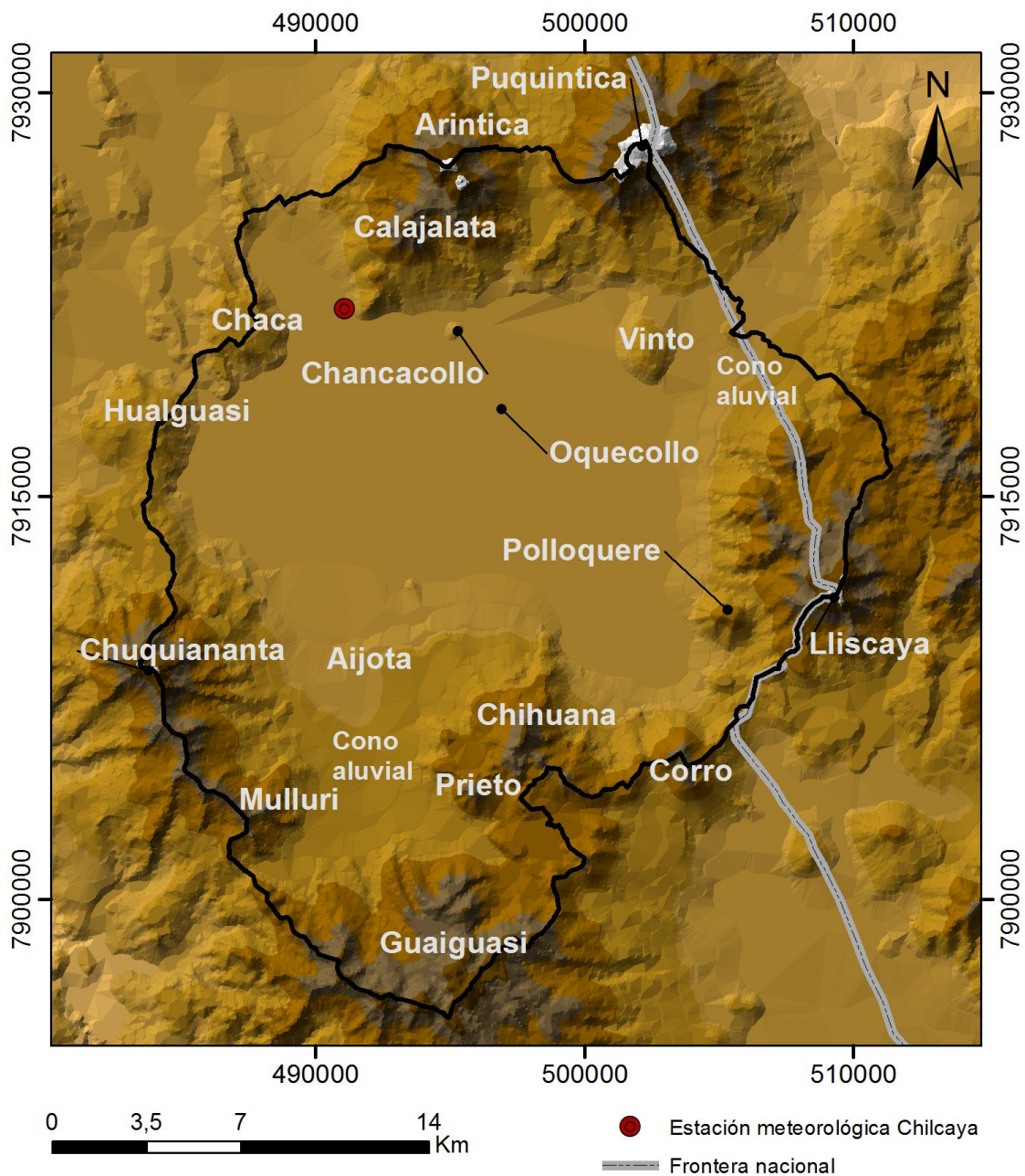
FIGURA 2: UNIDADES MORFOESTRUCTURALES EN LA LATITUD 19°S EN CHILE. MODIFICADO DE MUÑOZ (1996).

La cuenca hidrográfica del Salar de Surire forma parte de la clasificación de 'cuencas altiplánicas' de Chile realizada por el Banco Nacional de Aguas (BNA). De norte a sur, éstas son: (1) cuenca entre el límite Perú-Bolivia y Río Lauca; (2) Lago Chungará; (3) Río Lauca; (4) Salar de Surire; (5) cuenca entre el Estero de Sencata y Río Sacaya; (6) Salar del Huasco; (7) Cuenca entre los salares del Huasco y Coposa; (8) Salar de Coposa, y (9) Salar de Michincha.

Por otro lado, la cuenca hidrológica del Salar de Surire posee un relieve abrupto marcado principalmente por estructuras volcánicas recientes (mioceno-pleistoceno) y material no consolidado de origen aluvial, fluvial y glacial, y en la base de su cuenca hidrográfica se encuentra la planicie del salar de Surire, de una altura media de 4.300 m.s.n.m.

Desde el norte y hacia el E, se encuentran las siguientes estructuras (Figura 3): Volcán Arintica, de 5597 m.s.n.m. y presencia de nieves; el Calajalata, de 4777 m.s.n.m. ubicada en las faldas del primer volcán; el pequeño cerro Chancacollo, de 4350 m.s.n.m., en contacto directo con la laguna del salar hacia el N; el volcán Puquintica, de 5730 m.s.n.m.; el cerro Vinto, de 4546 m.s.n.m.; el volcán Lliscaya, de 5550 m.s.n.m., el cual se encuentra dividido entre la frontera Chile-Bolivia; la estructura Corro; el volcán Polloquere, de 4853 m.s.n.m.; el cerro Chihuana, de 5300 m.s.n.m; la estructura Prieto, de 5080 m.s.n.m.; el volcán Guaiguasi, que en una pequeña fracción forma parte de la cuenca; la pequeña estructura Aijota, el

cual es rodeado por el río Surire; el cerro Mulluri, de 4252 m.s.n.m. y el volcán Chuquiananta, de 5559 m.s.n.m. Oquecollo estaría en el centro del salar.



**FIGURA 3: PRINCIPALES ESTRUCTURAS DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL SALAR DE SURIRE. LA MÁXIMA ELEVACIÓN, DE COLOR BLANCO GRISÁCEO, CORRESPONDE A UNA ALTURA SOBRE LOS 5480 M.S.N.M. CADA FRANJA DE COLOR INDICA UNA ALTURA DE 266 MTS. EL NIVEL BASE DEL SALAR SE ENCUENTRA EN LA COTA 4300 M.S.N.M. IMAGEN TRABAJADA EN ARCGIS A PARTIR DE DEM.**

## HIDROLOGÍA

### ASPECTOS GENERALES DEL CLIMA

Las condiciones climáticas del Altiplano se caracterizan por bajas temperaturas, valores reducidos de presión, vapor de agua y oxígeno atmosférico, una mayor radiación solar global a nivel de superficie, y una menor concentración de gases de efecto invernadero (Aceituno, 1997). A continuación se explicarán con mayor detalle algunos de estos aspectos.

#### Procesos asociados a la radiación solar:

La radiación solar diaria en diciembre es 1.7 veces mayor que el valor homólogo en Junio, valor moderado debido a la mayor cercanía con el Ecuador. La nubosidad relativamente más abundante durante el verano austral, determina que la radiación global mensual a nivel de superficie alcance el máximo anual en noviembre. Mediciones del índice de reflexión de la radiación solar global sobre suelo seco y un bofedal indicaron valores de 18 y 23% respectivamente (Aceituno, 1997).

#### Temperatura:

La temperatura en la atmósfera libre disminuye con la altura a una tasa cercana a 6.5 °C/km. En la pendiente andina el gradiente es menor, como resultado de la transferencia de energía desde superficie. Durante el día, dependiendo de la estación del año, la temperatura varía desde 10°C (verano) a 25°C (invierno) (Aceituno, 1997).

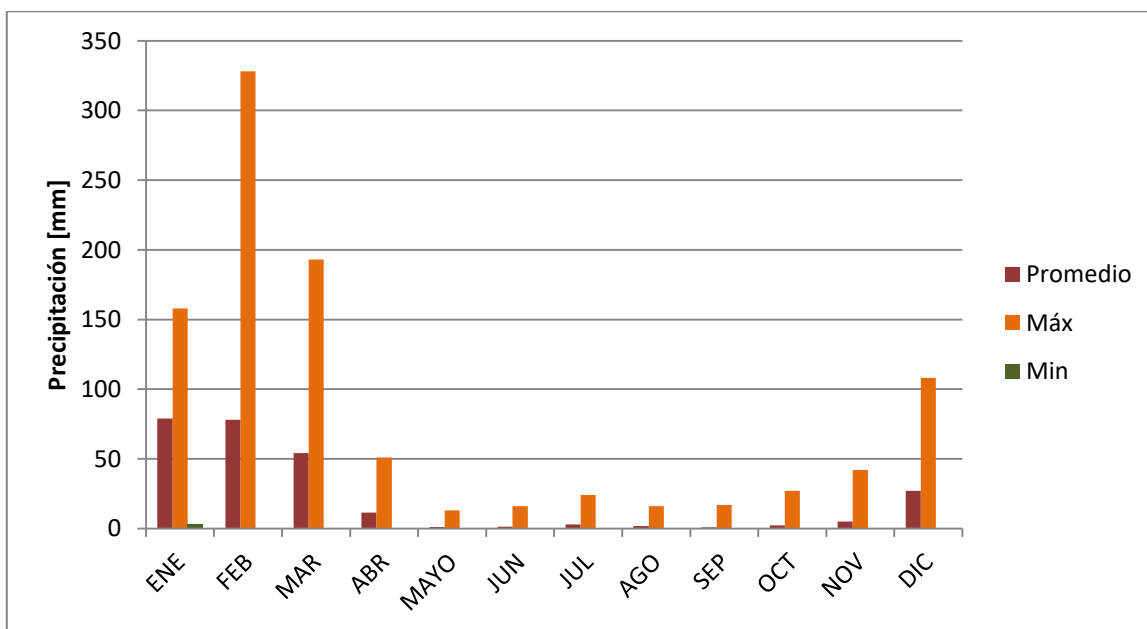
El salar de Surire posee una temperatura media de 2,9°C (Lagos, 2016).

### PRECIPITACIONES

Las masas de aire que llegan a la región altiplánica tienen en general un contenido relativamente bajo de humedad, debido a su origen en niveles elevados. Sin embargo, entre los meses de diciembre y marzo suelen ocurrir precipitaciones. En este periodo, denominado invierno altiplánico, los niveles de humedad absoluta y relativa aumentan como resultado de la advección de masas de aire desde la cuenca amazónica. En el resto del año, en general las masas de aire provienen del oeste, donde la humedad es considerablemente menor.

En el Salar de Surire, la DGA posee una estación meteorológica llamada Chilcaya vigente instalada en 1971 (Figura 3). Su registro pluviométrico entre los

años 1980 y 2016 se observa en la Figura 4. De este periodo no se poseen datos desde los años 1987 a 1998. De la figura se puede observar que los meses de diciembre, enero, febrero y marzo son los de mayores precipitaciones, con promedios que fluctúan entre 27 a 78mm. Por otro lado, en los meses de menor precipitación, de mayo a octubre, los promedios fluctúan entre 0,9 y 2,2mm. La mínima de todos los meses es 0 con excepción del mes de enero, que presenta un valor de 3,2mm.



**FIGURA 4: DIAGRAMA CON LOS VALORES PROMEDIOS DE PRECIPITACIÓN MENSUAL DESDE EL AÑO 1980 AL AÑO 2016 (ROJO), MÁXIMO DE PRECIPITACIÓN MENSUAL (NARANJO) Y MÍNIMO DE PRECIPITACIÓN MENSUAL (VERDE). ESTE ÚLTIMO VALOR ES CERO EN TODOS LOS MESES EXCEPTO ENERO, EL CUAL POSEE UN VALOR DE 3,2 [MM]. DATOS OBTENIDOS DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE CHILCAYA DE LA DGA.**

#### ESCORRENTÍA SUPERFICIAL

Los escurrimientos superficiales de la cuenca drenan al salar a través de dos fuentes principales: de la zona geotérmica, al sureste, y de las numerosas pequeñas quebradas a lo largo del perímetro del salar. Estas últimas han dado origen a dos morfologías: el cono aluvial del Río Surire, al sur, y el cono aluvial ubicado al E, entre el cerro Vinto y Lliscaya. En la Figura 8 se observa la red de drenaje modelada. Esta red de drenaje se obtuvo en Arcgis 10.3, a partir de un modelo de elevación digital (DEM) y el uso de las siguientes herramientas y comandos: (1) ‘Relleno’, que rellena sumideros del DEM para quitar pequeñas imperfecciones en los datos; (2) ‘Dirección de flujo’, que conecta cada celda con la pendiente descendente más empinada según un modelo 8D; (3) ‘Acumulación de flujo’, donde



se acumula el flujo para cada celda; (4) Calculadora raster, desde donde se define desde qué altura se desea la red de drenaje, y (5) Clasificación de la red de drenaje, que define el orden del drenaje.

En el trabajo de CONAF (2000) se definieron 7 vertientes principales, además del Río Surire. Estas son: la vertiente desde el área de manifestaciones termales, que Salas (1975) estima un caudal de 500 l/s, y las vertientes que ingresan radialmente al salar desde distintas quebradas de la olla hidrográfica, que aportan al menos 35 l/s al salar en total.

### *Río Surire*

El Río Surire es el curso superficial principal del Salar aparte de la zona geotermal. Se origina en la zona sur-poniente de la cuenca a partir de las vertientes de los cerros Mulluri, Prieto y Guaiguasi. Su caudal puede variar en órdenes de magnitud entre la época estival y la época de menor precipitación durante el año: de 500- 600 l/s a 30 l/s. Con alto caudal, su curso se extiende hacia los ríos y lagunas interiores del salar.

## CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

La cordillera de los Andes se divide principalmente en 3 segmentos: norte, central y sur. Los Andes Centrales, ubicado entre los 15° y 27°S, se caracteriza por poseer una subducción activa de 30° con vergencia al E que en promedio subduce 84 mm/año (DeMets, y otros, 1994). Hacia el N y hacia el S el régimen de subducción cambia al tipo flat-slab. El arco volcánico actual es la cordillera occidental CO (Figura 2).

El altiplano-Puna es una planicie de 3.7-4.2 km de altura entre los 15 y los 27°S, de 1500 km de longitud y 500 km de ancho en su zona más extensa.

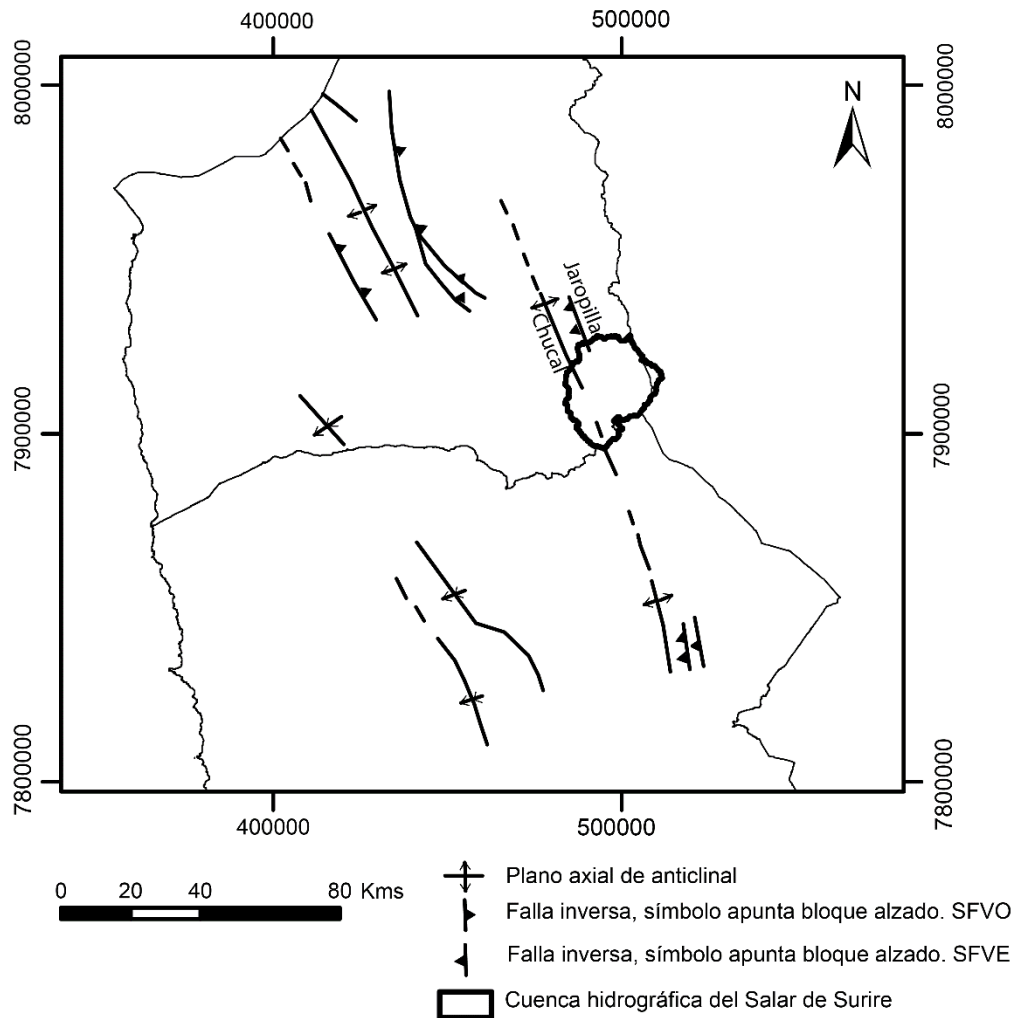
En general, en orden temporal, se pueden definir en la zona occidental del altiplano un basamento precámbrico alzado, secuencias sedimentarias mesozoicas y unidades sedimentarias y volcánicas cenozoicas tempranas e intermedias. Estas últimas se encuentran falladas por un sistema de fallas y plegamientos de alto ángulo con vergencia oeste (WTS, West vergent Thrust System, o SFVO, Sistema de Fallas de Vergencia Oeste) del oligoceno (Muñoz, y otros, 1996).

En cambio, la zona oriental del altiplano se encuentra formado por las Sierras Subandinas, que corresponden a una parte de la faja plegada y corrida de antepaís de los andes del norte Argentino entre los paralelos 19° y 23°S, con las principales fallas saliendo del despegue basal con vergencia hacia el este (Kley, y otros, 1999).

La existencia del WTS, junto con el sistema de las Sierras Subandinas, indican que el altiplano es, esencialmente, una estructura compresiva asimétrica formada por dos sistemas de empuje de vergencias opuestas (Muñoz, y otros, 1996).

Este alzamiento del altiplano se habría producido entre los 15 y 4.8 Ma, con sus inicios en el Oligoceno.

Localmente existe un sistema de fallas de vergencia opuesta (ETS, East vergent Thrust System, o SFVE, Sistema de Fallas de Vergencia Este) que surge en la depresión central y emerge en la cordillera occidental (Farías, y otros, 2005) (Figura 5).



**FIGURA 5: SFVE Y SFVO A NIVEL REGIONAL, ENTRE LAS REGIONES XV Y I. SE PRESENTA LA FALLA INVERSA DE JAROPILLA Y EL ANTICLINAL DE CHUCAL EN EL BORDE NOROESTE DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DE ESTUDIO. MODIFICADO DE FARIAS (2005).**

El desarrollo de estructuras de vergencias E y O es asociado con complejos procesos de erosión y depositación, que generó grandes cantidades de sedimentos sintectónicos, volcanoclásticos y volcánicos a lo largo de la CO, Precordillera y la depresión central.

La zona de estudio se ubica en una cuenca endorreica de la cordillera occidental (CO). Dada la disposición de los conos volcánicos en la cuenca, Chong (2000) sugiere que se encuentra ubicada en el interior de una caldera.

## GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

La geología distrital se evalúa en toda la cuenca hidrográfica del Salar de Surire (Figura 6). Ésta posee una superficie de 562 km<sup>2</sup>, y la parte más baja de ella constituye el salar mismo, con una superficie de aprox. 120 km<sup>2</sup>.

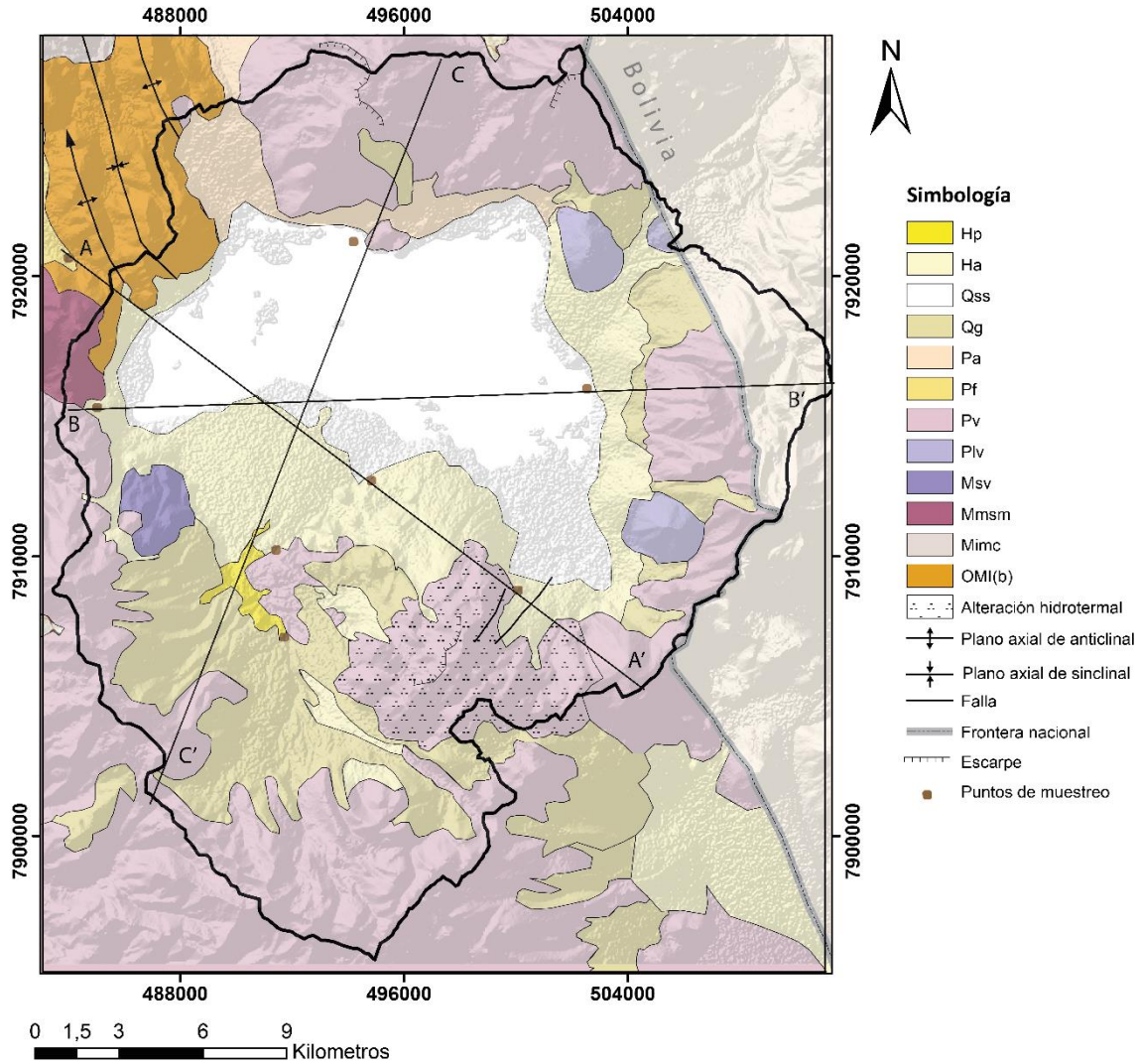


FIGURA 6: MAPA GEOLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO. MODIFICADO DE GARCÍA (2004). POSEE LA LÍNEA DE 3 PERFILES A-A', B-B' Y C-C'.

## UNIDADES LITOLÓGICAS

Se nombrarán las características de cada unidad relevantes para este estudio: espesor y relaciones de contacto, litología, presencia de fracturas y grados de consolidación. Si no se indica lo contrario, la clasificación y descripción de las unidades corresponde a García (2004).

### **Formación Lupica** Oligoceno superior- Mioceno inferior

Distribución en la zona de estudio: La Formación OMI(b) se encuentra en el lado NO de la cuenca, formando el volcán Chaca y el cerro Melaque. Las formaciones

OMI(a) y OMI(d) no afloran pero posiblemente subyacen la zona en ciertos sectores; en particular, (Salas, 1975) sugiere que OMI(a) es el basamento de la cuenca. Por esta razón se añadirá su descripción, dada su importancia en el caso de que aguas subterráneas interactúen con ellas. En orden, las subunidades de inferior a superior, se enlistan:

OMI(a):

Litología y espesor: Sucesiones formadas por 300 a 600 m de espesor de lavas andesíticas y dacíticas, tobas y brechas volcánicas y sedimentarias, con intercalaciones de areniscas, conglomerados y tobas riolíticas. Las coladas de lava son macizas, fluidales y predominantemente brechosas, con texturas que varían de porfídicas a afaníticas y vesiculares. Los minerales accesorios más comunes son apatita, circón y titanita. Las areniscas y conglomerados son matriz soportados, pobremente seleccionados y formados por clastos subangulosos de origen volcánico. No se observa base expuesta.

OMI(b):

Litología y espesor: Toba potente con una intercalación de vitrófiro en su parte central. Los cristales son de cuarzo (5-25%), sanidina (5-25%), plagioclasa (3-10%), biotita (1-3%), anfíbola (1-3%) y magnetita (1-2%). Las muestras de tobas analizadas químicamente son de composición riolítica, con 73 a 78% de SiO<sub>2</sub>, y de alto potasio, con 4,8 a 5,4% de K<sub>2</sub>O. Posee hasta 500 mts. de espesor y se encuentra plegada. Subyace en discordancia angular a la formación Macusa (Mmsm). Se encuentra plegada.

OMI(d):

Litología y espesor: Sucesiones formadas por 400 a 600 mts. de espesor de areniscas, fangolitas y calizas, con intercalaciones de conglomerados, de grano fino, parabrechas sedimentarias, de grano fino a medio, cherts, rocas volcánicas y depósitos orgánicos.

**Formación Macusa (Mmsm) Mioceno medio-superior**

Distribución en la zona de estudio: Se ubica al O del salar, al norte del volcán Chuquiananta.

Litología y espesor: Constituida por hasta 500 mts. de espesor de tobas, en parte ignimbríticas, y areniscas, con intercalaciones de conglomerados, brechas sedimentarias, limolitas, arcillas, calizas y lavas. En general, la formación se encuentra plegada.

Relaciones de contacto: Sobreyace en discordancia angular suave a la formación Lupica (OMI) y subyace en discordancia angular al volcán Chuquiananta (Pv).

### **Volcán del Mioceno superior (Msv)**

Distribución en la zona de estudio: Se ubica al SW del Salar de Surire, en un afloramiento de menor escala rodeado de depósitos recientes.

Litología: Dacitas de hornblenda y biotita en masa fundamental microcristalina ligeramente oxidada. Lavas fuertemente erosionadas y sin rasgos primarios conservados.

### **Volcanes del Plioceno (Plv)**

Distribución en la zona de estudio: Corresponde a los remanentes de volcanes menores Polloquere y Vinto, ubicados ambos al E del salar.

Litología: Polloquere se encuentra constituido principalmente por flujos lávicos de composición dacítica (dacitas de hornblenda y biotita). El cerro Vinto corresponde a un domo dacítico, apenas alterado hidrotermalmente, con fenocristales de hornblenda y biotita, en una masa fundamental parcialmente desvitrificada con feldespatos argilizados.

### **Volcanes y centros eruptivos menores del Pleistoceno Pv(a), Pv(c)**

Distribución en la zona de estudio: Corresponde a los estratovolcanes Arintica, al N del salar, Chuquiananta, al SO del salar, Chiguana, al SE del salar, Guaiguasi, al S, y Lliscaya, ubicado al E del salar y dividido por la frontera con Bolivia; al pequeño centro de emisión Oquecollo, ubicado al centro del salar; y a la estructura Aijota, única catalogada como Pv(c), que corresponde a depósitos de avalancha de detritos volcánicos.

Litología: El Arintica corresponde a un estratovolcán formado principalmente por lavas y lavas-domo de composición andesítica a dacítica. Presenta un escarpe glacial abierto hacia el sur. El Chuquiananta es un estratovolcán formado principalmente por lavas, lavas-domo y domos de flanco de composición andesítica a riodacítica, aunque dentro de las lavas predominan las dacitas de hornblenda y biotita. El Chiguana es un estratovolcán formado por lavas y lavas-domo de composición andesítica a dacítica. Presenta un importante escarpe de colapso hacia el O, generando un depósito de avalancha de detritos. El estratovolcán Lliscaya sigue el patrón de los otros volcanes, siendo conformado por lavas y lavas-domo dacíticas. Finalmente, en el centro del salar se encuentra el pequeño centro de emisión Oquecollo. Este centro se encontraba en 1975 con una altura de 50 m. sobre el salar y de una litología andesítica, según observaciones de (Salas, 1975). Actualmente no se observa una litología o un relieve en su ubicación en el salar, sino un remanente oscuro en las sales.

### **Depósitos aluviales y fluviales del Pleistoceno Pa, Pf**

Distribución en la zona de estudio: Pa se encuentra al N del salar de Surire en la ladera del volcán Calajalata, y Pf se encuentra ubicado fuera de la cuenca hidrográfica, en el extremo O del mapa.

Litología: Los depósitos aluviales Pa corresponden a gravas y brechas matriz soportadas, semiconsolidadas, con intercalaciones de arenas, limos y arcillas, de clastos mal seleccionados principalmente volcánicos, de andesitas a riolitas. Su matriz es limosa y arcillosa y poseen mala selección. Pf corresponde a ripios y gravas clastosoportadas, semiconsolidadas, con intercalaciones de arenas y limos, de clastos volcánicos de composición andesítica a riolítica y matriz arenosa o limosa.

### **Depósitos glaciales (Qg) Pleistoceno Inferior- Superior y actual**

Distribución en la zona de estudio: Se exponen en los flancos de los edificios volcánicos Msv, Plv y Pv antes nombrados.

Litología y espesor: Los depósitos corresponden esencialmente a morrenas laterales y/o frontales, y a mantos estratificados, relativamente delgados, con espesores máximos de 100 m. Son depósitos de parabrechas de fragmentos predominantemente volcánicos, consolidados a semiconsolidados, muy mal seleccionados e inmersos en una matriz limosa a arenosa.

### **Depósitos aluviales y fluviales del Holoceno (Ha)**

Distribución en la zona de estudio: Ha se encuentra en la planicie de menor elevación de la cuenca hidrográfica, rodeando a los depósitos evaporíticos del salar.

Litología y espesor: Los depósitos aluviales del Holoceno (Ha) corresponden a gravas y brechas matriz soportadas, con intercalaciones de arenas, limos y arcillas. Estos se asignan al Holoceno ya que están originados por procesos aun activos: flujos de barro y detritos, proximales a distales, probablemente debido a precipitaciones torrenciales.

### **Depósitos palustres (Hp) Holoceno**

Distribución en la zona de estudio: Se encuentra en un tramo del Río Surire, al sur del salar.

Litología: Corresponde, principalmente, a un depósito de limos y de turbas no consolidados a semiconsolidados donde crecen bofedales.

## **Depósitos del Salar de Surire (Qss) Cuaternario**

Distribución en la zona de estudio: Éstos se encuentran en el salar de Surire.

Litología: La base de la cuenca se encuentra rellena por sedimentos lacustres y fluviales, al igual que depósitos glaciares y de morrenas. La zona superior corresponde a mantos subhorizontales de sales, limos salinos y costras salinas, esencialmente de boratos y, subordinadamente, yeso, carbonatos, sulfatos y cloruros, todos ellos de magnesio, potasio, sodio y litio. El borato predominante es la ulexita.

Un perfil esquemático del relleno de la cuenca del salar de Surire fue descrito por Salas (1975):

1. La parte más profunda la constituyen sedimentos clásticos con un espesor de 30 metros, los cuales se pueden observar en cierto grado en el borde exterior E del salar.

2. La zona intermedia, de 30 metros de potencia, se compone de sedimentos finos de origen químico que se presentan en delgadas capas estratificadas. Los sedimentos inferiores de esta parte media, estarían compuestos por limolitas y arcillolitas.

3. La parte superior del relleno de la cuenca contiene principalmente un complejo salino con características evaporíticas. Este relleno, considerando las variaciones de pureza, puede subdividirse en 2 partes superiores:

- 3.1. La parte baja del relleno superior tiene de 50 a 60 metros de potencia. Se encuentran boratos, cloruros, sulfatos y en menor proporción carbonatos, mezclados con materiales orgánicos y/o con sulfuros de hierro, específicamente piritita diseminada.

- 3.2. La parte alta del relleno superior, de una potencia variable entre 50 cm y 7 u 8 metros, está constituida por las mismas sales que su parte inferior pero en un estado más puro. Para esta sección, (Chong, y otros, 2000) integró un perfil tipo a partir de secciones estudiadas en los salares Quisquiro y Ascotán, reconocible en la mayoría de las cuencas evaporíticas andinas:

- Superficie del salar, plana, con eflorescencias de cloruros y sulfatos, localmente boratos.

- 0,30-0,40 m de arcillas y diseminación de sulfatos, cloruros y boratos en menor proporción.

- 0,10-0,40 m. Nivel de ulexita, que puede alcanzar hasta 1 m de espesor.

- 0,30-0,40 m de arcillas similares a los horizontes superiores.



- 0,10-0,05 m de boratos como laminaciones intercaladas con arcillas.
- Más de 30 cm de limos arcillosos, algunos con abundante material orgánico, con emanaciones de H<sub>2</sub>S y diseminación de sulfuros.
- Nivel freático.

Todas las unidades descritas están saturadas de agua.

## ESTRUCTURAS

Regionalmente, como ya se dijo previamente, existe un importante sistema de fallas de alto ángulo de vergencia oeste entre la depresión central y el altiplano, denominado WTS (west-vergent thrust system) o SFVO (Sistema de Fallas de Vergencia Oeste). Este sistema fue esencial para la formación del lado W del altiplano (Muñoz, y otros, 1996).

A menor escala, existe un sistema de fallas de vergencia este en el altiplano (ETS, east-vergent thrust system, o SFVE, Sistema de Fallas de Vergencia Este) adyacente al Salar de Surire.

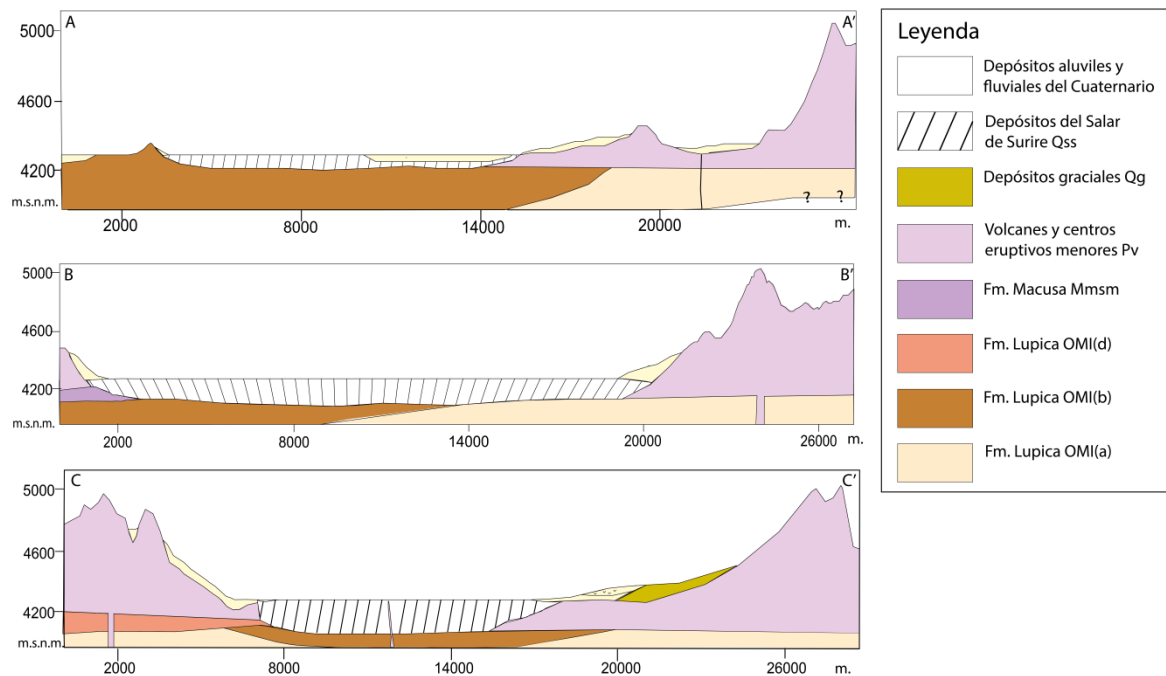
En este sistema se encuentra la falla inversa de Jaropilla, que se asocia con el pliegue por propagación de falla de Chucal, y que a su vez se encuentra cubierta/sellada por la Fm. Macusa (Charrier, y otros, 2005). Tanto la Fm. Macusa como la Fm. Chucal (que se asocia con el pliegue Chucal) y la Fm. Lupica se encuentran deformadas/plegadas por la actividad contraccional que ocurrió en la zona entre el Oligoceno y Plioceno (Figura 5). En particular, la actividad del sistema estructural de Chucal, fue continua o casi continua entre 21Ma y 2,7 Ma (Charrier, y otros, 2005). Es posible que los pliegues del sistema posean fracturas abiertas en el borde externo del anticlinal debido a la extensión que se genera en esa parte de la estructura. La presencia de estas fracturas son usuales en las fallas inversas del norte de Chile (González, y otros, 2008).

Localmente, se presenta un sistema de fracturas N-NE y manteo SE en el sector SE del salar (Figura 6), relacionadas con movimientos recientes de la cuenca, cuando ya había recibido la mayor parte de los sedimentos clásticos. Éstas dan origen a las numerosas vertientes calientes (Aguilera, 2008).

Una estimación del acortamiento mínimo mioceno para el sistema compresivo de Chucal-Macusa es de 6 km (García, y otros, 2004).

## PERFILES ESTRUCTURALES ESQUEMÁTICOS

A partir de Charrier et al. (2005) y García et al. (2004), se esbozaron 3 perfiles estructurales en donde se observan las principales unidades litológicas de la zona (Figura 7). La geología de la zona se caracteriza principalmente por depósitos del Salar de Surire, depósitos semiconsolidados a no consolidados recientes de litología volcánica, volcanes del Mioceno al Pleistoceno, y un basamento Oligoceno-Mioceno de litología principalmente volcánica. Los depósitos aluviales y coluviales abarcan los depósitos descritos Hp, Ha, Pa y Pf.



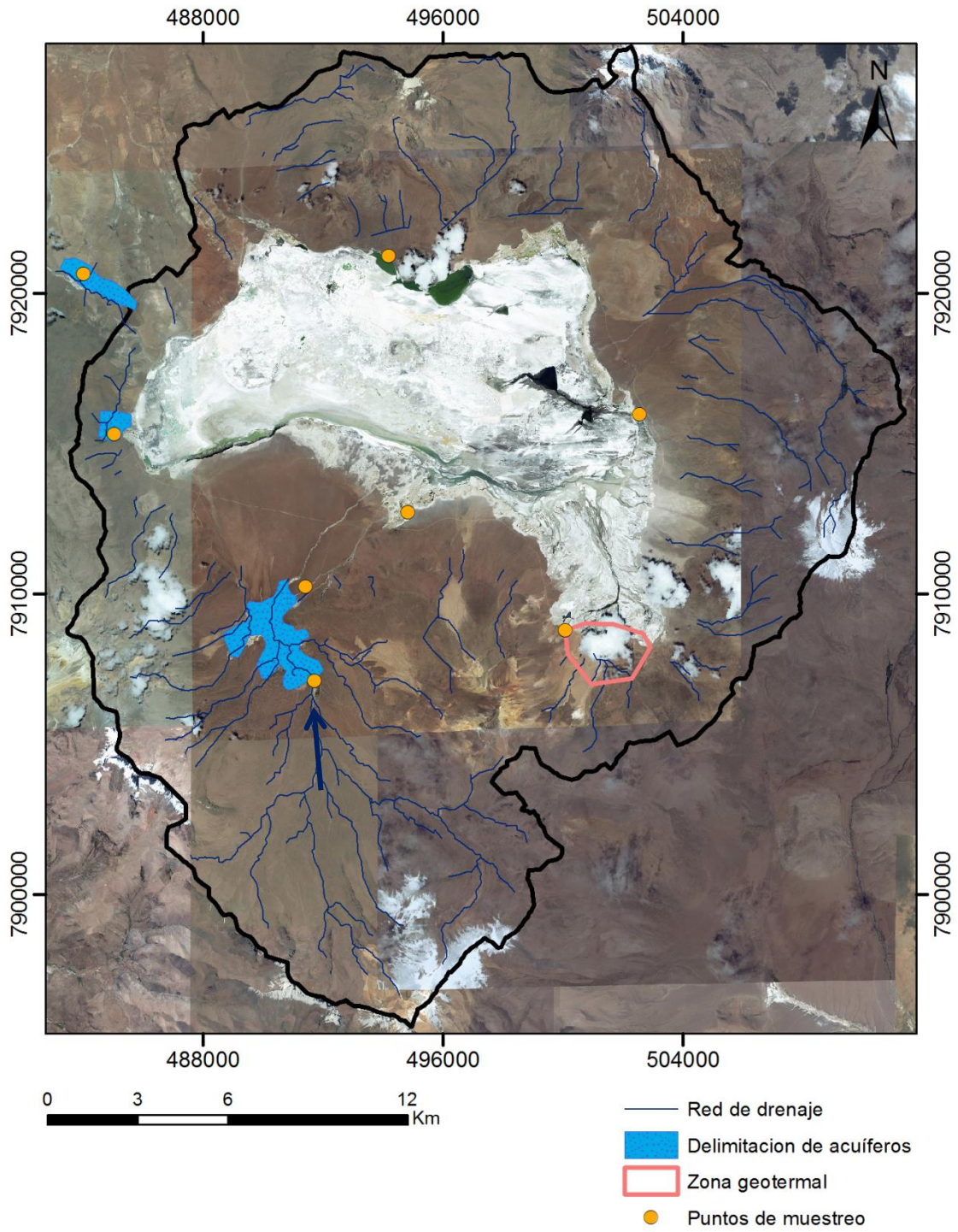
**FIGURA 7: PERFILES ESTRUCTURALES CON LAS PRINCIPALES UNIDADES LITOLÓGICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO. LAS LÍNEAS DE PERFIL DE ENCUENTRAN EN EL MAPA GEOLÓGICO DE LA ZONA (FIGURA 8).**

## HIDROGEOLOGÍA

El único estudio hidrogeológico hecho en la zona de estudio posee el sesgo de haber sido realizado en función de la presencia de vegas y bofedales, dado que estaba orientado a la preservación de estos. Según el estudio, la cuenca del Salar de Surire constaría de 3 acuíferos con bofedales asociados (Figura 8): el acuífero Surire, localizado a principios del delta del río Surire, al sur del salar, con una superficie de 4.873.831 m<sup>2</sup>; el Chulluncallani, al oeste del salar, con una superficie de 590.910 m<sup>2</sup>; y el Castilluma, con una superficie total de 1.018.665 m<sup>2</sup> (DGA, 1996). Este último no pertenece a la cuenca hidrográfica del salar, pero el estudio considera que posee un ligero aporte de aguas subterráneas de ella.

En cuanto al nivel de aguas subterráneas en el salar, Salas (1975) describió que en el sector oeste del salar, este nivel llegaba a superficie, y hacia el E disminuía en profundidad hasta los 9,5 mts en el extremo NE. Esta observación fue realizada el 1975, hace más de 40 años, por lo que debe ser considerada solo como referencia.

La definición de unidades hidrogeológicas es útil para caracterizar hidrogeológicamente una zona, y así evaluar posteriormente información como los parámetros hidráulicos y los tipos de acuífero. En esta sección, esta definición se hace a partir de la geología descrita por García (2004), que realizó un mapa geológico 1:100.000 de la Región de Arica y Parinacota, y otros trabajos anteriores en la zona (Tabla 2). Para obtener estos datos de manera más certera se deben realizar sondajes, analizar la estratigrafía local y realizar pruebas de bombeo del que se extraigan los parámetros hidráulicos.



**FIGURA 8: ESCORRENTÍA SUPERFICIAL, SUBTERRÁNEA Y ÁREA GEOTERMAL DEL SALAR DE SURIRE. LA FLECHA AZUL INDICA LA UBICACIÓN Y LA DIRECCIÓN DE FLUJO DEL RÍO SURIRE.**

**TABLA 2: DEFINICIÓN DE UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS Y APROXIMACIÓN CUALITATIVA DE LA PERMEABILIDAD A PARTIR DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE LAS UNIDADES.**

<b>Unidades hidrogeológicas</b>	<b>Permeabilidad</b>	<b>Comentario</b>
Depósitos aluviales y fluviales Pa, Ha	Primaria media/alta	Puede poseer porosidad primaria en espacios intergranulares por ser unidades semi consolidadas a no consolidadas
Depósitos glaciares Qg	Primaria media/baja	Posee alto contenido de arcilla debido a ser mal a muy mal seleccionado y a ser ese tamaño de grano característico de estos depósitos, rellenando poros, lo que baja la permeabilidad.
Estructuras volcánicas	Secundaria media	Estas formaciones, sin o con baja porosidad primaria, pueden presentar fracturas debido a la actividad contraccional del Neógeno en la zona. Sin embargo, existen unidades recientes (Pleistoceno) a la que la actividad contraccional le podría haber afectado en menor medida. Según FCIHS (2009), es posible encontrar en rocas volcánicas discontinuidades, como la orientación respecto a la dirección de la colada, el cuerpo piroclástico, y el rango. Hay ciertas estructuras que presentan alteración hidrotermal, pero no se sabe si poseen mineralogía secundaria que rellene los poros.
OMI(b)	Secundaria media/baja	Es posible que esta toba potente del Oligoceno superior presente fracturamiento debido a (1) la deformación en la zona ocurrida entre el Oligoceno y Plioceno, y a (2) las posibles fracturas que ocurren en el borde externo de un anticlinal asociado a falla inversa (González, y otros, 2008). Es posible que presente una zona de alteración en superficie por meteorización, lo cual entrega porosidad primaria, pero a su vez, usualmente estos poros se encuentran rellenos por minerales secundarios, dejando una permeabilidad baja o muy baja.
Fm. Macusa	Secundaria media/baja	Esta formación del Mioceno podría poseer permeabilidad secundaria por las mismas razones que la formación OMI(b). Los niveles sedimentarios podrían eventualmente constituir niveles relativamente más permeables.
Depósitos salinos Qss	Primaria o secundaria	En rocas evaporíticas se forman cavidades típicas de ambientes kárticos ante la presencia de un acuífero, debido a su alta solubilidad. Sin embargo, al ser este un sistema actual, no se sabe si el sistema ha evolucionado a formar este tipo de cavidades.

## MANIFESTACIONES TERMALES

Las áreas con manantiales termales, fumarolas, etc., son la manifestación externa de un sistema, y tal caso se presenta en la cuenca del Salar de Surire (Custodio et al., 2001).

La mayoría de las áreas termales de Chile se encuentran en la Cordillera de los Andes, asociadas a zonas de volcanismo cuaternario y generalmente controladas por sistemas de fallas actuales (Lahsen, 1988). Depósitos evaporíticos superficiales (salares), se encuentran localmente presentes en algunos casos, siendo el Salar de Surire uno característico.

En el Salar de Surire existen manifestaciones termales visibles en el sector SE denominado Polloquere (Figura 8). La mayoría de las manifestaciones ubicadas hacia el interior del salar o hacia el N se han secado y/o están descargando por debajo de la costra salina (Salas, 1975, y referencias allí citadas). Esto posiblemente podría deberse a un descenso en el nivel freático del salar debido al caudal extraído por la minería de boro (Tassi, y otros, 2010).

Cusicanqui (1979), indica que estas aguas hidrotermales se encuentran influenciadas por el agua del nivel freático, generándose procesos de mezclas.

Las manifestaciones termales corresponden a vertientes y piscinas burbujeantes, donde se ha reconocido la presencia de importantes depósitos de sinter y presencia de abundantes algas (Aguilera, 2008). Éstas cubren un área de 45 km<sup>2</sup> y sus temperaturas varían entre 20° a 80°C, considerablemente mayor a la temperatura media anual del área de 2,9°C.

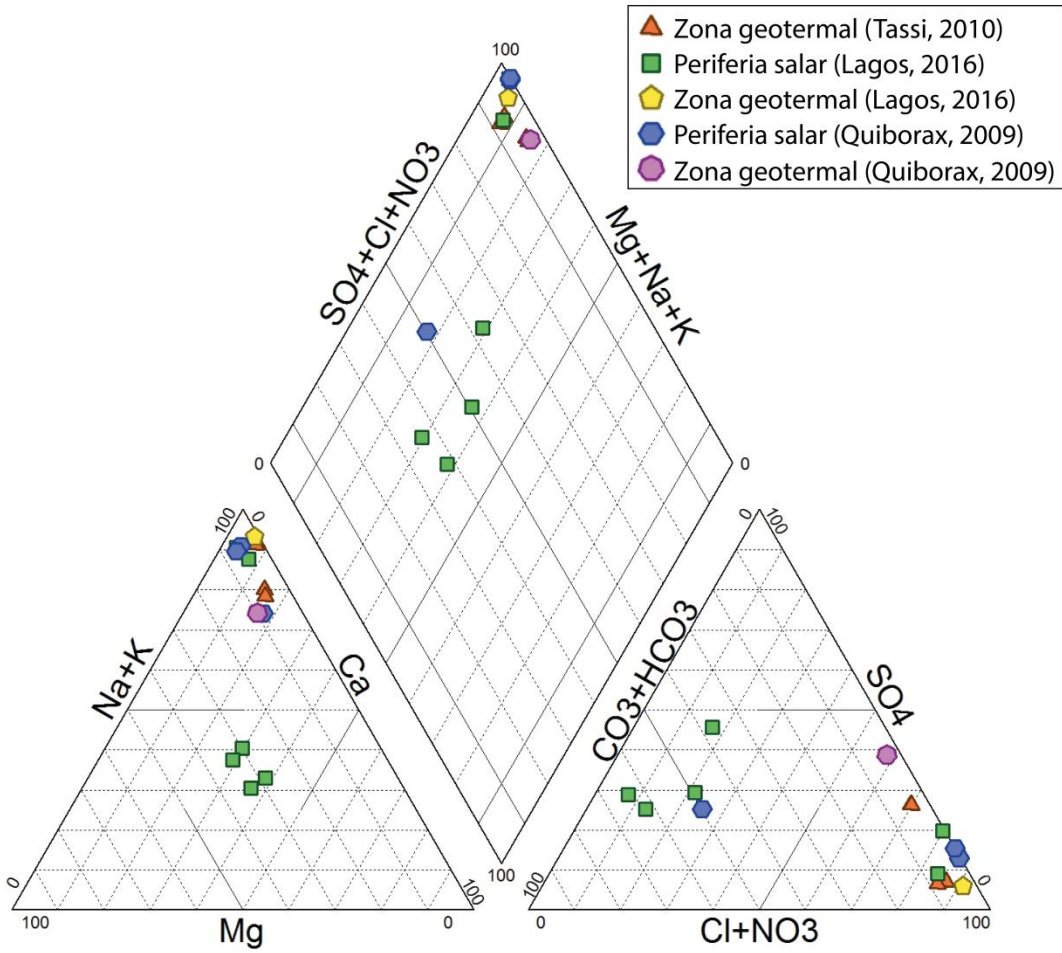
Respecto a la química de los gases volcánicos presentes en este sistema, se han realizado mediciones en los gases en las piscinas burbujeantes (Aguilera, 2008; Tassi et al., 2010). Los resultados indican que el CO<sub>2</sub> es la especie dominante, con abundancia relativa de CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S y N<sub>2</sub>. Estos mismos autores verificaron y se verificó la ausencia de los gases HCl, HF, SO<sub>2</sub> y CO. Tassi et al. (2010) sugiere que el hidrotermalismo en los sistemas geotermales del norte de Chile, incluido el salar de Surire, se encuentra directamente asociado a la actividad volcánica reciente; es decir, que poseen firmas tanto magmáticas como hidrotermales.

## DATOS HIDROQUÍMICOS ANTERIORES

Se recopilaron análisis químicos de la cuenca del Salar de Surire de Quiborax (2009), Tassi (2010) y Lagos (2016). El primero corresponde a un informe de la empresa minera Quiborax para el programa de seguimiento ambiental por la extracción de ulexita en el Salar de Surire. Este informe muestrea en vertientes de las laderas contiguas al salar y en el área geotermal. El segundo corresponde a un estudio de la hidrogeoquímica de sistemas hidrotermales del norte de Chile, donde muestrearon la zona geotermal del Salar de Surire. El tercero corresponde a una tesis de magíster cuyo objetivo busca relacionar la hidroquímica de las fuentes termales con la de los ambientes salinos, considerando las muestras de vertientes de las laderas y de la zona geotermal.

Para observar estos datos en el diagrama de Piper, se hace hincapié en la diferencia entre las vertientes frías que ingresan al salar (denominado ‘Periferia Salar’) y los fluidos calientes del área geotermal (denominado ‘Zona geotermal’) para comparar con mayor detalle entre los distintos trabajos (Figura 9). Del diagrama se observa que las vertientes son aguas bicarbonatadas o bicarbonatadas-sulfatadas sódico-magnésico cálcica en la mayoría de las muestras (Figura 9). Las restantes son clorurada sódica. Esta diferencia puede deberse al nivel de interacción con la mineralogía del salar.

Por otro lado, todas las muestras de las zonas geotermales son cloruradas sódicas.

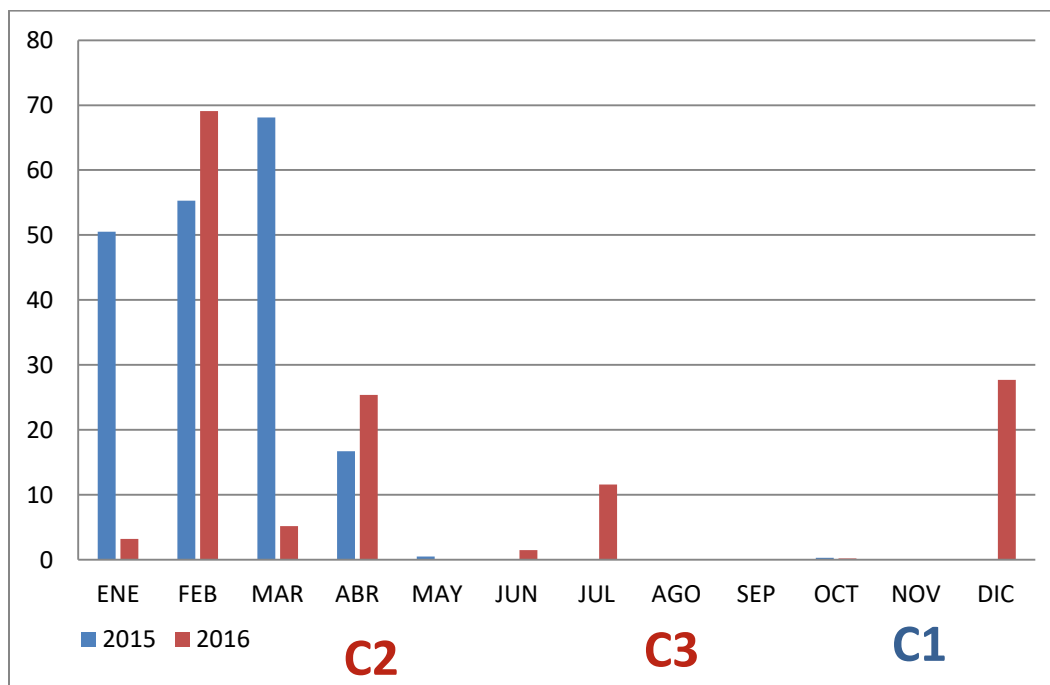


**FIGURA 9: DIAGRAMA DE PIPER CON LOS ANÁLISIS HIDROQUÍMICOS RECOPIADOS DE TRABAJOS ANTERIORES.**

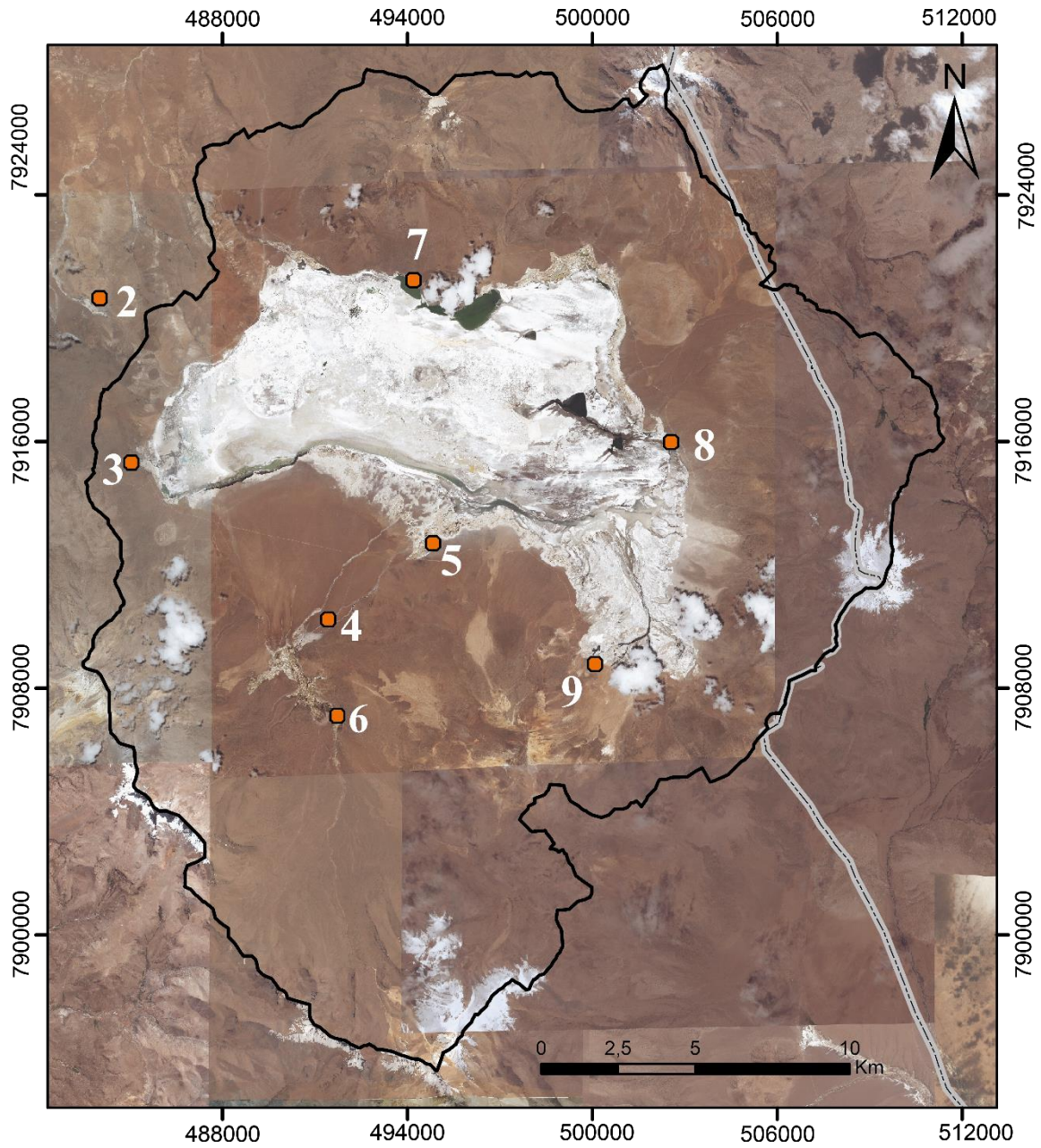


## RESULTADOS

ICASS consultores seleccionó 8 puntos del salar para tomar muestras en 3 campañas distintas: noviembre de 2015, y mayo y agosto de 2016. Se tomaron muestras en diferentes estaciones para observar la variación intraanual. Así, previo a la primera campaña habían transcurrido 6 meses secos (sin precipitaciones); anterior a la segunda campaña tuvo lugar el invierno boliviano, con abundantes precipitaciones, y antes de la tercera campaña hubo precipitaciones en julio del 2016 de 11,6 mm (Figura 10). El promedio de precipitaciones en julio en la zona es de 3 mm, por lo que las precipitaciones en la tercera campaña fueron superiores a lo usual. En la Figura 11 se indican los puntos de muestreo. En la Tabla 3 se indican los valores del balance iónico de cada muestra. Las muestras bajo 5,5 se considera que cumplen. En la Tabla 3 se describen los puntos muestreados en cada terreno y los utilizados en este estudio, que son los que cumplieron con los requisitos del balance iónico descritos en la introducción.



**FIGURA 10: PRECIPITACIONES OCURRIDAS ENTRE LAS CAMPAÑAS DE TOMA DE MUESTRAS DE AGUA DE LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. DATOS OBTENIDO DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE CHILCAYA DE LA DGA.**



**Leyenda**

- Puntos de muestreo
- Cuenca hidrográfica
- Frontera nacional

**FIGURA 11: PUNTOS MUESTREADOS. EL RÍO SURIRE CORRESPONDE A LOS PUNTOS 6, 4 Y 5. EL PUNTO 9 CORRESPONDE AL SISTEMA HIDROTHERMAL, EL PUNTO 7 CORRESPONDE A UN CUERPO LACUSTRE MENOR DEL SALAR, Y LOS PUNTOS 2, 3 Y 8 CORRESPONDEN A VERTIENTES.**

**TABLA 3: MUESTRAS POR CAMPAÑA CON EL RESULTADO DEL BALANCE IÓNICO.**

<b>Campaña</b>	<b>ID</b>	<b>BI</b>	
C1	2	-0,40	Cumple
	7	2,13	Cumple
	8	3,02	Cumple
	9	1,57	Cumple
	6	-3,05	Cumple
	4	-0,31	Cumple
	3	-9,11	No cumple
C2	6	6,21	No cumple
	4	-5,21	Cumple
	3	-4,25	Cumple
	9	-5,32	Cumple
	8	5,92	No cumple
	7	-1,35	Cumple
	5	-4,68	Cumple
C3	3	4,01	Cumple
	5	4,13	Cumple
	9	-5,33	Cumple
	8	2,99	Cumple
	7	-6,38	No cumple

1. Observaciones de terreno:

En la Tabla 4 se muestran las características de lugares de muestreo y las correspondientes características hidrológicas.

**TABLA 4: OBSERVACIONES DE TERRENO EN LOS PUNTOS DE MUESTREO.**

<b>ID</b>	<b>Descripción de sitio</b>	<b>Flujo</b>
2	Arroyo de 2 vertientes	Arroyo que se forma de dos vertientes ubicadas al lado del camino
7	Costado de laguna del salar	Agua de la laguna del salar
8	Vega que alimenta salar.	Flujo continuo que corre entre la vega y alimenta al salar
9	Termas de Polloquere	Agua termal almacenada en la laguna. Se observa el afloramiento de vertientes en el fondo. Gran presencia de burbujas. Aporte de la laguna al salar de aprox. 100-200 L/s.
6	Río Surire. Arroyo que atraviesa camino	Se genera un pequeño arroyo en el interior del bofedal. Se toma la muestra en cruce de camino.
4	Río Surire. Cauce superficial	Rio con bajo caudal, el que se infiltra totalmente 20 metros aguas abajo.

3	Descarga de vegas.	Vertientes que alimentan una vega y a la altura del camino se produce un arroyo que drena al salar.
5	Río Surire	Escorrentía superficial.

Todos los puntos con excepción del 9 corresponden a escorrentía superficial. En específico, los puntos 2 y 8 fueron obtenidos tras pasar por un tubo o badén (bajo el camino), y el punto 3 fue obtenido antes de pasar por el tubo o badén (antes del camino).

El punto 9 es excepcional debido a que posee surgencias y burbujas de diferentes tamaños, hasta diámetros de 20 cm. Desde este punto, llamado 'Baños de Polloquere', se observa una importante salida de agua que alimenta al salar.

## 2. Parámetros fisicoquímicos

En la Tabla 28 del Anexo 1 se tabulan los resultados fisicoquímicos medidos en terreno de cada muestra. En la campaña 2 estos resultados no se consideran debido a que en ese terreno no se pudo calibrar la sonda multiparámetro dadas las bajas temperaturas. A continuación se presenta una breve descripción de los valores de cada parámetro en las muestras. Por simplificación de notación, la campaña 1 se expresará como C1, la campaña 2 como C2 y la campaña 3 como C3.

### 2.1. Temperatura

En la zona los valores menores de temperatura corresponden a los puntos 3 (2,3°C) y 7 (8,4°C) y los mayores al punto 9 (46 y 34°C). A partir de la definición de aguas termales realizada por Schoeller (1962), que considera aguas termales a todas las aguas superficiales que poseen una temperatura 5°C o mayor relativo a la temperatura media anual del aire (2,9°C), todas las muestras medidas en terreno poseen un carácter termal (2, 4, 5, 6, 8, 9, 7) excepto la 3.

### 2.2. pH

Los puntos de menor pH son el 3 (5,6) y el 9 (6,51 y 7,2) y los de mayor pH son el 6 (9,52) y el 8 (9,75).

### 2.3. CE

Los puntos 3 (110  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), 6 (231  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y 2 (311  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) son los que poseen menor CE, y se explica porque son los puntos vertientes. En particular, son los puntos del lado centro y O del salar. Existe una secuencia de aumento de CE desde el punto 6 hacia el 4 y el 5, que es la secuencia río abajo del Río Surire. El punto 7 (71500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) es el que posee la mayor CE, superando a la muestra que la sigue 10 veces aprox. Este punto corresponde a una salmuera en el salar, donde

probablemente sus aguas sean estancadas y se encuentren permanentemente sometidas a evaporación. Los puntos 9 (~6000-7400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y 8 (~4000-5500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) la siguen, ambos del lado E del salar. El primero corresponde al punto de surgencias de Polloquere, por lo que la proveniencia de sus iones se explica por hidrotermalismo y/o incorporación de gases o fluidos volcánicos; el último corresponde a una vertiente que proviene del cono aluvial que se encuentra en la zona NE del salar.

### 3. Análisis químicos

Los elementos químicos que se midieron en las 3 campañas y que poseen valores sobre el límite de detección fueron los elementos mayoritarios ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ), el  $\text{Br}^-$  y As. Otros elementos muestreados como Cd, cianuros, Cu, Cr, Fe, Mn, Hg, Pb, Se y Zn se encuentran bajo el límite de detección en al menos el 90% de las muestras y el 10% restante no pose concentraciones altas anómalas, por lo que no se consideran para este estudio.

El sílice disuelto se midió en la C1, mostrando valores bajo el límite de detección en todas las muestras, y el silicio total (donde se contabiliza el coloidal y el disuelto) se midió en las C2 y C3, mostrando valores relevantes.

En la Tabla 5 se muestran las concentraciones de elementos mayores de las aguas muestreadas. En la Tabla 29 del Anexo 1 se muestra una tabla con las concentraciones de los elementos minoritarios muestreados.

**TABLA 5: ELEMENTOS MAYORES DE LAS AGUAS MUESTREADAS.**

		<b>Especies químicas [meq/L]</b>						
		Bicarbonato	Calcio	Cloruro	Magnesio	Potasio	Sodio	Sulfatos
<b>C1</b>	1	0,692	0,436	0,232	0,151	0,128	0,943	0,819
	2	2,260	0,940	0,237	0,460	0,026	2,104	1,029
	4	1,608	3,100	2,103	3,142	0,467	2,474	2,333
	6	1,102	0,635	0,154	0,743	0,246	1,235	0,621
	7	12,440	32,450	744,513	62,667	65,615	818,043	180,97
	8	3,860	4,465	29,666	1,500	2,241	32,348	3,458
	9	2,820	11,100	50,454	4,233	5,667	56,522	21,854
<b>C2</b>	3	0,938	0,460	0,122	0,336	0,073	0,281	0,263
	4	1,868	2,070	1,626	1,950	0,292	1,639	1,996
	5	5,560	2,995	2,835	6,317	0,585	6,043	9,458
	7	13,620	29,100	844,239	73,271	70,722	849,45	206,82
	9	2,820	10,100	57,323	3,633	4,872	54,217	24,229
<b>C3</b>	3	0,700	0,487	0,152	0,397	0,078	0,282	0,198
	5	5,840	3,320	2,207	6,375	0,546	5,913	6,917
	8	6,500	3,050	57,482	2,842	3,949	60,478	3,333
	9	2,400	10,000	57,662	3,892	5,487	54,304	24

## DISCUSIÓN

### ELEMENTOS MAYORES

Los elementos mayores en la zona de estudio han sido representados en el diagrama de Piper (Figura 12) y en los diagramas de Stiff (Figura 13) para establecer el tipo hidrogeoquímico de las aguas analizadas y observar su distribución en el área de estudio.

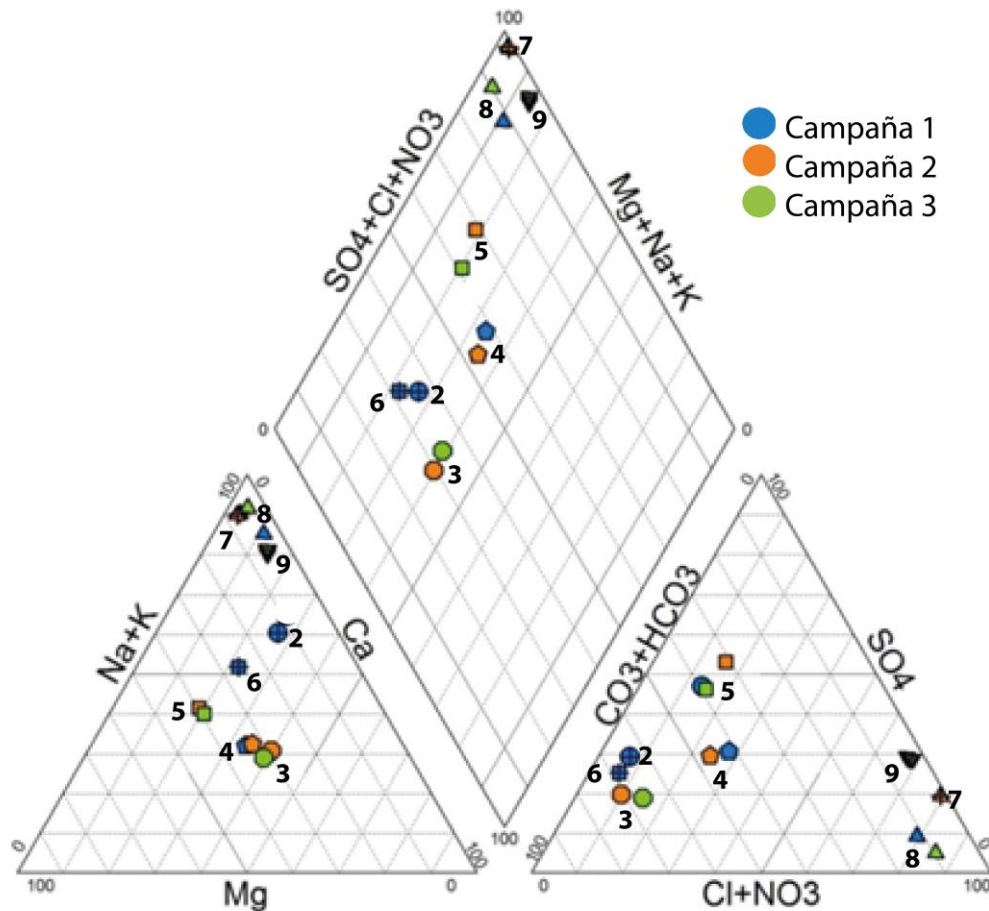
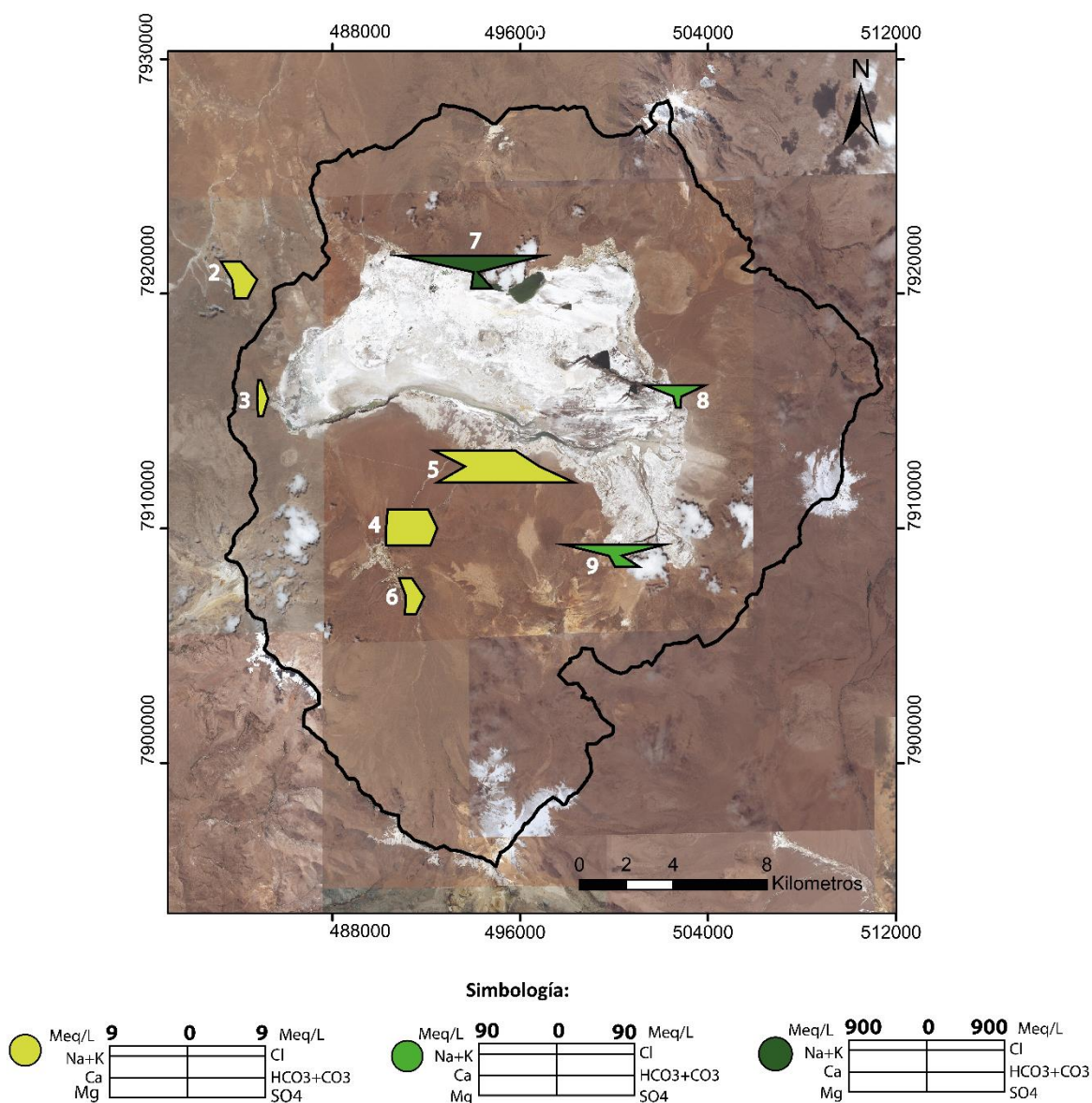


FIGURA 12: DIAGRAMA DE PIPER. SE INCLUYEN LAS MUESTRAS DE LAS 3 CAMPAÑAS.

En el diagrama de Piper se incluyen las muestras de las 3 campañas. Se observa que las muestras analizadas varían de cálcico-magnésico-sódicas a sódicas en el campo de los cationes y de bicarbonatada, bicarbonatada-sulfatada a clorurada en el campo de los aniones. Se trata de aguas bicarbonatadas a aguas cloruradas sódicas. En particular, la muestra 9 de la zona geotermal y las muestras 8 y 7 cercanas al salar son cloruradas sódicas. Estos resultados son acordes a los publicados en trabajos anteriores a los cuales se ha hecho mención en el párrafo de antecedentes.



Los diagramas de Stiff corroboran lo indicado en el diagrama de Piper y, situados en un mapa georreferenciado permiten observar que las aguas bicarbonatadas cálcico-magnésico y sódicas poseen una menor mineralización y son las lejanas al salar. Por el contrario, las aguas cloruradas sódicas poseen una mayor mineralización y se ubican en correspondencia del salar, o en la zona geotermal.



**FIGURA 13: DIAGRAMAS DE STIFF UBICADOS SOBRE LOS PUNTOS ANALIZADOS. LAS DIFERENCIAS DE CONCENTRACIONES ENTRE MUESTRAS VARÍA HASTA EN UN FACTOR DE 300, POR LO QUE LAS FIGURAS SE ESCALAN DE MANERA LOGARÍTMICA: DE 0 A 9 MEQ/L; 0-90 MEQ/L; Y 0-900 MEQ/L.**



## DIAGRAMAS BINARIOS

De los elementos mayores que dominan la química de aguas naturales, el cloruro tiende a poseer un carácter conservativo y a concentrarse, porque suele mantenerse en solución hasta la saturación de halita, mineral altamente soluble. Esto lo hace un buen trazador para discutir el comportamiento de otros elementos en las aguas (Eugster, y otros, 1979).

En la figura 14 se muestran diagramas binarios del  $\text{Cl}^-$  frente a otros elementos mayores. Se observa que existe un enriquecimiento progresivo entre el  $\text{Cl}^-$  y los elementos  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Na}^+$ . Esta correlación indica que es probable que posean un origen en común. En particular, se observa que sus coeficientes de correlación son aceptables, con un valor mayor a 0,7, excepto en el sulfato, que es mayor a 0,6 (Tabla 6).

Observando el gráfico  $\text{Na}^+$  versus  $\text{Cl}^-$ , se observa una correlación positiva, hecho que sugiere un probable origen común, que dadas las características de la zona de estudio, es posible asociar a las altas concentraciones de halita y otras evaporitas. La disolución de halita ( $\text{NaCl}$ ) como origen predominante de los iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  corresponde estequiométricamente a 1 mol de  $\text{Na}^+$  y 1 mol de  $\text{Cl}^-$  en las aguas. En el diagrama molar logarítmico en la Figura 14, se observa que las muestras 4, 8, 9 y 7 se encuentran en esta línea, sugiriendo que la disolución de halita es el origen de estos elementos en las muestras analizadas. Las muestras 3, 2, 6 y 5 se encuentran levemente enriquecidas en  $\text{Na}^+$ , por lo que es posible que exista una participación de otros minerales y/o otros procesos responsables de la cantidad de  $\text{Na}^+$  en las muestras.

La Figura 14 muestra los diagramas del  $\text{Cl}^-$  respecto a  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{SO}_4^{+2}$  y  $\text{K}^+$ , y en ellos se pueden observar 3 grupos de muestras: el primero formado por las muestras 3, 2 y 6 de vertiente fría de STD (sólidos totales disueltos) bajo, que varía de 70-200 mg/L; el segundo, constituido por las muestras 4 y 5, ambas del Río Surire, con un STD medio/ bajo que varía entre 400 y 700 mg/L; el tercero está formado por las muestras 8 y 9, del sector SE del salar, con un STD medio/alto de 3900 a 7400 mg/L. El punto 7 es diferente al resto de las muestras. Se ubica en un cuerpo lacustre al norte del salar y posee un STD cercano a 70.000 mg/L.

Del primer grupo se destaca el punto 3, con la menor concentración de cloruro, y el hecho de que muestren una tendencia al enriquecimiento en los iones considerados en los diagramas.

Las muestras 4 y 5 del segundo grupo, se han tomado a lo largo de la línea de flujo del Río Surire y muestran un incremento paulatino en el sentido del flujo.

Las muestras que forman el tercer grupo vienen de contextos hidrogeológicos diferentes, siendo el punto 9 una surgencia termal y el 8 una vertiente fría. El contenido  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  de estas muestras es similar, mientras que presentan un comportamiento diferente para las concentraciones de  $\text{SO}_4^{-2}$ .

Finalmente, la muestra 7 corresponde a una salmuera, la cual posee concentraciones diferentes al resto de las muestras.

De forma general se observa una cierta tendencia hacia un incremento de la salinidad en función de la cercanía al salar que se refleja en los diagramas de la figura 14.

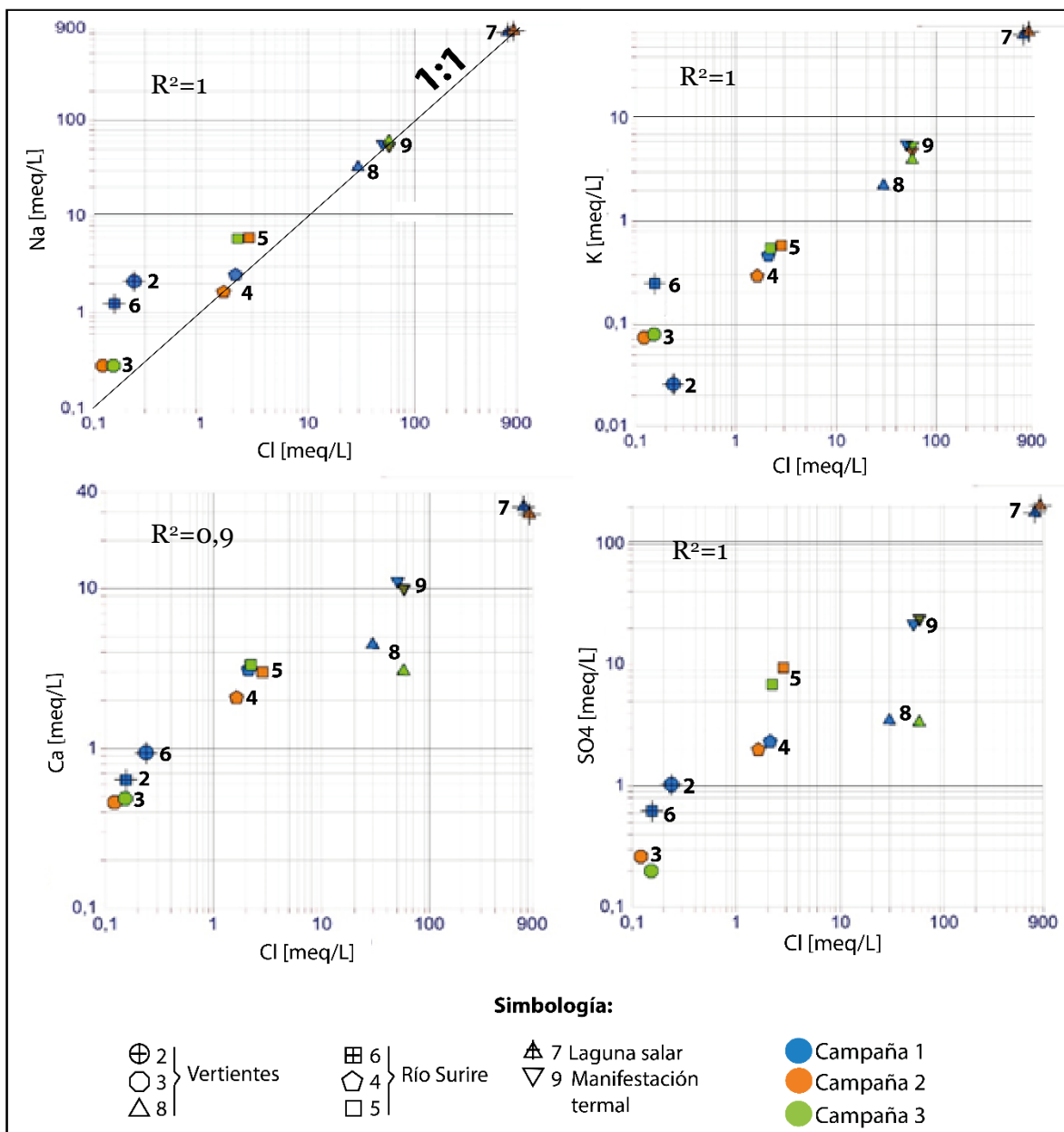


FIGURA 14: GRÁFICOS BINARIOS DE ELEMENTOS MAYORES VS CLORURO [MMOL/L]. EN EL GRÁFICO NA VS CL SE PRESENTA LA LÍNEA DE DISOLUCIÓN DE HALITA.

En la zona de estudio,  $\text{Ca}^{+2}$  y el  $\text{Mg}^{+2}$  se encuentran en minerales evaporíticos asociados tanto a carbonatos, sulfatos, como a cloruros. Dado que la fuente más probable del cloruro es la halita, queda evaluar el posible origen de los otros iones. Entre los sulfatos magnésicos, el más común es la epsomita ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ); entre los carbonatos magnésicos, la magnesita ( $\text{MgCO}_3$ ) y entre los carbonatos cálcico magnésicos, la dolomita ( $\text{Ca}_{1+x}\text{Mg}_{1-x}(\text{CO}_3)_2$ ). Por otro lado, el calcio en carbonatos se presenta principalmente como calcita  $\text{CaCO}_3$ , y en sulfatos

se presenta principalmente como yeso  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  o anhidrita. Estos minerales es probable que se encuentren dadas las características de la zona.

Como ya visto en la sección anterior, si dos especies se correlacionan positivamente, es posible suponer que ambos procedan de la misma fuente. Si las características de la zona indican cierto tipo de mineralogía asociada a ambas especies, entonces existe la posibilidad de que la fuente de estos elementos en el agua sea atribuible a la interacción con este mineral.

Considerando la estequiometría asociada a una eventual disolución, en un gráfico  $\text{Ca}^{+2}$  vs  $\text{HCO}_3^-$  se puede evaluar si los minerales carbonáticos están asociados a las concentraciones de  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  (ec. 1 y 2).

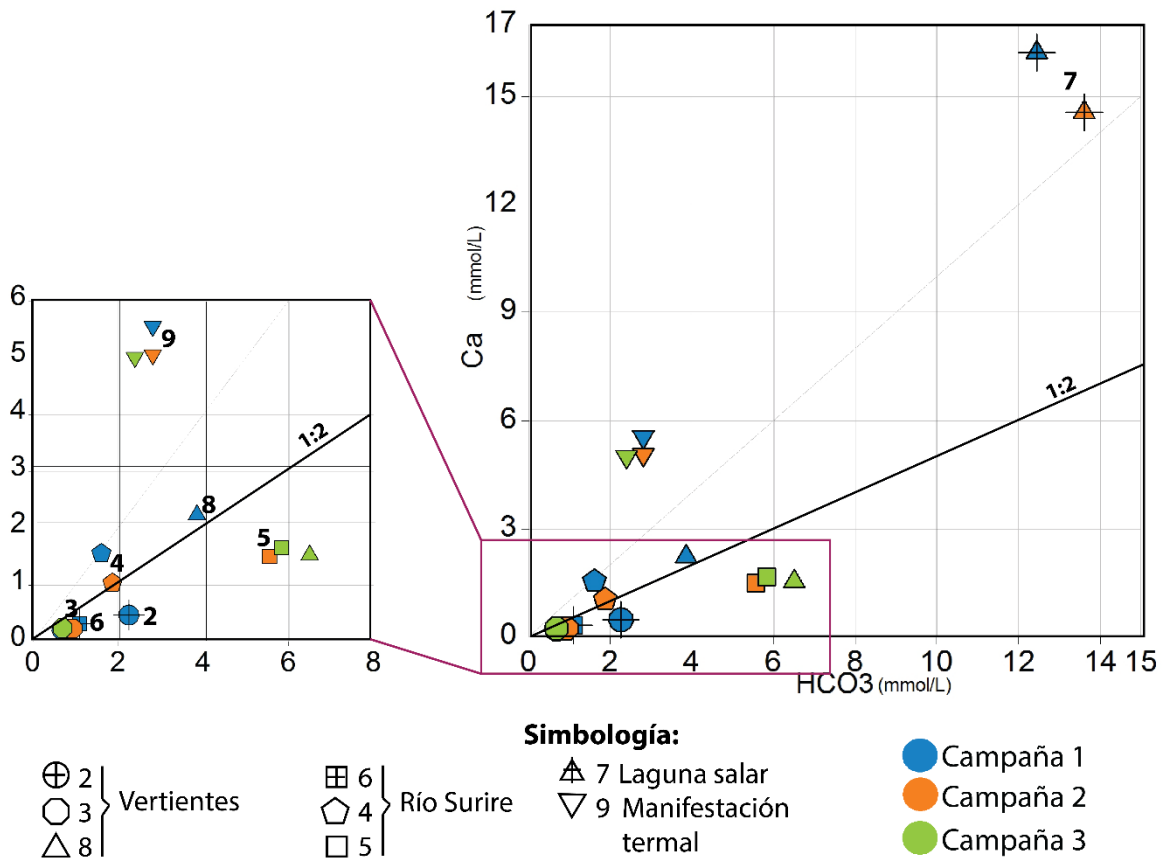
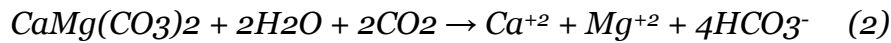
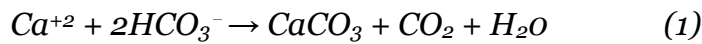


FIGURA 15: GRÁFICO MOLAR DE CA VS  $\text{HCO}_3$ .

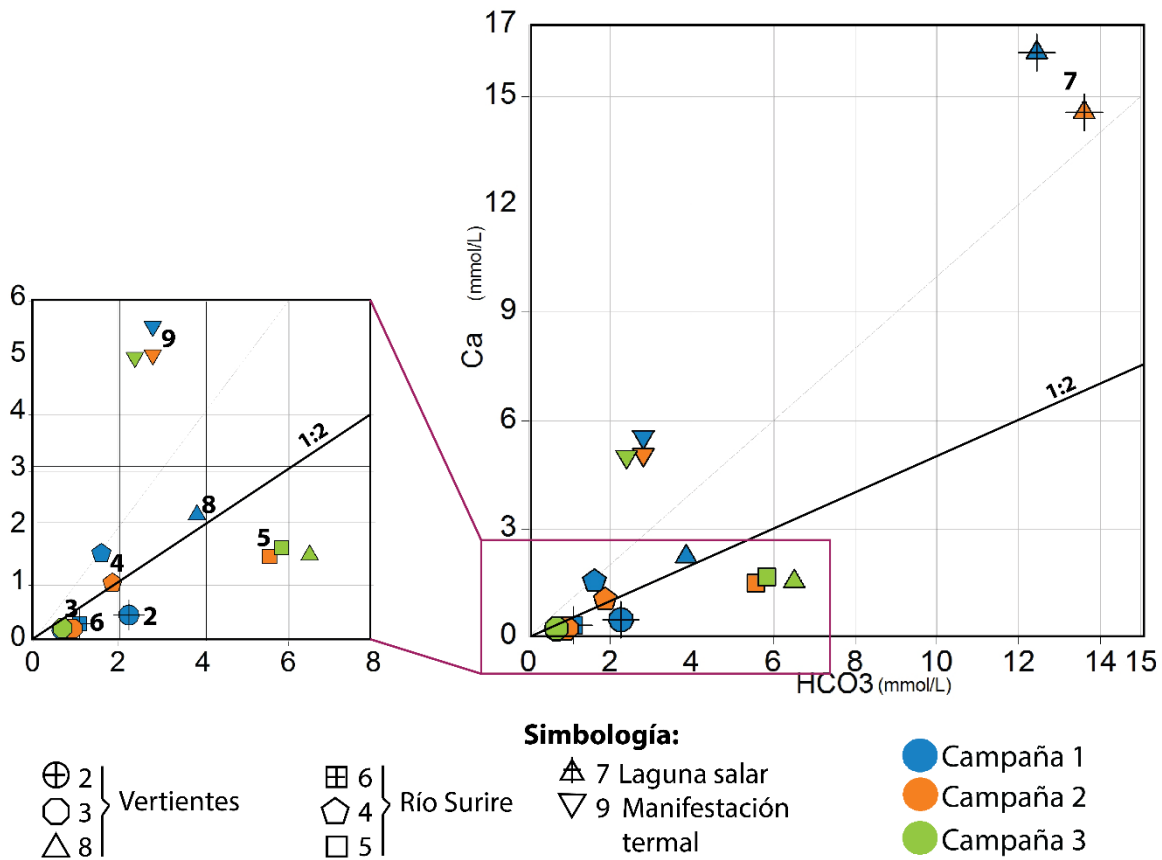


Figura 15 y Figura 16 se concluye que las muestras en general se encuentran alejadas de las líneas estequiométricas consideradas indicando que otros procesos y/o minerales pueden estar participando en las concentraciones determinadas en las aguas analizadas. Las muestras 6 y 2 están por debajo de la línea 1:2. Estas variaciones pueden estar asociadas a los procesos de disolución y precipitación en ambientes evaporíticos, que pueden añadir o sustraer estos iones de las soluciones.

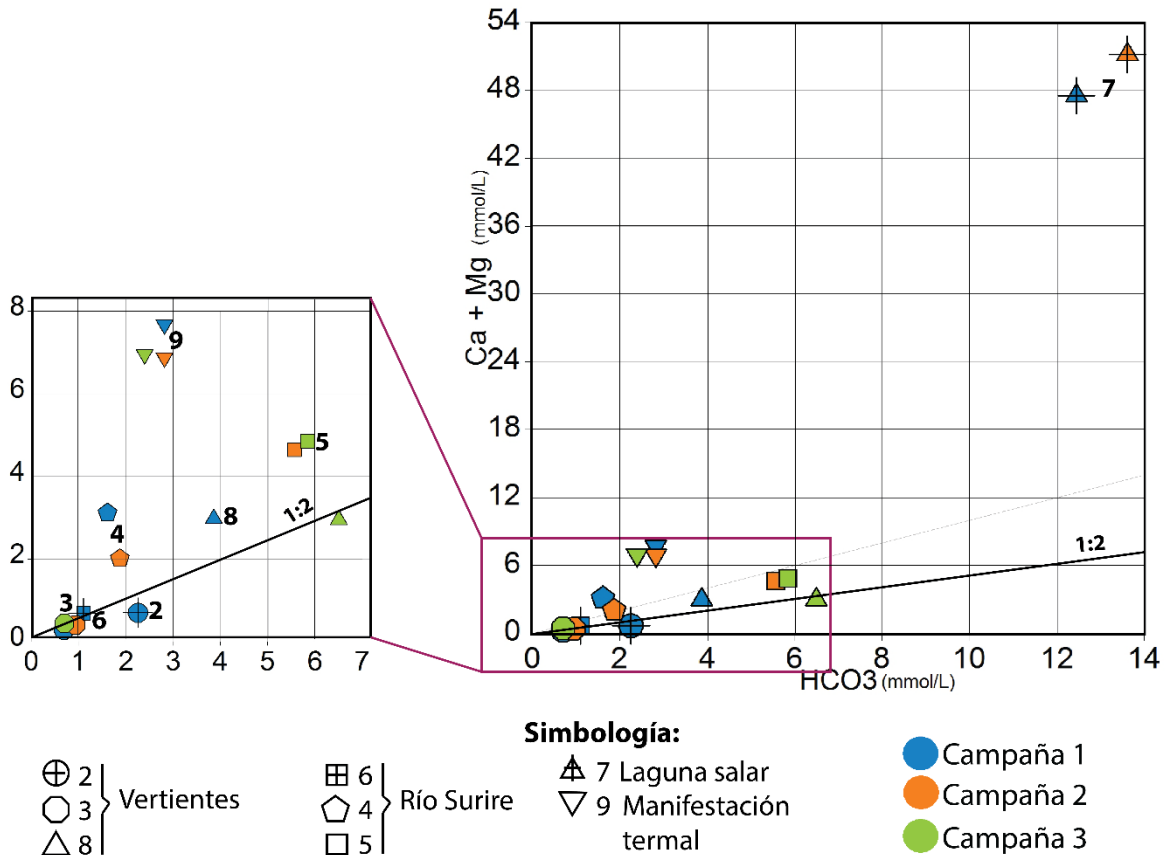
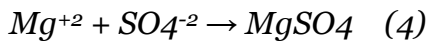
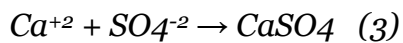


FIGURA 16: GRÁFICO MOLAR DE (CALCIO+MAGNESIO) VS HCO<sub>3</sub>

Por otro lado, en el gráfico Ca<sup>+2</sup>+Mg<sup>+2</sup> versus SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> se puede ubicar la recta de disolución de yeso y epsomita, ambas con una razón estequiométrica de 1:1 (ec. 3, 4).



En la Figura 17 se observa que existe un enriquecimiento progresivo de ambos parámetros, pero algunas de las muestras se alejan de la recta de disolución. En particular, las muestras 4 y 8 se encuentran ligeramente enriquecidas en Ca<sup>+2</sup>+Mg<sup>+2</sup>, y las muestras 9 y 7 se encuentran muy enriquecidas en SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>. Esto sugiere que, de existir disolución de epsomita y yeso en la zona, estos no serían los únicos minerales en participar en las concentraciones de SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> en estas muestras.

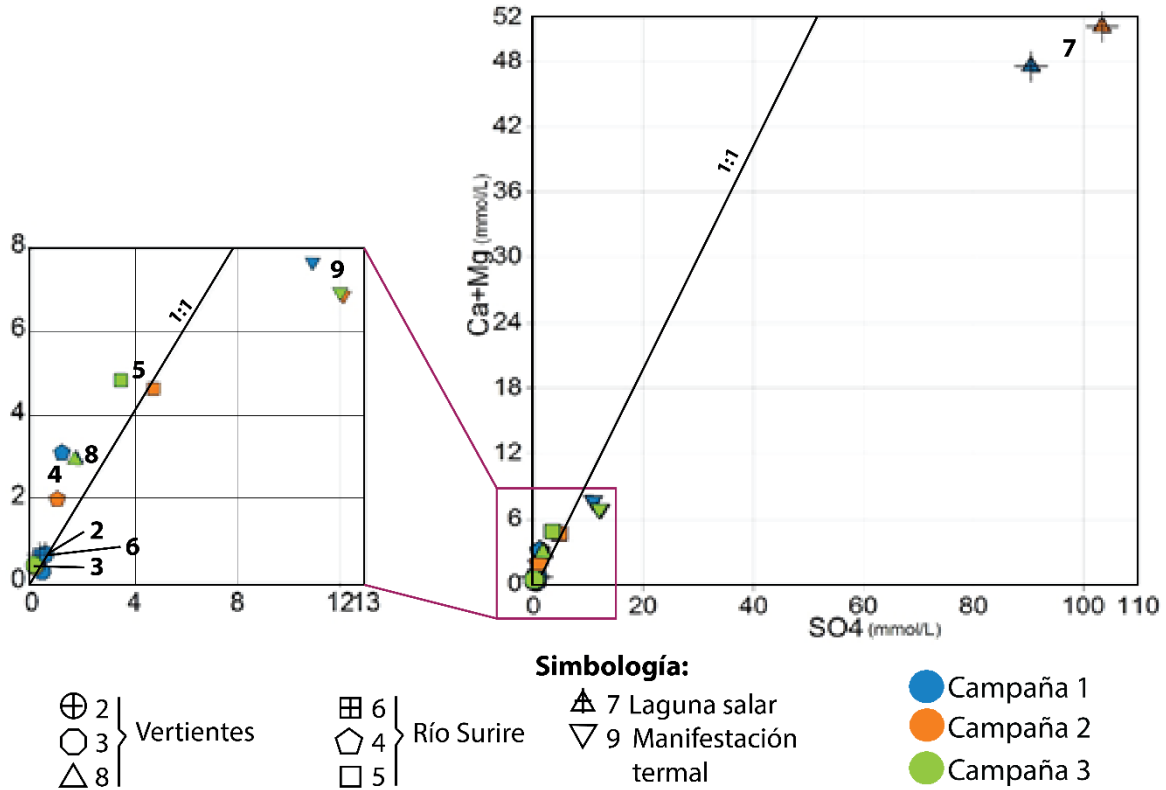


FIGURA 17: GRÁFICO MOLAR DE SULFATO VS CALCIO+MAGNESIO

Para observar si los contenidos en los iones analizados hasta este punto podrían ser asociados a los minerales mencionados y para resumir la situación, se han representado las muestras en un gráfico que agrupa los cationes versus los aniones que deberían estar relacionados en estos procesos (Figura 18). Las muestras se alinean alrededor de las líneas de disolución 1:1 y 1:2, indicando así que el origen de estos iones puede estar relacionado con la disolución de carbonatos y sulfatos de calcio y magnesio. Para las muestras con más  $\text{SO}_4^{2-}$  probablemente es necesario pensar en otros aportes, como en la incorporación de especies volátiles emanadas en las manifestaciones termales de la zona. En particular, estos gases han mostrado composiciones no despreciables de  $\text{H}_2\text{S}$ .

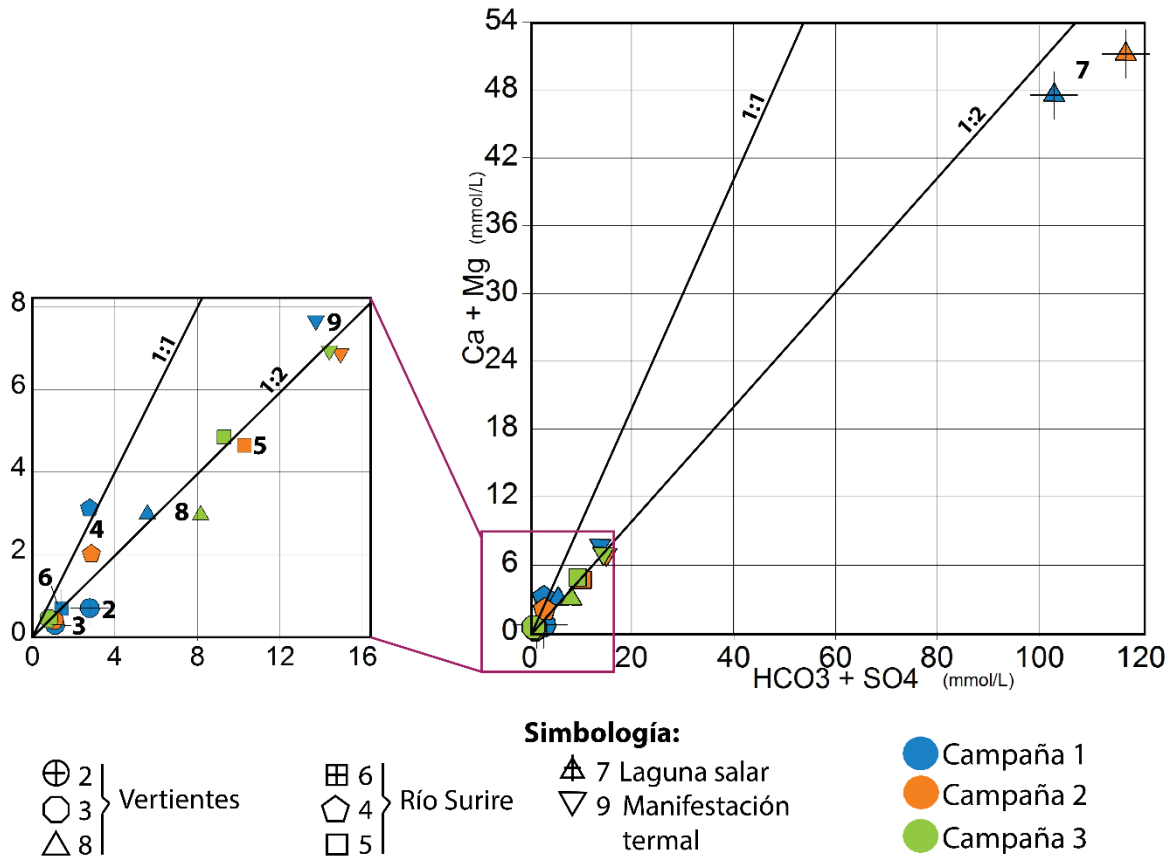


FIGURA 18: GRÁFICO MOLAR DE CA+MG VS SO<sub>4</sub>+HCO<sub>3</sub>

### SÍLICE

La sílice es una especie química de difícil solución, pero que en determinadas condiciones pasa a la fase acuosa. En particular, es capaz de disolverse cuando se aumenta la temperatura y la salinidad del agua, siendo el sílice amorfo en agua pura capaz de disolverse desde los 25°C (Icenhower, y otros, 2000), y el cuarzo desde los 25-100°C (Rimstidt, y otros, 1980) (Polster, 1994).

En la zona de estudio, las aguas poseen un carácter termal en la mayoría de las muestras: sólo la 3 y la 7 se encuentran fuera de la clasificación de aguas termales de Custodio (2001 y referencias allí citadas). La temperatura de las aguas varía de 3°C a 36°C, para las mediciones de la segunda y tercera campaña, y las concentraciones de silicio varían entre 2,3 y 9 meq/L. Ambos parámetros están relacionados en todas las muestras, con un índice de correlación de  $R^2=0,73$  (Figura 19). Lo más probable es que el silicio sea adquirido, en la mayoría de las muestras, por una interacción agua/roca en la cuenca hidrográfica, la cual posee una mineralogía volcánica de porcentaje en peso de sílice de 60 a 63% (García, 2004). En el punto de manifestación termal la concentración de sílice es la más alta medida entre los puntos muestreados, en acorde con el hecho que su temperatura (34 y 36°C) es la más alta medida. Si bien se cree que la roca caja del sistema



geotermal es volcánica en su totalidad (Figura 7) por lo que la interacción del fluido sería con minerales silicatados, no se puede saber si el agua muestreada en el punto 9 ha circulado por profundidad en el sistema geotermal.

Aunque Lagos (2016) indica que las concentraciones de silicio en el punto 9 no son las mismas que las de las aguas que circulan en profundidad, debido a la precipitación de sínter de sílice en superficie.

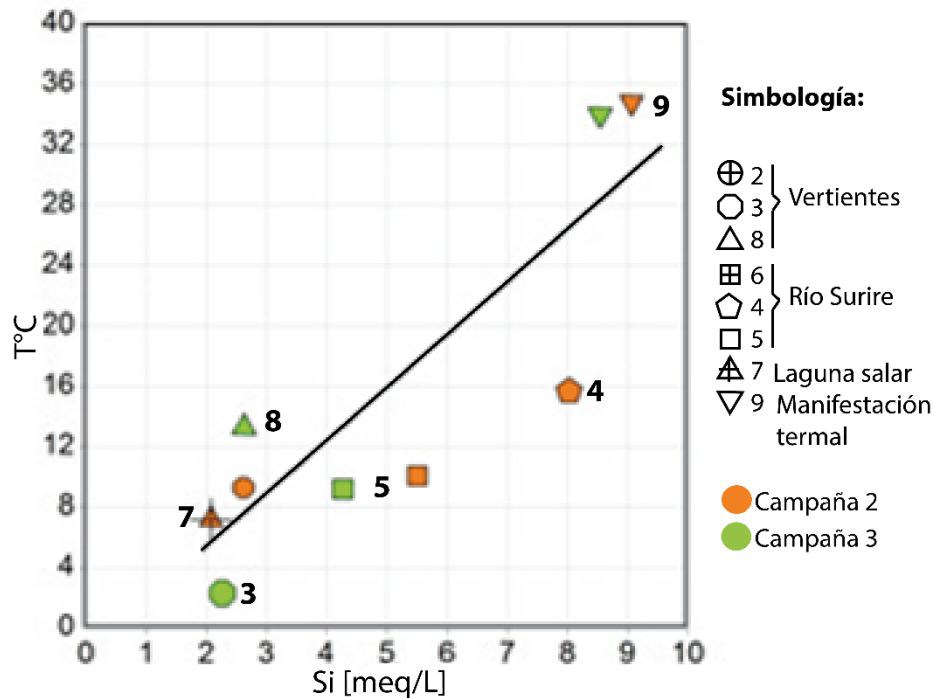


FIGURA 19: GRÁFICO DE TEMPERATURA VS SILICIO. LA LÍNEA NEGRA INDICA LA LÍNEA DE TENDENCIA. NO APARECE LA CAMPAÑA 1 DEBIDO A QUE EN ELLA NO SE ANALIZARON DATOS DE SILICIO TOTAL.

## ISÓTOPOS DEL AGUA

En las muestras obtenidas en este estudio se midió el contenido de isótopos de  $^2\text{H}$  y  $^{18}\text{O}$  en la molécula de agua. Estos contenidos poseen una alta variabilidad en las muestras, que fluctúa entre -3 y -13 para el  $\delta^{18}\text{O}$  y entre -103 y -51 para el  $\delta^2\text{H}$ . Estas concentraciones son útiles para identificar procesos por los que ha pasado el agua o su posible origen.

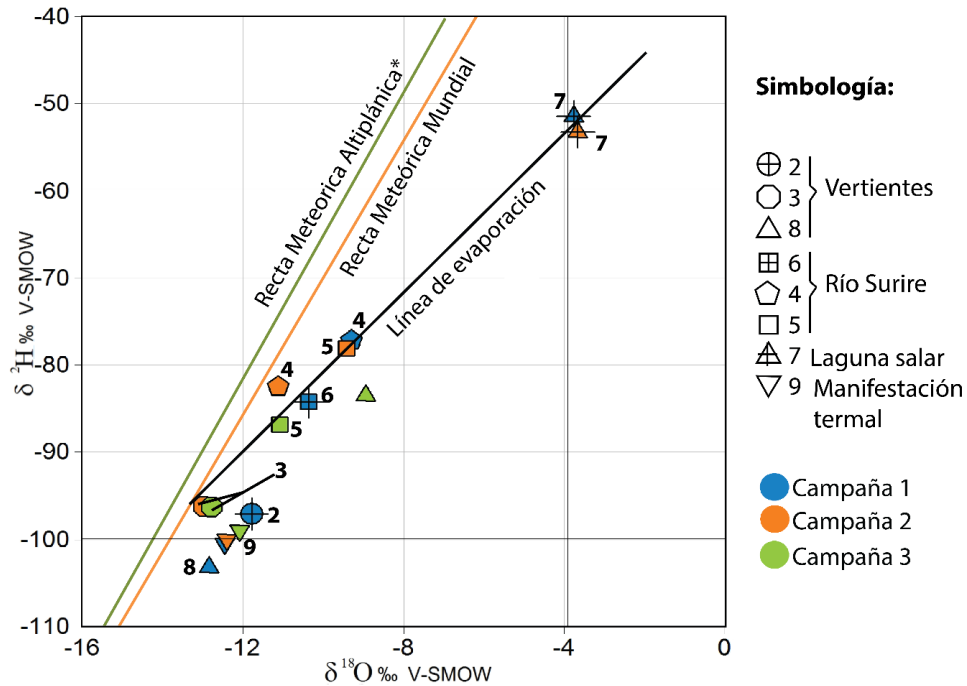
Es por esto que, en un gráfico de  $\delta^2\text{H}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$  de aguas meteóricas, éstas tenderán a ubicarse en una recta definida. Generalizando a nivel mundial, esta recta es la denominada RMM (Recta Meteórica Mundial), de ecuación:

$$2\text{H} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10$$

Sin embargo, se pueden realizar ajustes para cada zona y Herrera et al. (2006) lo realizó para las precipitaciones del lago Chungará:

$$\delta^2H = 7,9 * \delta^{18O} + 14$$

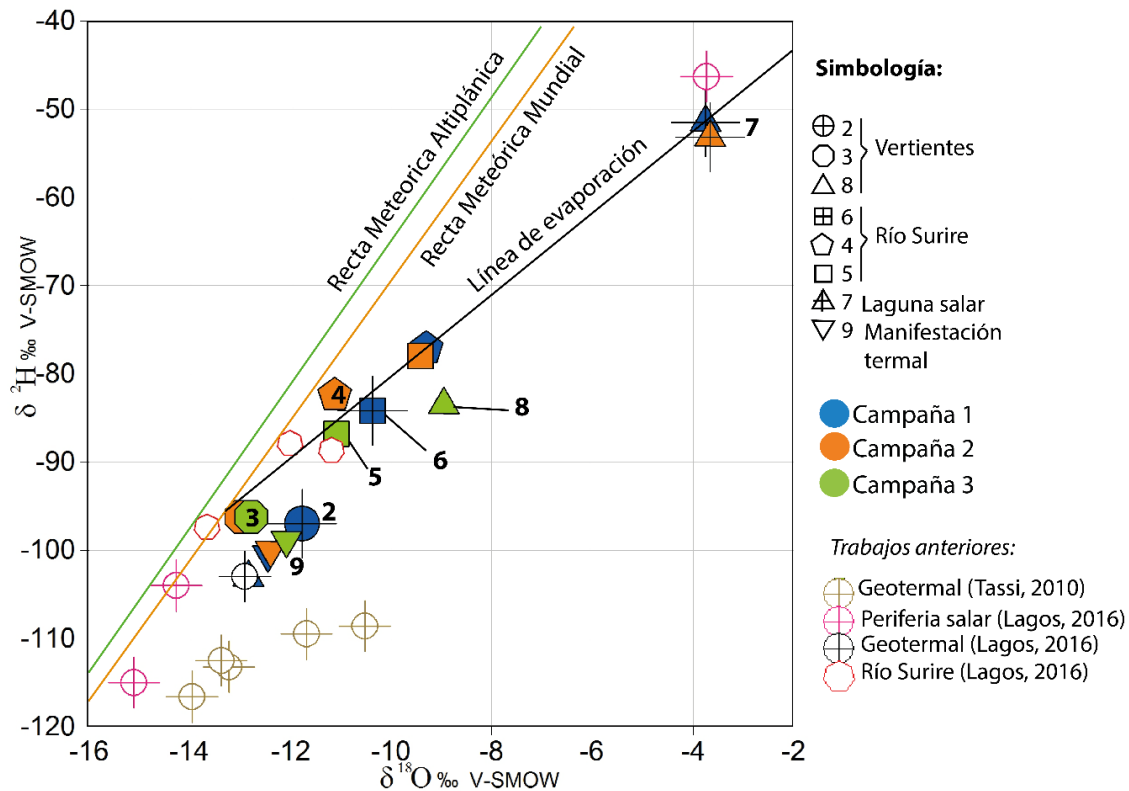
Esta recta es útil para compararla con las precipitaciones del Salar de Surire debido a la cercanía entre ambas cuencas y su similar altura. Las muestras con las rectas se figuran en la Figura 20.



**FIGURA 20: DIAGRAMA 2H VS 18O. LA RECTA METEÓRICA DEL LAGO CHUNGARÁ SE CONSIDERA REPRESENTATIVA DEL ALTIPLANO PARA USARSE COMO REFERENCIA EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. \*OBTENIDA DE HERRERA (2012).**

Los datos obtenidos en este estudio, se compararon con datos obtenidos de trabajos anteriores en la cuenca del Salar de Surire de Tassi (2010) y Lagos (2016), cuyas fechas de muestreo respectivas fueron octubre del 2005 y junio del 2013 (Figura 21). Las muestras de este estudio corresponden a noviembre del 2015 (azul), mayo del 2016 (naranja) y agosto del 2016 (verde).

Las muestras de estudios anteriores se asemejan solo en parte con las muestras obtenidas para este estudio. En primera instancia, se puede observar que los isótopos de la zona geotermal se encuentran empobrecidos en isótopos del 2005 con respecto a la medición del 2013 y de este estudio. Por otro lado, se corrobora el parentesco en la razón isotópica de la zona geotermal del 2013 con los obtenidos en este estudio.



**FIGURA 21: COMPARACIÓN DE LOS ANÁLISIS ISOTÓPICOS DE ESTE ESTUDIO CON LOS ANÁLISIS ISOTÓPICOS DE TRABAJOS ANTERIORES EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE.**

Como segundo punto de comparación, se observa que las muestras de Lagos (2016) presentan un comportamiento similar que difiere de las campañas de este estudio en un patrón concreto, el cual consiste en un contenido menor relativamente constante de isótopos pesados. Estas diferencias se pueden deber a variaciones en las precipitaciones de manera estacional o anual por diferencias de temperatura, abundancia y/o recorrido de las nubes que causaron la precipitación (Geyh, 2000). Este último factor en la zona de estudio puede deberse tanto a diferencias marcadas anuales (nubes del O en invierno (océano pacífico) y NE en verano (del amazonas en el invierno altiplánico)), como a diferencias específicas o puntuales. Finalmente, se corrobora que la muestra de la laguna del salar de Lagos (2016), su muestra más enriquecida en isótopos pesados, posee un porcentaje de evaporación similar al indicado en este estudio, aunque no cae sobre la línea de evaporación definida en este trabajo (punto 7).

En la Figura 20 se muestra el gráfico de isótopos del agua de las muestras de este estudio.

El punto 3, al estar sobre la recta RMM, se considera como agua meteórica, además es la muestra de menor mineralización de la zona. Desde este punto surge la línea de evaporación, que se aleja de la RMM con una pendiente positiva. Esta

línea muestra distintos porcentajes de evaporación que han sufrido las muestras, comenzando desde la RMM, por lo que asume que el origen de todas esas aguas ha sido meteórico.

En particular, las muestras 6, 4 y 5, correspondientes a la línea de flujo del río Surire, se encuentran sobre esta línea. La línea de flujo del río se corresponde positivamente con un mayor porcentaje de evaporación. Cabe destacar que las muestras que se tomaron tras periodos de precipitación presentan un menor porcentaje de evaporación. Es decir, el porcentaje de agua evaporada en periodos de sequía es mayor. El punto 7, que es un cuerpo lacustre menor sobre el salar, es el que presenta mayor porcentaje de evaporación.

El origen del agua del punto 9, donde se encuentran las manifestaciones termales, muestra una desviación de la recta, lo que indica que ha pasado por procesos que han alterado su razón isotópica.

Cercano a este punto se encuentra la muestra 2, de vertiente en el lado O de la cuenca. El tipo de agua de esta muestra es bicarbonatada sódica y posee una mineralización TSD= 199 mg/L, por lo que la hidrogeoquímica no hacía suponer un fraccionamiento isotópico.

La muestra 8 posee una diferencia anómala entre campañas. En la C1 se encuentra cercano a la muestra 9, mientras que en la C3 se encuentra enriquecida en elementos pesados, a la derecha de la línea de evaporación. Esta diferencia es probable que ocurra por errores en la medición, debido a que es raro encontrar, en una misma muestra, tales cambios isotópicos.

## PHREEQC

Se busca simular las aguas de la zona de estudio a partir de la interacción con fases minerales puras presentes en el sector con una muestra representativa de la posible recarga. El objetivo es evaluar el origen meteórico de las aguas, su interacción con la roca y qué minerales pueden ser los principalmente involucrados en el proceso.

### FASES MINERALES

Para encontrar las fases minerales a utilizar, se toma en consideración los dos tipos de litología principales de la zona: andesítica/dacítica y evaporítica. Se utiliza la base de datos llnl.dat dado que es la que contiene mayor cantidad de minerales de las litologías presentes en el área de estudio y considera datos termodinámicos para diferentes temperaturas.

Para representar la mineralogía de las rocas andesíticas y dacíticas, se desea incluir cuarzo  $\text{SiO}_2$ , plagioclasa albita  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  y anortita  $\text{CaAl}_2(\text{SiO}_4)_2$ , y minerales representantes de biotita, hornblenda y piroxeno (Figura 38 del anexo). El programa no permite modelar soluciones sólidas, sino solo sus miembros finales.

Las aguas muestreadas en este estudio poseen concentraciones muy bajas de Fe, usualmente bajo el límite de detección, por lo que minerales con este componente no se incluyeron en la modelación. En el grupo de los piroxenos, se consideraron la enstatita  $\text{MgSiO}_3$  (ortopiroxeno) y el diópsido  $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$  (clinopiroxeno).

Tanto la hornblenda como la biotita corresponden a soluciones sólidas cuyos miembros finales sin Fe no son comunes o estables en rocas volcánicas, por lo que tampoco se consideraron en la modelación.

Para ingresar la mineralogía de las rocas evaporitas se utilizan las concentraciones molares de este estudio considerando: halita ( $\text{NaCl}$ ), yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), epsomita ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) y calcita ( $\text{CaCO}_3$ ). Esta última, aunque presente en menor proporción, se considera dada su importancia en los sistemas evaporíticos. La thenardita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), a su vez, es un mineral reconocido en el ambiente de salar del altiplano andino (Chong, 2000; Igarzábal, 1991), y también se considerará en la modelación. Finalmente, el  $\text{K}^+$  tiende a mantenerse en solución si no es captado en el terreno por arcillas; es decir, no tiende a precipitar y formar evaporitas (Eugster, 1979), por lo que su influencia en evaporitas es menor. Sin embargo, de precipitar, se representará a través del mineral sylvita ( $\text{KCl}$ ).

## ÍNDICES DE SATURACIÓN

A partir de la composición de cada una de las muestras y de sus parámetros fisicoquímicos temperatura y pH, se han calculado los índices de saturación (Tabla 7) con respecto a los minerales considerados en las simulaciones.

**TABLA 6: ÍNDICES DE SATURACIÓN DE LAS MUESTRAS CON RESPECTO A LOS MINERALES REPRESENTATIVOS DE LA ZONA. SE OBTUVIERON A PARTIR DE LAS ESPECIES QUÍMICAS MAYORES, ESPECIES DE ALUMINIO Y SILICIO (SEGÚN EL CASO), EL PH Y LA TEMPERATURA.**

<b>Tabla IS</b>	Punto 2	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7	Punto 8	Punto 9
Albita	-	4,31	4,71	-	5,59	3,7	4,01
Diópsido	-	3,21	-1,98	-	-0,55	3,39	-2,77
Enstatita	-	0,66	-1,85	-	-1,08	0,75	-2,38
Cuarzo	-	1,47	1,4	-	1	0,66	1,18
Anortita	-	-0,2	-0,35	-	-0,64	-1,43	-1,43
Calcita	0,68	1,05	0,53	0,81	1,34	1,76	-0,03
Epsomita	-5,28	-4,47	-3,63	-5,28	-2,39	-4,57	-3,76
Yeso	-2,43	-1,9	-1,36	-2,8	-0,2	-2,05	-0,71
Halita	-7,9	-7,2	-6,54	-8,35	-2,07	-4,2	-4,32
Sylvita	-8,9	-7,14	-6,7	-8,31	-2,28	-4,55	-4,66
Thenardita	-8,53	-8,55	-7,06	-9,17	-2,32	-5,57	-4,87

## SIMULACIONES HIDROGEOQUÍMICAS

En esta memoria se han usado las simulaciones hidrogeoquímicas para reproducir la hidrogeoquímica de las muestras haciendo interactuar la muestra representativa de la recarga (Nº3) con las fases minerales consideradas para el área de estudio. En las fases minerales se considera el índice de saturación de la muestra final.

La muestra Nº3 se considera representativa de la recarga por su baja salinidad y de acuerdo a los datos del análisis isotópico.

El análisis se hace considerando las agrupaciones definidas anteriormente: (1) los puntos 2 y 6, (2) los puntos 4 y 5, (3) 8 y 9, y por último (4) el punto 7. El margen de error aceptado para decidir que un modelo se ajusta es de 10%. Todas las simulaciones se realizaron a la temperatura de cada muestra.

### **GRUPO (1)**

La muestra 2 corresponde a escorrentía superficial, que en teoría pasa por material no consolidado que sobreyace a la Fm. Lupica OMI(b). Este material corresponde a los depósitos Pf, cuyos clastos son de origen predominantemente

volcánico, de andesitas a riolitas. La muestra 6 corresponde a escorrentía superficial con afluentes que provienen de los depósitos glaciales Qg, que consiste en sedimento semi consolidado de litología principalmente volcánica. Éste sobreyace a lavas del volcán Guaiguasi, Mulluri y Chuquiananta.

La proveniencia de las especies disueltas de ambas muestras es posible que sea de (1) interacción agua/roca (con los depósitos ya descritos en el párrafo anterior), o (2) interacción con la salinidad característica de ambientes desérticos. Dado que no se poseen concentraciones de silicio de ambas muestras, no se pueden hacer simulaciones con minerales silicatados y no se puede evaluar directamente la proveniencia (1). Para evaluar (2), se consideran las evaporitas menos solubles en superficie: calcita, dolomita, y, a pesar de su menor solubilidad, el yeso.

### Muestra 2

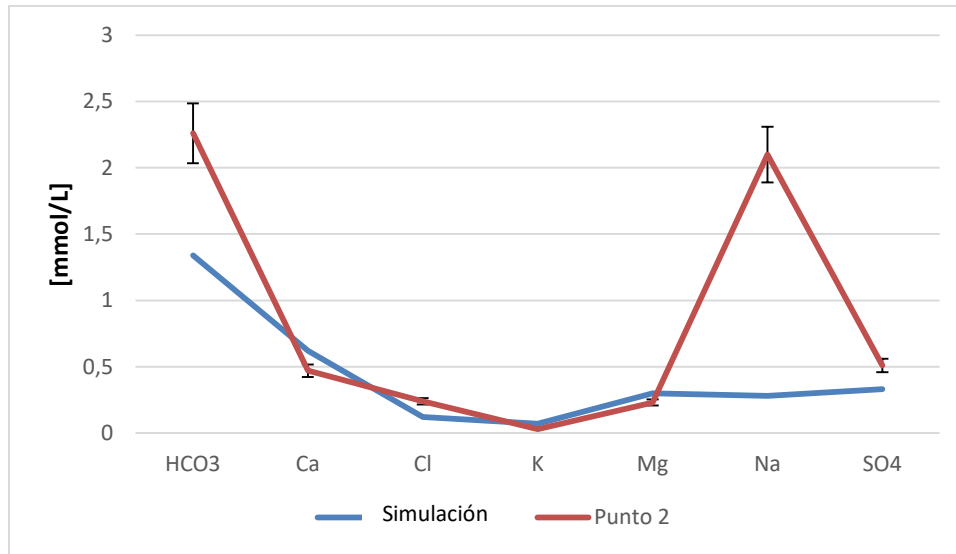
#### *Simulación (1), muestra 2*

La muestra 3 se ha hecho interactuar con las fases minerales calcita, dolomita y yeso. El resultado es el que aparece en la Tabla 8, donde se comparan los moles obtenidos de la simulación con los moles de la muestra 2.

Fases minerales consideradas: calcita, dolomita, yeso.

**TABLA 7: SIMULACIÓN N°1 MUESTRA 2.**

	Muestra 2 simulada [mmol/L]	Muestra 2 [mmol/L]
HCO <sub>3</sub>	1,34	2,26
Ca	0,62	0,47
Cl	0,12	0,24
K	0,07	0,03
Mg	0,3	0,23
Na	0,28	2,1
SO <sub>4</sub>	0,33	0,51



**FIGURA 22: SIMULACIÓN N°1 MUESTRA 2.**

Los resultados de la simulación, graficados en la Figura 22, indican que no se puede reproducir la concentración observada en la muestra N°2 con un error inferior al 10% (normalmente es el valor aceptado), dado que para Na<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y Cl<sup>-</sup> subestima la concentración y para Ca<sup>+2</sup> la sobreestima. Probablemente los minerales considerados no son la totalidad de los que participan en la hidrogeoquímica de la muestra N°2.

### Muestra 6

*Simulación (1) muestra 6:*

Solución inicial: muestra N°3

Fases minerales consideradas: calcita, dolomita, yeso.

En la tabla 9 se muestra el resultado de la simulación, donde se comparan los moles obtenidos de la simulación con los moles de la muestra 6.

**TABLA 8: SIMULACIÓN N°1 MUESTRA 6.**

	Muestra 6 simulado [mmol/L]	Muestra 6 [mmol/L]
HCO <sub>3</sub>	1,16	1,1
Ca	0,32	0,32
Cl	0,12	0,15
K	0,07	0,25
Mg	0,4	0,37
Na	0,28	0,24
SO <sub>4</sub>	0,24	0,31



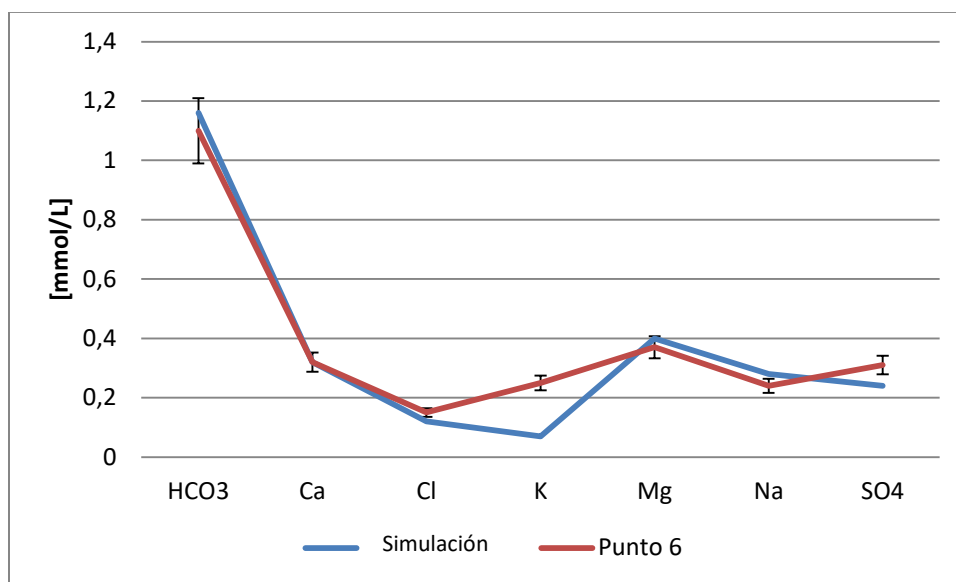


FIGURA 23: SIMULACIÓN N°1 MUESTRA 6.

Los resultados de la simulación, graficados en la Figura 23, indican que se puede reproducir la concentración observada en la muestra N°6 con un error inferior al 10% excepto para el K<sup>+</sup>, cuya concentración la simulación subestima. La muestra N°6 se puede reproducir utilizando sólo los minerales evaporíticos, haciendo suponer que el agua de esta muestra ha circulado principalmente por estos minerales.

### GRUPO (B)

Las muestras 4 y 5 se encuentran en la dirección principal del flujo que considera también la muestra N°6. La muestra 4, en particular, se encuentra en un bofedal.

#### Muestra 4:

##### *Simulación (1) muestra 4:*

En primera instancia, se evalúa la hidrogeoquímica de la muestra 4 a partir de su interacción con la roca y de someterse a evaporación. La muestra N°4 circula por los depósitos glaciales Qg, cuyos clastos son volcánicos, específicamente dacitas y riocitas.

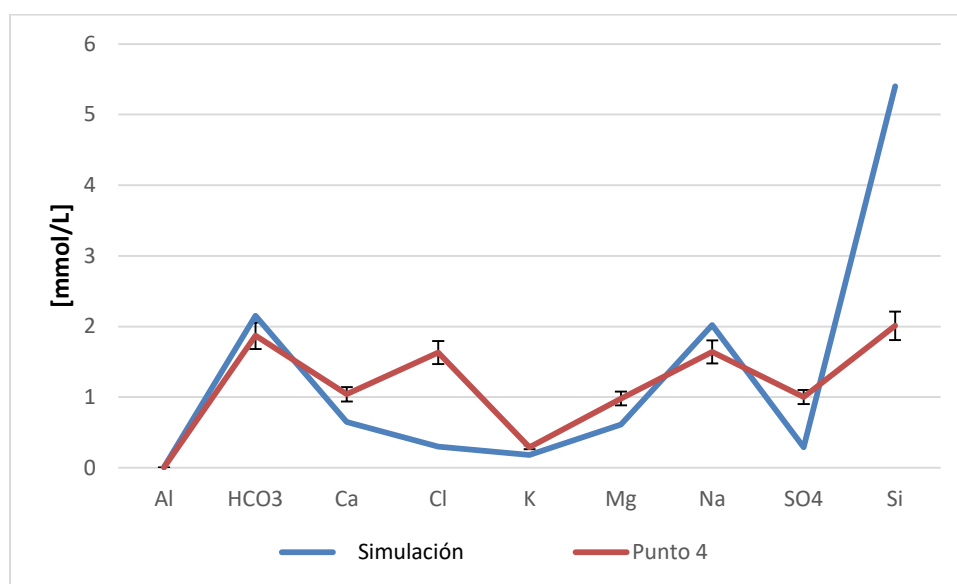
Solución inicial: muestra N°3

Fases minerales consideradas: albita, diópsido, hedenbergita, cuarzo.

En la tabla 10 se muestra el resultado de la simulación, donde se comparan los moles obtenidos de la simulación con los moles de la muestra 4. El porcentaje de evaporación que mejor se ajusta para simular los datos es de 60%.

**TABLA 9: SIMULACIÓN N°1 MUESTRA 4.**

	Muestra 4 simulada con 60% de evaporación [mmol/L]	Muestra 4 [mmol/L]
Al	0,01	0,003
HCO <sub>3</sub>	2,15	1,87
Ca	0,65	1,04
Cl	0,3	1,63
K	0,18	0,29
Mg	0,61	0,98
Na	2,02	1,64
SO <sub>4</sub>	0,29	1
Si	5,4	2,01



**FIGURA 24: SIMULACIÓN N°1 MUESTRA 4.**

Los resultados de la simulación, graficados en la Figura 24, indican que no se puede reproducir la concentración observada en la muestra N°4 con un error inferior al 10%, dado que para Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup> y SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> subestima la concentración y para NA y Si la sobrestima. Este punto no se puede explicar por estos procesos.

*Simulación (2), muestra 4:*

Se desea simular la muestra N°4 con interacción con roca volcánica, fases evaporíticas y un 10% de evaporación.

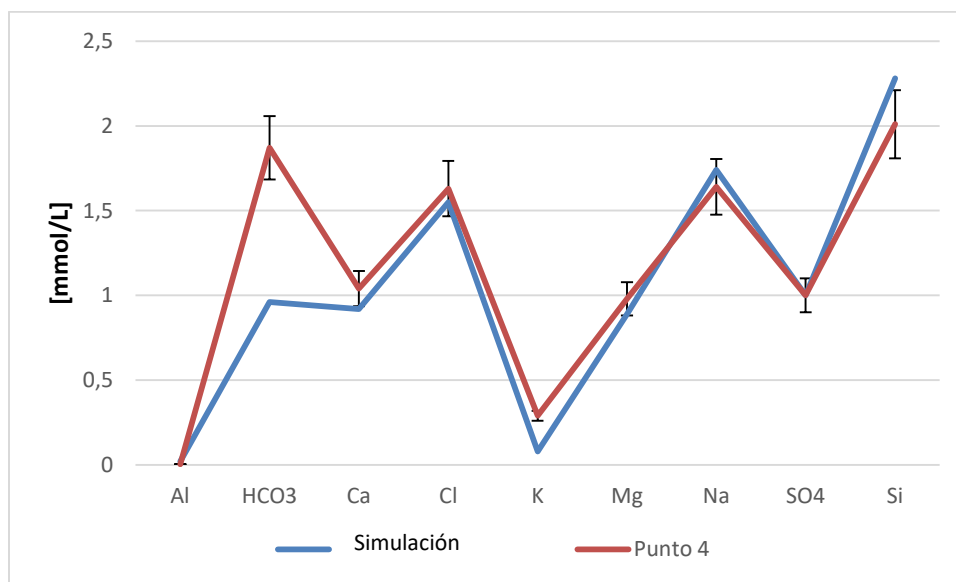
Solución inicial: muestra N°3

Fases minerales consideradas: calcita, dolomita, yeso, halita y fases volcánicas albita, diópsido, hedenbergita, cuarzo.

En la tabla 11 se muestra el resultado de la simulación, donde se comparan los moles obtenidos de la simulación con los moles de la muestra 4.

**TABLA 10: SIMULACIÓN N°2 MUESTRA 4.**

	Punto 4 simulado con 10% evaporación [mmol/L]	Punto 4 [mmol/L]
Al	0,02	0,003
HCO <sub>3</sub>	0,96	1,87
Ca	0,92	1,04
Cl	1,55	1,63
K	0,08	0,29
Mg	0,89	0,98
Na	1,74	1,64
SO <sub>4</sub>	1	1
Si	2,28	2,01
pH	9,3	9,2



**FIGURA 25: SIMULACIÓN N°2 MUESTRA 4.**

Los resultados de la simulación (Figura 25) indican que no se puede reproducir la concentración observada en la muestra N°4 con un error inferior al 10%, considerando que la simulación subestima la concentración de  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{K}^+$  y sobrestima la de Al y Si.

#### Simulación 3, muestra 4:

Se mantienen las mismas fases de la simulación anterior (Simulación 2, punto N°4). Sin embargo, esta vez la muestra N°4 se simula sin someter a la muestra a evaporación.

En la tabla 12 se muestra el resultado de la simulación, donde se comparan los moles obtenidos de la simulación con los moles de la muestra 4.

TABLA 11: SIMULACIÓN N°3 MUESTRA 4.

	Muestra 4 simulada [mmol/L]	Muestra 4 [mmol/L]
Al	0,003	0,003
$\text{HCO}_3$	1,21	1,87
Ca	0,94	1,04
Cl	1,56	1,63
K	0,007	0,29
Mg	0,91	0,98
Na	1,72	1,64
$\text{SO}_4$	0,96	1
Si	1,98	2,01

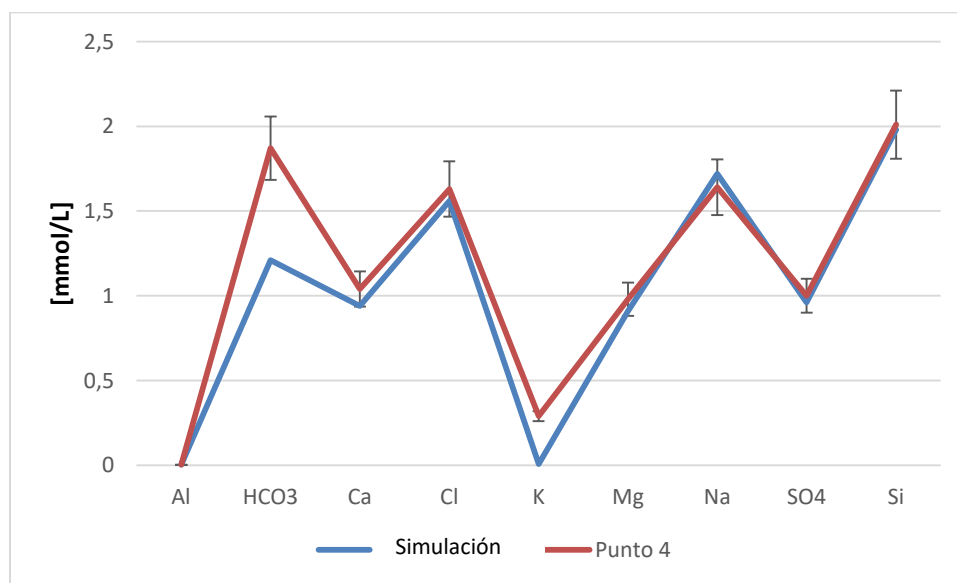


FIGURA 26: SIMULACIÓN N°3 MUESTRA 4.

Los resultados de la simulación (Figura 26) indican que se puede reproducir la concentración del punto N°4 con un error inferior al 10%. La diferencia de concentraciones del HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> se puede deber a la presencia de materia orgánica en el sector del bofedal. Las fases evaporíticas pueden encontrarse probablemente debido a la salinidad típica de ambientes desérticos. Esta simulación indica que el punto N°4 no ha pasado por procesos de evaporación.

**Muestra 5:**

El punto 5 se encuentra en la periferia del salar. En primera instancia, se evalúa la hidrogeoquímica de esta muestra a partir de su interacción con la roca y de someterse a evaporación.

*Simulación (1), muestra 5:*

Solución inicial: muestra N°3

Fases minerales consideradas: albita, dióxido, hedenbergita, cuarzo.

En la tabla 13 se muestra el resultado de la simulación, donde se comparan los moles obtenidos de la simulación con los moles de la muestra 5. El porcentaje de evaporación que mejor se ajusta para simular los datos es de 80%.

**TABLA 12: SIMULACIÓN N°1 MUESTRA 5.**

	Muestra 5 simulada con 80% evaporación [mmol/L]	Muestra 5 [mmol/L]
Al	0,07	0,003
HCO <sub>3</sub>	5,01	5,84
Ca	0,2	1,66
Cl	0,6	2,21
K	0,35	0,55
Mg	0,38	3,19
Na	5,09	5,91
SO <sub>4</sub>	0,61	3,46
Si	5,47	1,06

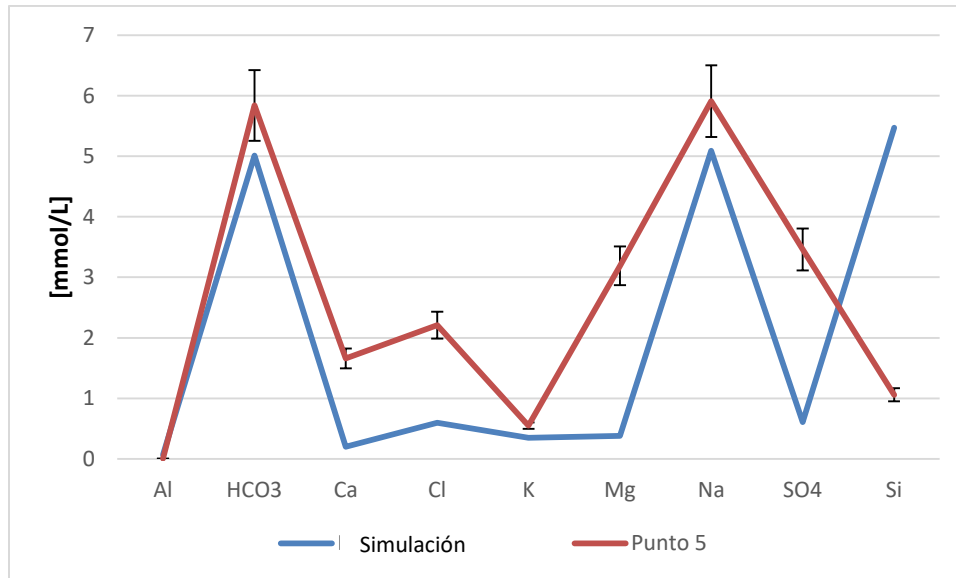


FIGURA 27: SIMULACIÓN N°1 MUESTRA 5.

Los resultados de la simulación (Figura 27) indican que no se puede reproducir la concentración observada en la muestra N°5 con un error inferior al 10%, al simular una interacción con roca volcánica y un cierto porcentaje de evaporación.

*Simulación (2), muestra 5:*

Se evalúa la hidrogeoquímica de la muestra N°5 a partir de interacción con la roca y las evaporitas del salar.

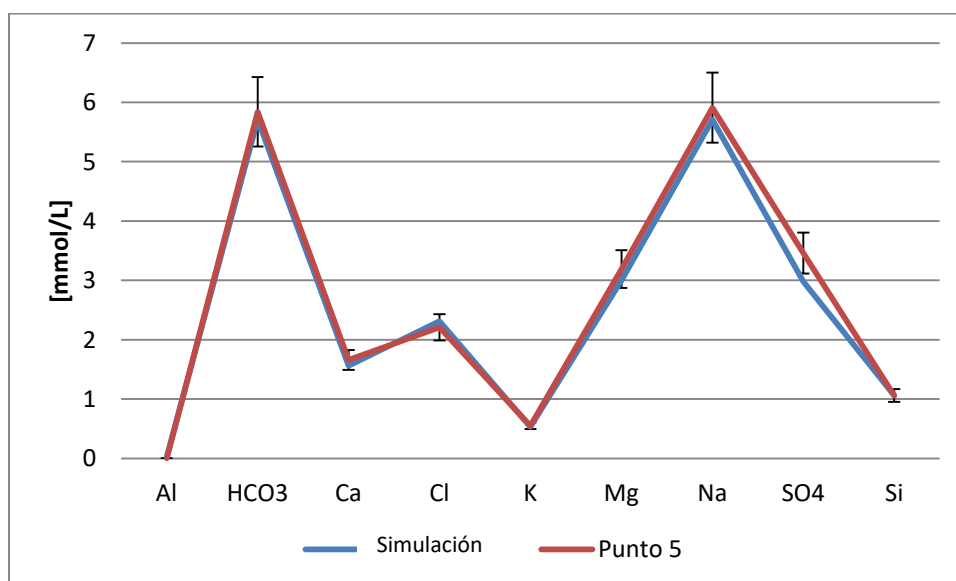
Solución inicial: muestra N°3

Fases minerales consideradas: albita, diópsido, hedenbergita, cuarzo y fases evaporíticas del salar.

En la tabla 14 se muestra el resultado de la simulación, donde se comparan los moles obtenidos de la simulación con los moles de la muestra 5.

**TABLA 13: SIMULACIÓN N°2 PUNTO 5.**

	Muestra 5 simulada [mmol/L]	Muestra 5 [mmol/L]
Al	0,03	0,003
HCO <sub>3</sub>	5,71	5,84
Ca	1,56	1,66
Cl	2,31	2,21
K	0,53	0,55
Mg	3	3,19
Na	5,71	5,91
SO <sub>4</sub>	2,98	3,46
Si	1,06	1,06



**FIGURA 28: SIMULACIÓN N°2 MUESTRA 5.**

Los resultados de la simulación (Figura 28) indican que se puede reproducir la concentración observada en la muestra N°5 con un error inferior al 10%. Esto sugiere que estas aguas han pasado por procesos de interacción agua-roca y disolución evaporítica.

*Simulación (3), muestra 5:*

Es posible que la hidrogeoquímica de la muestra 5 se pueda simular sólo con fases evaporíticas, y que, por lo tanto, su interacción con la roca sea despreciable.

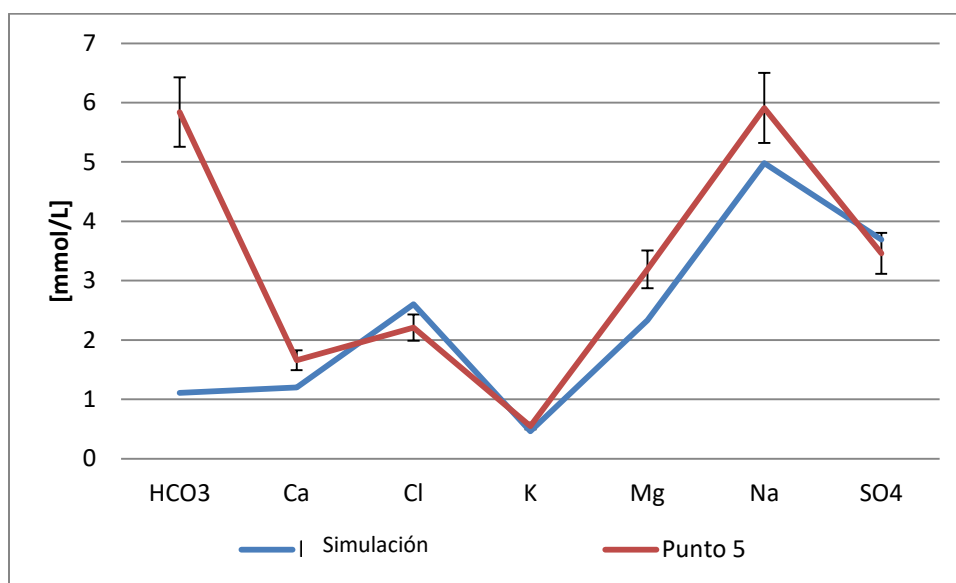
Solución inicial: muestra N°3

Fases minerales consideradas: fases evaporíticas del salar.

En la tabla 15 se muestra el resultado de la simulación, donde se comparan los moles obtenidos de la simulación con los moles de la muestra 5.

**TABLA 14: SIMULACIÓN N°3 MUESTRA 5.**

	Muestra 5 simulado [mmol/L]	Muestra 5 [mmol/L]
HCO <sub>3</sub>	1,11	5,84
Ca	1,2	1,66
Cl	2,6	2,21
K	0,46	0,55
Mg	2,33	3,19
Na	4,98	5,91
SO <sub>4</sub>	3,69	3,46



**FIGURA 29: SIMULACIÓN N°3 MUESTRA 5.**

Los resultados de la simulación (Figura 29) indican que no se puede reproducir la concentración observada en la muestra N°5 con un error inferior al 10%. Esto permite sugerir que la hidrogeoquímica de la muestra N°5 se simula a partir de la interacción tanto con roca volcánica como con las evaporitas del salar.

### **GRUPO (C)**

Los puntos 8 y 9 poseen cierta similitud en las concentraciones de sus elementos, lo que invita a evaluar si poseen procesos similares. En la zona de estudio, esto se divide en dos principales opciones: (1) ambos provienen de emanaciones termales, o (2) ambos son influenciados por las evaporitas del salar. La primera opción es poco viable debido a que, de provenir de emanaciones



termales, la temperatura y la concentración de sílice serían mayores, o habrían depósitos de sinter de sílice. Ninguno de estos es el caso.

### Muestra 9

Según las formaciones de la zona de estudio (Figura 7), el sistema hidrotermal ineteractúa con lavas y tobas andesíticas a riolíticas de los volcanes Chihuana, Corro y de la Fm. OMI(b). Es poco probable que existan niveles evaporíticos profundos; la única formación de la cuenca hidrográfica que posee evaporitas (particularmente calcita) es la Fm. Macusa, al otro extremo de la cuenca (aprox. 15 km.) las cuales se asocian a ambientes lacustres restringidos (García, y otros, 2004).

Si bien las emanaciones termales de este sistema indican temperaturas de reservorio superiores a los 100°C (Lagos, 2016; Cusicanqui, 1979; Tassi, 2010), no se tiene certeza si las aguas que se muestrearon en la muestra 9 formaron parte de él, por lo que para su simulación hidrogeoquímica se considera la temperatura de la muestra, 34°C.

*Simulación (1), muestra 9:*

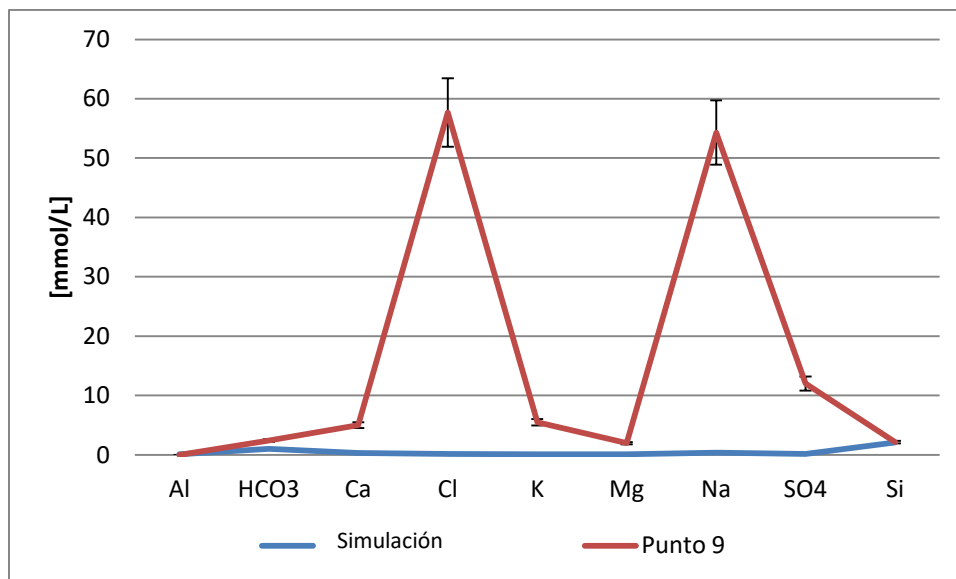
Solución inicial: muestra N°3

Fases minerales consideradas: albita, diópsido, hedenbergita, cuarzo.

En la tabla 16 se muestra el resultado de la simulación, donde se comparan los moles obtenidos de la simulación con los moles de la muestra 9.

**TABLA 15: SIMULACIÓN N°1 MUESTRA 9.**

	Muestra 9 simulado a 34°C [mmol/L]	Muestra 9 [mmol/L]
Al	0,09	0,001
HCO <sub>3</sub>	1	2,4
Ca	0,32	5
Cl	0,12	57,7
K	0,07	5,49
Mg	0,11	1,95
Na	0,37	54,3
SO <sub>4</sub>	0,12	12
Si	2,1	2,14



**FIGURA 30: SIMULACIÓN N°1 MUESTRA 9.**

Los resultados de la simulación, graficados en la Figura 30, indican que no se puede reproducir la concentración observada en la muestra N°9 con un error inferior al 10%, dado que la simulación subestima las concentraciones de la mayoría de las especies químicas.

*Simulación (2), muestra 9:*

Es posible que la hidrogeoquímica de la muestra 9 se pueda simular por interacción con las evaporitas del salar.

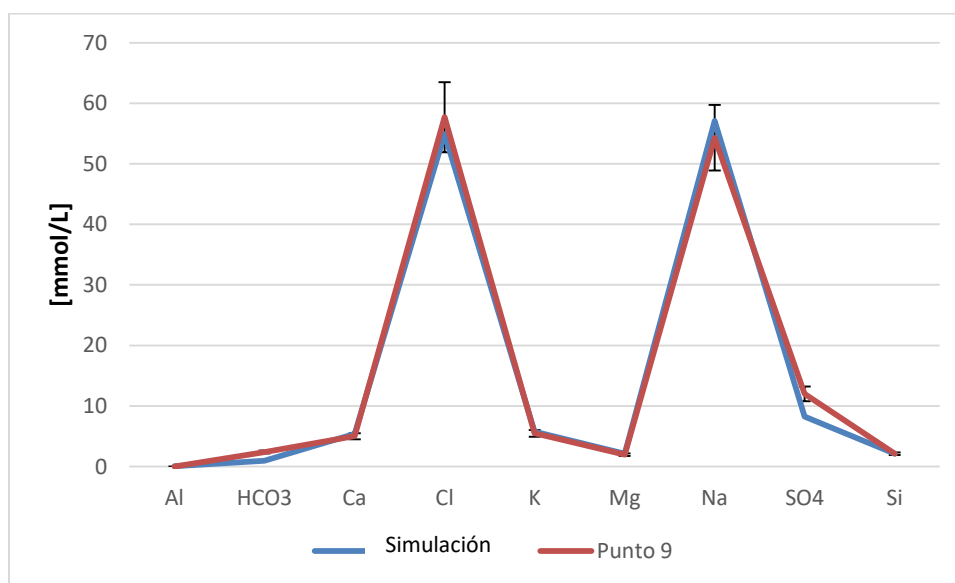
Solución inicial: muestra N°3

Fases minerales consideradas: albita, diópsido, hedenbergita, cuarzo y fases evaporíticas, a 34°C.

En la tabla 17 se muestra el resultado de la simulación, donde se comparan los moles obtenidos de la simulación con los moles de la muestra 9.

**TABLA 16: SIMULACIÓN N°2 MUESTRA 9.**

	Muestra 9 simulada [mmol/L]	Muestra 9 [mmol/L]
Al	0,05	0,001
HCO <sub>3</sub>	0,95	2,4
Ca	5,4	5
Cl	54,9	57,7
K	5,74	5,49
Mg	2,1	1,95
Na	57,1	54,3
SO <sub>4</sub>	8,23	12
Si	2,1	2,14



**FIGURA 31: SIMULACIÓN N°2 MUESTRA 9.**

Los resultados de la simulación, graficados en la Figura 31, indican que se puede reproducir la concentración observada en la muestra N°9 con un error inferior al 10%. La simulación subestima las concentraciones de SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>.

Esto permite sugerir que la interacción agua-roca en el sistema no es un proceso dominante para la hidrogeoquímica de la muestra 9; en cambio, su hidrogeoquímica se puede simular por procesos de disolución evaporítica. Cabe destacar que, de pertenecer al sistema geotermal, la hidrogeoquímica del punto 9 también se podría explicar por un proceso de mezcla de aguas con el nivel freático del salar.

### Muestra 8:

La muestra 8 se encuentra en la periferia del costado este del salar. En primera instancia, se evalúa la hidrogeoquímica de esta muestra a partir de su interacción con la roca y de someterse a evaporación.

### *Simulación (1), muestra 8:*

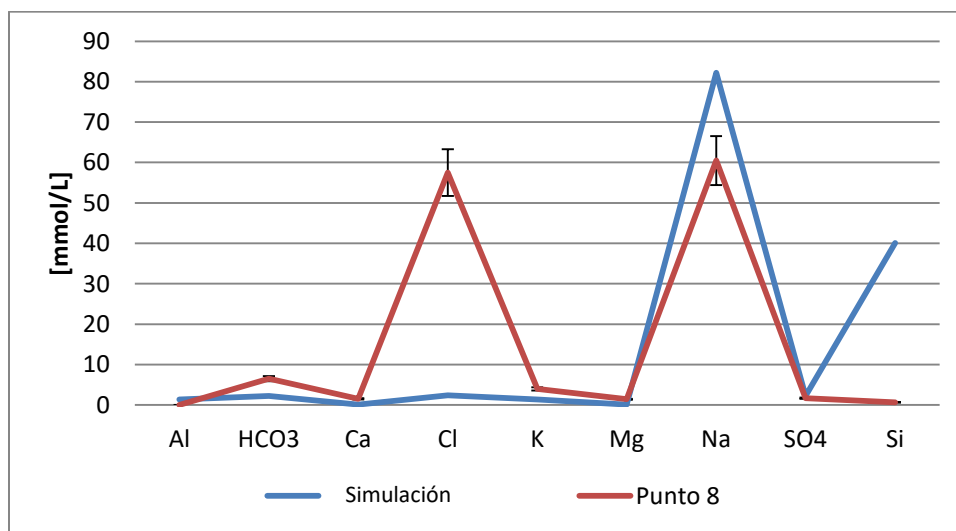
Solución inicial: muestra N°3

Fases minerales consideradas: albita, anortita, dióxido, hedenbergita, cuarzo.

En la tabla 20 se muestra el resultado de la simulación, donde se comparan los moles obtenidos de la simulación con los moles de la muestra 8. El porcentaje de evaporación que mejor se ajusta para simular los datos es de 95%.

**TABLA 17: SIMULACIÓN N°1 MUESTRA 8.**

	Muestra 8 simulada con 95% evaporación [mmol/L]	Muestra 8 [mmol/L]
Al	1,37	0,006
HCO <sub>3</sub>	2,25	6,5
Ca	0,14	1,53
Cl	2,38	57,5
K	1,39	3,95
Mg	0,12	1,42
Na	82,2	60,5
SO <sub>4</sub>	2,24	1,67
Si	40,1	0,66



**FIGURA 32: SIMULACIÓN N°1 MUESTRA 8.**

Los resultados de la simulación, graficados en la Figura 33, indican que no se puede reproducir la concentración observada en la muestra N°8 con un error inferior al 10%, al simular una interacción con roca volcánica y un 95% de evaporación.

*Simulación (2), muestra 8:*

Se evalúa la hidrogeoquímica de la muestra N°8 a partir de interacción con la roca y las evaporitas del salar.

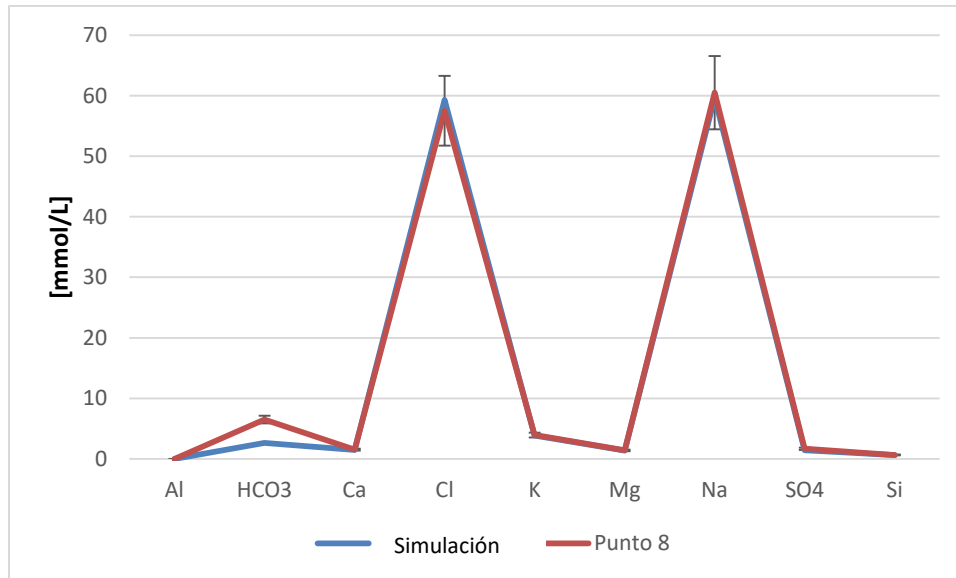
Solución inicial: muestra N°3

Fases minerales consideradas: albita, anortita, diópsido, hedenbergita, cuarzo y fases evaporíticas del salar.

En la tabla 21 se muestra el resultado de la simulación, donde se comparan los moles obtenidos de la simulación con los moles de la muestra 8.

**TABLA 18: SIMULACIÓN N°2 MUESTRA 8.**

	Muestra 8 simulada [mmol/L]	Muestra 8 [mmol/L]
Al	0,006	0,006
HCO <sub>3</sub>	2,62	6,5
Ca	1,5	1,53
Cl	59,3	57,5
K	3,87	3,95
Mg	1,38	1,42
Na	59,7	60,5
SO <sub>4</sub>	1,41	1,67
Si	0,66	0,66



**FIGURA 33: SIMULACIÓN N° 2 MUESTRA 8.**

Los resultados de la simulación (Figura 34), indican que se puede reproducir la concentración observada en la muestra N°8 con un error inferior al 10%. Esto sugiere que estas aguas han pasado por procesos de interacción agua-roca y disolución evaporítica.

*Simulación (3), muestra 8:*

Se procede a realizar una simulación con interacción con las fases evaporíticas del salar. A partir de esto, se evalúa si la hidrogeoquímica de la interacción agua-roca es relevante.

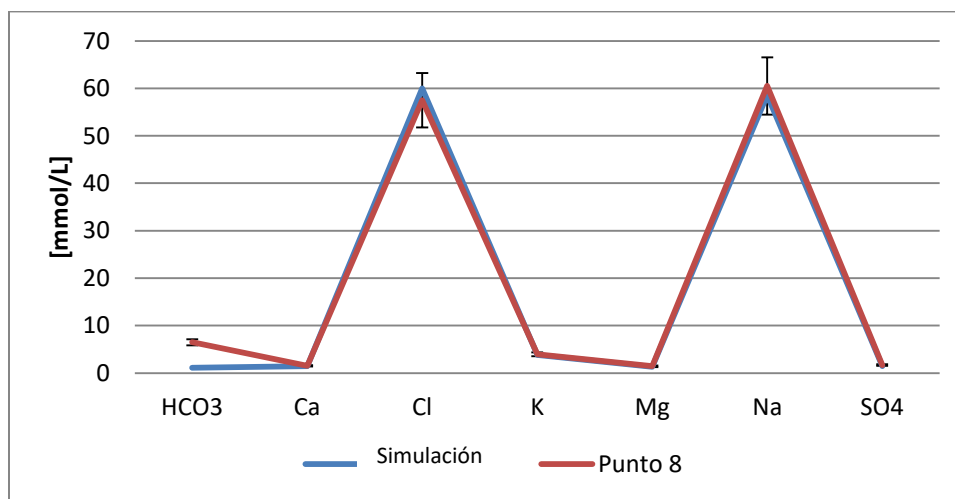
Solución inicial: muestra N°3

Fases minerales consideradas: fases evaporíticas del salar.

En la tabla 22 se muestra el resultado de la simulación, donde se comparan los moles obtenidos de la simulación con los moles de la muestra 8.

**TABLA 19: SIMULACIÓN N°3 MUESTRA 8.**

	Muestra 8 simulado [mmol/L]	Muestra 8 [mmol/L]
HCO <sub>3</sub>	1,13	6,5
Ca	1,46	1,53
Cl	60	57,5
K	3,82	3,95
Mg	1,35	1,42
Na	58,6	60,5
SO <sub>4</sub>	1,43	1,67



**FIGURA 34: SIMULACIÓN N°3 MUESTRA 8.**

Los resultados de la simulación (Figura 35) indican que se puede reproducir la concentración observada en la muestra N°8 con un error inferior al 10%. En efecto, el gráfico es similar al obtenido en la Figura 34. Se sugiere que la hidrogeoquímica del punto 8 se debe principalmente a disolución evaporítica.

Se establece que la similitud de los puntos 8 y 9 se debe a que en ambos predomina el proceso de disolución evaporítica.

### Muestra 7:

La muestra 7 no se encuentra asociada a un grupo hidroquímico debido a las diferentes concentraciones que posee con el resto de las muestras. La primera simulación que se realiza es para evaluar la hidrogeoquímica de esta muestra a partir de su interacción con la roca y de someterse a evaporación.

*Simulación (1), muestra 7:*

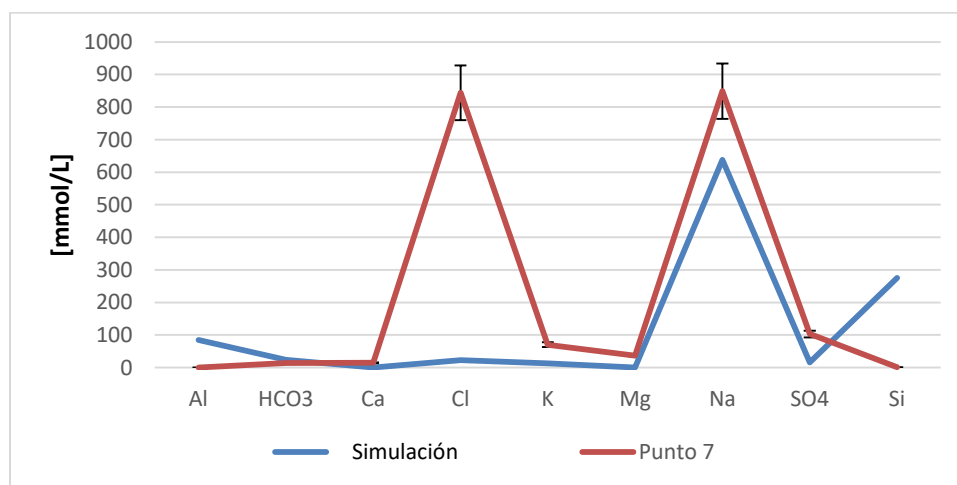
Solución inicial: muestra N°3

Fases minerales consideradas: albita, anortita, diópsido, hedenbergita y cuarzo.

En la tabla 23 se muestra el resultado de la simulación, donde se comparan los moles obtenidos de la simulación con los moles de la muestra 7. El porcentaje de evaporación que mejor se ajusta para simular los datos es de 99,5%.

**TABLA 20: SIMULACIÓN N°1 MUESTRA 7.**

	Muestra 7 simulada con 99,5% evaporación [mmol/L]	Muestra 7 [mmol/L]
Al	85	0,008
HCO <sub>3</sub>	23,6	13,62
Ca	0,03	14,55
Cl	22,1	844
K	12,9	70,2
Mg	0,07	36,6
Na	638	849
SO <sub>4</sub>	16,1	103
Si	275	0,52



**FIGURA 35: SIMULACIÓN N°1 MUESTRA 7.**

Los resultados de la simulación (Figura 36) indican que no se puede reproducir la concentración observada en la muestra N°4 con un error inferior al 10%. La muestra N°7 no se simula con los procesos de interacción agua-roca y evaporación.

*Simulación (2), muestra 7:*

Solución inicial: muestra N°3

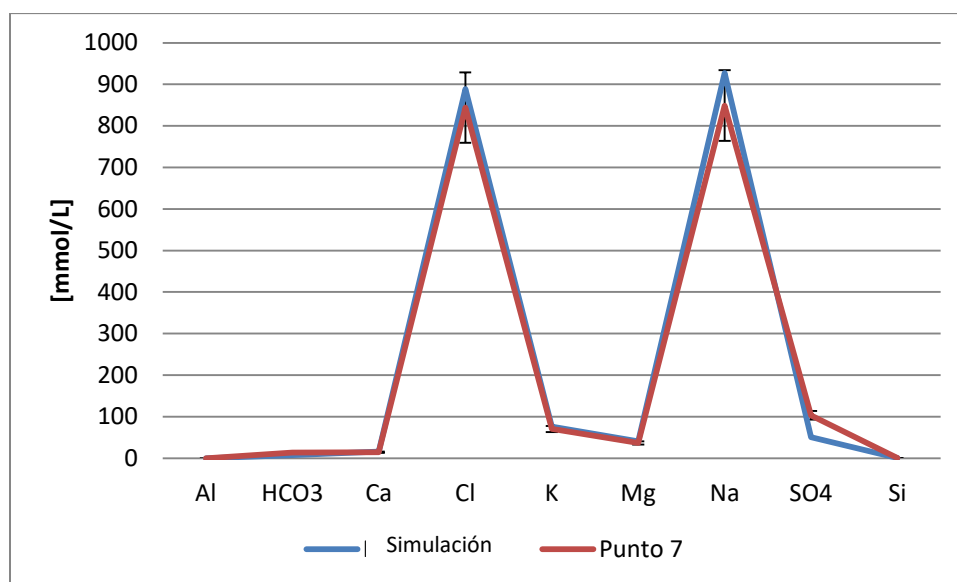


Fases minerales consideradas: albita, anortita, diópsido, hedenbergita, cuarzo y fases evaporíticas del salar.

En la tabla 24 se muestra el resultado de la simulación, donde se comparan los moles obtenidos de la simulación con los moles de la muestra 7.

**TABLA 21: SIMULACIÓN N°2 MUESTRA 7.**

	Muestra 7 simulado [mmol/L]	Muestra 7 [mmol/L]
Al	0,009	0,008
HCO <sub>3</sub>	7,03	13,62
Ca	16,1	14,55
Cl	889	844
K	76	70,2
Mg	40,4	36,6
Na	927	849
SO <sub>4</sub> -	50,4	103
Si	0,56	0,52



**FIGURA 36: SIMULACIÓN N°2 MUESTRA 7.**

Los resultados de la simulación (Figura 37), indican que se puede reproducir la concentración observada en la muestra N°8 con un error inferior al 10%. Esto sugiere que estas aguas han pasado por procesos de interacción agua-roca y disolución evaporítica.

## CONCLUSIONES DE PHREEQC

En primera instancia, se establece que todas las muestras de la cuenca del salar se pueden explicar por un origen meteórico y una interacción con minerales de la cuenca.

A las muestras 5, 8 y 7 se le puede simular su hidrogeoquímica a través de procesos de interacción agua-roca y de disolución evaporítica, provenientes del salar. Por lo tanto, estos son los principales procesos por los que pueden haber pasado.

Según esta simulación, el agua no ha sufrido evaporación, sino que disuelve las evaporitas ya existentes y de esta manera adquiere la concentración de iones. Sin embargo, el análisis isotópico registra evaporación para las muestras 6, 4, 5 y 7. Las condiciones generales del clima en la zona de estudio, donde destaca la aridez en la mayor parte del año, propician la evaporación. La contradicción se podría explicar por la posibilidad de que la huella hidroquímica de la evaporación en las lagunas del salar o en sus principales afluentes no se conserve en el tiempo, debido a la naturaleza altamente reactiva de las evaporitas, donde se alteran diagenéticamente de manera constante (Warren, 2006), 'renovándose' su composición.

Las muestras 2 y 6 se simularon con el contenido evaporítico que se espera de ambientes desérticos. La interacción agua-roca en el punto 6 es secundaria debido a que casi todos los elementos químicos se pueden reproducir solo por disolución evaporítica. La interacción agua-roca en el punto 2 posiblemente es primaria, dado que no se puede reproducir su química correctamente con las evaporitas.

La simulación de la muestra 4 indica que es posible que exista interacción agua-roca, disolución evaporítica, y probablemente interactúa con materia orgánica.

Finalmente, se establece que la muestra 9 se simula con interacción agua-roca y disolución evaporítica. El contenido evaporítico puede haber sido adquirido tanto por disolución evaporítica en superficie como por mezcla de aguas con el nivel freático del salar.

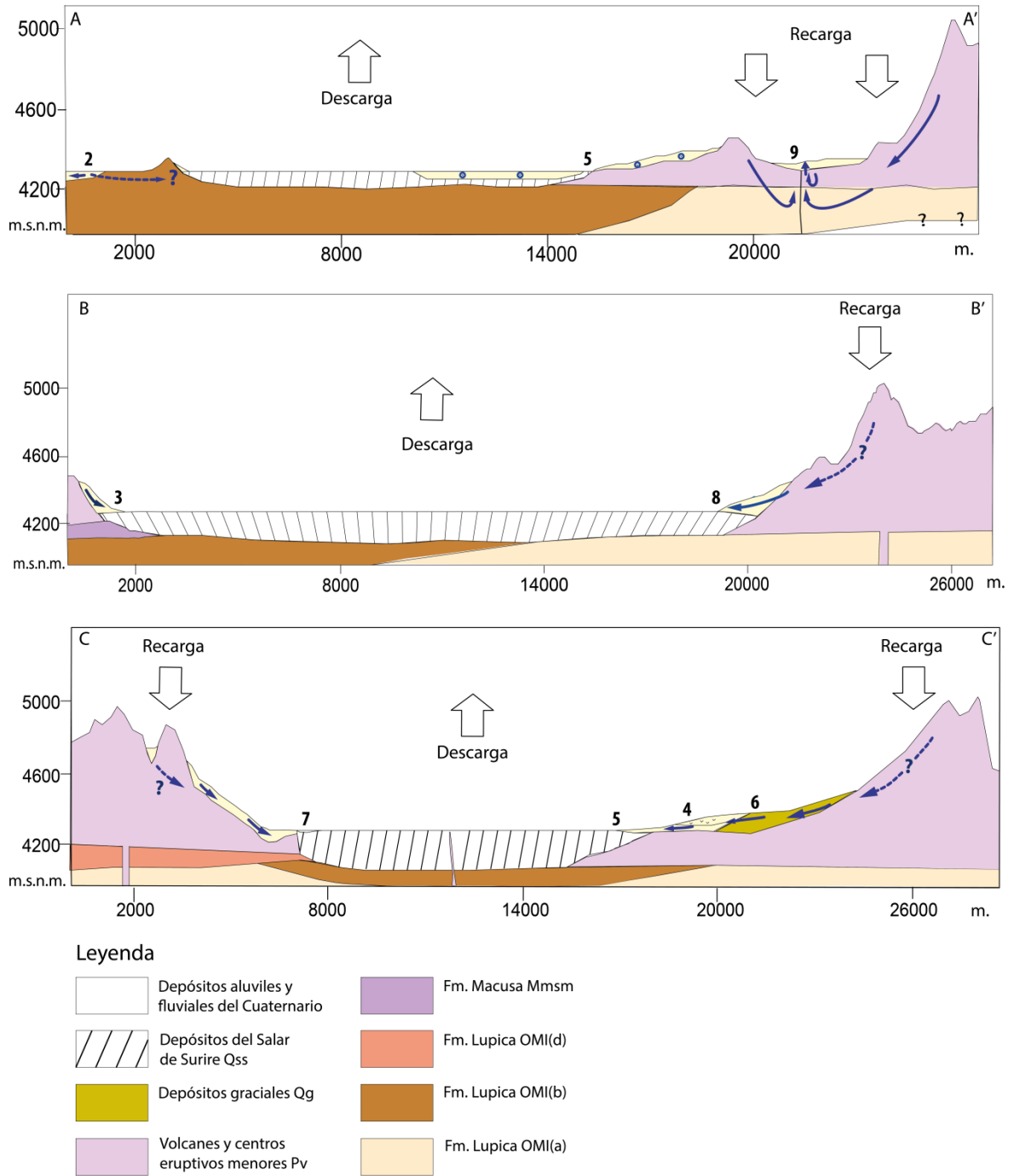
Una limitación de esta simulación fue no poseer la mineralogía exacta de la roca caja, teniendo que utilizar la característica del tipo de litología de las formaciones (Figura 38). Otra limitante fue no poseer en la base de datos lnl.dat minerales típicos de andesitas y dacitas como biotita y hornblenda.

## ESQUEMA DE CIRCULACIÓN

El esquema de circulación se realiza considerando los perfiles estructurales esquemáticos realizados en este estudio (Figura 7). A su vez, la integración de la definición preliminar de unidades hidrogeológicas realizada a partir de trabajos anteriores (Tabla 2) con la interpretación hidrogeoquímica realizada, permite esbozar un esquema de circulación en la cuenca del Salar de Surire.

En primera instancia, se sugiere que los depósitos aluviales y fluviales (Pa, Ha) tienen capacidad de almacenamiento y transporte de agua, es decir, poseen capacidad acuífera, al igual que la Formación OMI(b), si bien es probable que esta última posea menor capacidad acuífera. Los depósitos glaciales, en cambio, podrían poseer una baja capacidad acuífera. A su vez, se desconoce si los volcanes y centros eruptivos menores Pv poseen capacidad acuífera; es probable que existan zonas donde ciertas discontinuidades permitan acuíferos colgados, zonas donde sea un macizo principalmente impermeable, y/o zonas donde existan fracturas que permitan formar un acuífero fracturado libre. La Formación Macusa también es incierta en el grado de su capacidad acuífera, aunque no se descarta la posibilidad de que posea cierta capacidad de almacenamiento y transporte de agua. Finalmente, con respecto a los depósitos salinos de la base de la cuenca Qss, es probable que posean capacidad acuífera por porosidad. Si bien procesos de disolución pueden formar cavidades, no hay estudios al respecto.

En base a esta definición, se realizó un esquema de circulación de la zona, presentado en la Figura 37.



**FIGURA 37: ESQUEMA DE CIRCULACIÓN PARA LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. LAS LÍNEAS DE LOS PERFILES SE ENCUENTRAN EN LA FIG. 8.**

## CALIDAD DE LAS AGUAS

La calidad de las aguas en este estudio se aborda desde la hidroquímica de elementos mayores, ciertas especies menores, y parámetros fisicoquímicos. Otras sustancias que las normas nacionales para la calidad del agua consideran, en especial de origen antrópico (sustancias orgánicas como el tolueno y benceno, plaguicidas, productos secundarios de la desinfección, entre otros), no se analizaron. Sin embargo, es probable que no se presenten en la zona debido a que su población, principalmente flotante de 10-20 personas, utiliza las tierras para ganado (CONAF, 2000). También recibe cerca de 600 turistas por año que van por el día. Se encuentra la minera Quiborax que extrae boratos del salar, pero que, según su plan de manejo (Centro de Ecología Aplicada, 2009), no se asocia a cambios significativos en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas.

Dos usos importantes del agua para la XV región son el sanitario, para suministro para la población, y de riego, dado que la agricultura es la principal actividad económica de la región. Chile norma la calidad de agua potable en la norma chilena NCh409 (Tabla 27), y la calidad de agua para riego en la norma chilena NCh1333 (Tabla 26). Para el análisis de agua potable, se decidió considerar también el boro, que la norma chilena no considera y es considerado en las recomendaciones de la OMS (organización Mundial de la Salud), debido a los valores de boratos medidos en el área de estudio.

De la comparación entre los puntos de muestreo y la NCh409 (Tabla 27), se observa que las muestras 7, 8 y 9 no cumplen con la norma debido a sus altos niveles en sólidos disueltos. Además, las concentraciones de sulfato, cloruro, magnesio, fluoruro y/o arsénico también exceden la norma.

El resto de los puntos de muestreo (2, 3, 4, 5, 6) no cumplen la norma de agua potable por sus valores de pH y/o por las concentraciones de arsénico. Las concentraciones de arsénico medidas en las muestras se asocian a los procesos de interacción agua-roca, ya que este elemento se encuentra en trazas en la composición de las rocas volcánicas. El punto 3 es el que posee las concentraciones de arsénico más bajas.

La exposición prolongada al arsénico en el agua potable se relaciona con riesgos de cáncer a la piel, pulmones y vejiga, junto con otras enfermedades a la piel. Estas últimas son las más comúnmente encontradas tras periodos de exposición de mínimo 5 años (OMS, 2011).

En la comparación entre los puntos de muestreo y la NCh1333 (Tabla 26), se observa que los puntos 7, 8 y 9 no cumplen la norma de riego debido a las

concentraciones de arsénico, boro, cloruro, fluoruro, litio, sodio porcentual y/o sulfato.

Los puntos 2, 4, 5 y 6, no cumplen la norma de riego por los valores de pH y/o los contenidos de arsénico, boro, sodio porcentual y/o sulfato.

El punto 3 posee una calidad de interés para riego, dado que en la campaña de agosto del 2016 presenta una calidad aceptable, cumpliendo con todos los parámetros, y en la campaña de abril del 2016 el único parámetro que no cumple es el boro, que se encuentra ligeramente sobre el límite fijado.

Finalmente, se concluye que los recursos hídricos del Salar de Surire, según los datos que se muestrearon para este estudio, no poseen una buena calidad para su uso, tanto sanitario como de riego. Existe un punto de interés para uso como agua de riego, el punto 3, aunque se debería controlar más frecuentemente para determinar si los valores cumplen en su totalidad la norma establecida.

TABLA 22: NORMA CHILENA DE CALIDAD DE AGUA PARA EL RIEGO NCH 1333. OTROS ELEMENTOS INCLUIDOS EN LA NORMA PERO SE QUE ENCUENTRAN BAJO EL LÍMITE DE DETECCIÓN EN LA ZONA SON CADMIO, CIANURO, COBRE, HIERRO, PLOMO, MANGANESO, MERCURIO, PLOMO, SELENCIO, ZINC. EN ROJO LOS VALORES QUE NO CUMPLEN CON LA NORMA.

NCh1333		C1						C2					C3			
Componente	mg/L	2	4	6	7	8	9	3	4	5	7	9	3	5	8	9
Aluminio	5	-	-	-	-	-	-	0,4	0,09	0,09	0,21	0,04	-	-	-	-
Arsénico	0,1	0,012	0,43	0,06	1	73	53	0,01	0,18	1,35	50,9	0,9	0,009	1,05	0,76	0,79
Boro	0,75	-	-	-	-	-	-	0,8	1,5	2,9	129	32,7	0,27	2,43	30	42,5
Cloruro	200	8	74	5	26058	1038	1766	4,3	56,9	99	29548	2006	5,3	77,2	2011	2018
Fluoruro	1	0,13	0,27	0,32	0,45	0,59	18	0,08	0,17	0,38	2	1,38	0,006	0,1	0,37	0,58
Litio	2,5	<0,1	0,2	<0,1	110	5,8	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sodio porcentual*	35%	60	27	43	84	80	73	24	28	38	83	74	23	37	86	74
Sulfato	250	49,4	112	29,8	8686	166	1049	12,6	95,8	454	9927	1163	9,5	332	160	1152
pH	5,5 - 9	8,9	9,3	9,5	8,4	8,7	6,5	-	-	-	-	-	5,6	8	9,8	7,2

TABLA 23: NORMA CHILENA DE AGUA POTABLE NCH 409. OTROS ELEMENTOS INCLUIDOS EN LA NORMA PERO SE QUE ENCUENTRAN BAJO EL LÍMITE DE DETECCIÓN EN LA ZONA SON CADMIO, CIANURO, COBRE, CROMO, HIERRO, MANGANESO, MERCURIO, NITRITOS, PLOMO, SELENIO, ZINC. EN ROSADO LOS VALORES QUE NO CUMPLEN CON LA NORMA.

NCh409		C1						C2					C3			
Componente	mg/L	2	4	6	7	8	9	3	4	5	7	9	3	5	8	9
Arsénico (As)-	0,01	0,012	0,43	0,06	1	73	53	0,01	0,18	1,35	50,9	0,9	0,009	1,05	0,76	0,79
Boro	OMS: 2,4	-	-	-	-	-	-	0,8	1,5	2,9	129	32,7	0,27	2,43	30	42,5
Fluoruro (F <sup>-</sup> )	1,5	0,13	0,27	0,32	0,45	0,59	18	0,08	0,17	0,38	2	1,38	0,006	0,1	0,37	0,58
Magnesio	125	1,8	37,7	8,92	752	18	50,8	4	23,4	75,8	879	43,6	4,7	76,4	34,1	46,7
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	50	0,4	0,4	0,4	0,14	5	0,03	0,5	0,5	<0,05	<0,05	<0,05	0,3	0,6	3,1	3,6
Cloruro (Cl <sup>-</sup> )	400	8	74	5	26058	1038	1766	4,3	56,9	99	29548	2006	5,3	77,2	2011	2018
pH	6,5-8,5	8,9	9,3	9,5	8,4	8,7	6,5	-	-	-	-	-	5,6	8	9,8	7,2
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> )	500	49,4	112	29,8	8686	166	1049	12,6	95,8	454	9927	1163	9,5	332	160	1152
SDT*	1500	199	452	147	45800	2500	4730	-	-	-	-	-	70,5	688	3540	3850

## CONCLUSIONES

La escasez hídrica de la XV Región de Arica y Parinacota y el aumento de la demanda del agua hacen necesario generar información relativa a los recursos hídricos de sus cuencas hidrográficas. En la presente memoria se han analizado los recursos hídricos de la cuenca altiplánica del Salar de Surire.

Las aguas en su mayoría son clasificadas como termales. Presentan un tipo hidrogeoquímico que varía desde cálcico-magnésico sódico a clorurado sódico, con un aumento progresivo de TSD hacia el salar. La relación del cloruro con otros elementos mayores ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{SO}_4^{+2}$ ) es directa y próxima a las relaciones estequiométricas de los minerales presentes en el área de estudio, indicando que los iones presentan un origen en común. Así, se ha determinado que la fuente más probable para  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  sea de disolución de halita.

Se sugiere la presencia de procesos de disolución de carbonatos y sulfatos de calcio y magnesio. Algunas muestras (9, 7) presentan un exceso de  $\text{SO}_4$  con respecto a los cationes analizados y, para estos casos se considera la posibilidad de un aporte de sulfato debido a la interacción agua-roca y/o a partir de los gases de manifestaciones termales. En las zonas lejanas al salar, es posible que exista una mayor participación de carbonatos, por el carácter bicarbonatado de algunas aguas, ya que la calcita es un mineral presente los sedimentos de ambientes desérticos.

En la zona de estudio las concentraciones de silicio se relacionan con la temperatura, lo que sugiere que se adquiere por procesos de interacción agua/roca. En la muestra 9 de manifestación termal existe una mayor concentración de sílice, y a su vez es la zona de mayor temperatura ( $35^\circ\text{C}$ ). Con la información disponible no se puede determinar ni descartar la circulación profunda a través del sistema de fracturas del sistema geotermal presente.

Los datos isotópicos de  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  indican que las aguas estudiadas presentan procesos de evaporación en diferentes grados. En particular, la muestra N°3 cae en la línea que representa las precipitaciones actuales, indicando la presencia de una recarga actual. A lo largo de la línea de flujo del río Surire (muestras 6, 4, 5) y en la laguna del salar (muestra 7) existen distintos porcentajes de evaporación. El punto 9, próximo al sector hidrotermal, presenta un leve enriquecimiento en  $\delta^{18}\text{O}$ .

Las simulaciones hidrogeoquímicas realizadas permiten reproducir la variedad hidrogeoquímica de las muestras, considerando la muestra N°3 como representativa de la recarga, y añadiendo diferentes minerales para considerar los diferentes procesos de interacción del agua con las litologías presentes. La mineralogía considerada para estas simulaciones procede de trabajos anteriores en



los cuales se describen las litologías de la cuenca. Todas las muestras se pudieron simular excepto la 2, indicando que es posible explicar la variedad de composiciones químicas a partir de un proceso de recarga actual.

Las muestras 5, 7 y 8 se reprodujeron considerando los procesos de interacción agua-roca y disolución evaporítica. La muestra 4, obtenida de un bofedal, se simuló considerando la interacción agua-roca y la disolución evaporítica. Sin embargo, los valores de bicarbonatos no se lograron ajustar probablemente porque el exceso de este elemento es debido a la presencia de materia orgánica, que no ha sido considerada en las simulaciones.

Integrando todos los resultados, y considerando los trabajos previos realizados, se estableció que los depósitos aluviales y fluviales Pa, Ha y la Fm. OMI(b) tienen capacidad de almacenamiento y transporte de agua, y que los depósitos glaciales pueden tener una baja capacidad acuífera. El rol de las estructuras es difícil de determinar, y probablemente dependa de cada caso y de las características propias de éstas a lo largo de su recorrido. De esta manera, se desconoce la capacidad acuífera de la Fm. Macusa y de los volcanes y centros eruptivos menores, cuya capacidad acuífera probablemente dependa de estructuras. Los depósitos salinos podrían tener capacidad acuífera por porosidades.

Finalmente, las aguas muestreadas, en su totalidad, no cumplen con la norma de agua potable NCh409, por lo que no pueden ser utilizadas para suministro humano. Siete de las ocho muestras analizadas tampoco cumplen con la norma de riego NCh1333, siendo la muestra N°3 la única que podría considerarse para este uso, aunque es necesario un monitoreo frecuente para asegurar el cumplimiento de la norma ya que el contenido en boro podría presentar un problema.

Se recomienda realizar pozos para hacer ensayos de bombeo, y de esta manera obtener parámetros hidráulicos. Los pozos se podrían realizar en sitios representativos de cada una de las unidades hidrogeológicas definidas.

Se recomienda realizar un mapa geológico de menor escala que el disponible (XV región, de García (2004)) para mejorar la descripción de las formaciones, de los depósitos y de las estructuras presentes.

## BIBLIOGRAFÍA

**Aceituno, P.** 1993. Aspectos generales del clima en el altiplano sudamericano. In II Simposio internacional de estudios altiplánicos. Arica, Chile.

**Aguilera, F. 2008.** Origen y Naturaleza de los Fluidos en los Sistemas Volcánicos, Geotermales y Termal de Baja Entalpía de la Zona Volcánica Central (ZVC) entre los 17°43'S y 25°10'S. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias mención Geología. Antofagasta

**Best, Myron G.** 2003. Igneous and Metamorphic Petrology. Berlin, Blackwell Science Ltd, 2003. 707p.

**Centro de Ecología Aplicada.** 2009. Programa de Seguimiento Ambiental. Extracción de ulexita en el Salar de Surire. Calidad de agua, biota y paisaje.

**Charrier, R., [y otros]** 2005. Rapid tectonic and paleogeographic evolution associated with the development of the Chucal anticline and the Chucal-Lauca Basin in the Altiplano of Arica, northern Chile. Journal of South American Earth Sciences 19: 35-54.

**Chong, G., Pueyo, J., y Demergasso, C.** 2000. Los yacimientos de boratos en Chile. Revista Geológica de Chile 27(1).

**Herrera, C., [y otros].** 2006. Relación de aguas superficiales y subterráneas en el área del lago Chungará y lagunas de Cotacotani, norte de Chile: un estudio isotópico. Revista geológica de Chile. 33(2): 299-325.

**CONAF.** 2000. Plan de Manejo Monumento Natural Salar de Surire. Santiago.

**Cusicanqui, H.** 1979. Estudio Geoquímico del Área Termal de Surire, Prov. de Arica I Región.

**Custodio, E., Llamas, M.** 2001. Hidrología Subterránea. Ediciones Omega 1: 1063.

**DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., & Stein, S.** 1990. Current plate motions. Geophysical journal international, 101(2), 425-478.

**DGA.** 1996. Delimitación de Acuíferos de Vegas y Bofedales de las Regiones de Tarapacá y Antofagasta.

**Dickson, M., Fanelli, M.** 1995. Geothermal energy. Pisa, John Wiley & Sons Ltd. 456p.

**Eugster, H., Jones, B.** 1979. Behavior of mayor solutes during closed-basin brine evolution. *American Journal of Science*. 279: 609-631.

**Fariás, M., Charrier, R., Comte, D., Martinod, J., & Hérail, G.** (2005). Late Cenozoic deformation and uplift of the western flank of the Altiplano: Evidence from the depositional, tectonic, and geomorphologic evolution and shallow seismic activity (northern Chile at 19 30' S). *Tectonics*, 24(4)

**FCIHS.** 2009. Hidrogeología. Barcelona, 768p.

**García, M., Gardeweg, M., Clavero, J., Hérail, G.** 2004. Hoja Arica: Región de Tarapacá, escala 1 :250.000. Servicio Nacional de Geología y Minería, No 84, 132 p.

**Geyh, M.** 2000. Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle. Principles and Applications. Hannover, Vol. 4.

**González, G., Gerbault, M., Martinod, J., Cembrano, J., Carrizo, D., Allmendinger, R., & Espina, J.** 2008. Crack formation on top of propagating reverse faults of the Chuculay fault system, northern Chile: Insights from field data and numerical modelling. *Journal of Structural Geology*, 30(6), 791-808.

**Icenhower, J. P., & Dove, P. M.** 2000. The dissolution kinetics of amorphous silica into sodium chloride solutions: effects of temperature and ionic strength. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(24), 4193-4203.

**Igarzábal, A., & Pueyo, J. J.** 1991. Evaporitas cuaternarias de la Puna Argentina. Génesis de formaciones evaporíticas: Modelos andinos e ibéricos (Pueyo, JJ; editor), Universidad de Barcelona, 333-374.

**Kley, J., & Monaldi, C. R.** 1999. Estructura de las Sierras Subandinas y del sistema de Santa Barbara. *Geología del Noroeste Argentino*, 1, 415-425.

**Lagos, L.** 2016. Hidrogeoquímica de fuentes termales en ambientes salinos relacionados con salares en los andes del norte de Chile. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias mención Geología. Santiago.

**Lahsen, A.** 1988. Chilean geothermal resources and their possible utilization. *Geothermics*, 17(2-3), 401-410.

**Muñoz, N., & Charrier, R.** 1996. Uplift of the western border of the Altiplano on a west-vergent thrust system, northern Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 9(3-4), 171-181.

**Edition, F.** 2011. Guidelines for drinking-water quality. WHO chronicle, 38, 104-8.

**Ong, C. G., Herbel, M. J., Dahlgren, R. A., & Tanji, K. K.** 1997. Trace element (Se, As, Mo, B) contamination of evaporites in hypersaline agricultural evaporation ponds. Environmental science & technology, 31(3), 831-836.

**Polster, W.** 1996. Hydrothermal precipitation and dissolution of silica. Part I. Conditions in geothermal fields and sedimentary basins. Part II. Experimental evaluation of kinetics.

**Rimstidt, J. D., & Barnes, H. L.** 1980. The kinetics of silica-water reactions. Geochimica et Cosmochimica Acta, 44(11), 1683-1699.

**Salas, R.** 1975. Estudio Geológico de Salar de Surire. Instituto de Investigaciones Geológicas. Arica.

**Salazar, C.** 1997. Hidrología del sector altiplánico Chileno. En: El altiplano: Ciencia y conciencia en los Andes. II simposio internacional de estudios altiplánicos. Universidad de Chile, Santiago (pp. 71-77).

**Tassi, F., Aguilera, F., Darrah, T., Vaselli, O., Capaccioni, B., Poreda, R. J., & Huertas, A. D.** 2010. Fluid geochemistry of hydrothermal systems in the Arica-Parinacota, Tarapacá and Antofagasta regions (northern Chile). Journal of Volcanology and Geothermal Research, 192(1), 1-15.

**U.S. Department of Health and Human Services.** 2007. Toxicological Profile for Arsenic. Atlanta.

**Vengosh, A.** 2003. Salinization and saline environments. Treatise on geochemistry, 9, 612.

**Warren, J. K.** 2006. Evaporites: sediments, resources and hydrocarbons. Springer Science & Business Media.

## ANEXOS

## ANEXO 1

Resultados de parámetros fisicoquímicos medidos en terreno y análisis químicos medidos en laboratorio (Tabla 28).

**TABLA 24: PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS MEDIDOS IN SITU. C2 NO SE INCLUYE DEBIDO A QUE LA SONDA MULTIPARÁMETRO NO SE PUDO CALIBRAR.**

	ID	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	TDS (mg/L)
<b>C1</b>	2	12,6	8,92	311	199
	4	23,2	9,31	707	452
	6	25,5	9,52	231	147,8
	7	8,4	8,41	71500	45800
	8	18,9	8,73	3900	2500
	9	46,4	6,51	7400	4730
	3	2,3	5,6	110,1	70,5
<b>C3</b>	5	9,2	8	1075	688
	8	13,3	9,75	5530	3540
	9	34	7,2	5850	3850

Resultados de los elementos menores de las 3 campañas (Tabla 29).

**TABLA 25: ESPECIES QUÍMICAS DE ELEMENTOS MENORES ANALIZADAS.**

		<b>Especies químicas [meq/L]</b>					
		Aluminio	Arsénico	Bromuro	Nitratos	Boro	Silicio
<b>C1</b>	1	-	0,001	0,001	0,007	-	-
	2	-	0,000	0,001	0,007	-	-
	4	-	0,017	0,001	0,007	-	-
	6	-	0,002	0,000	0,007	-	-
	7	-	0,042	0,397	0,002	-	-
	8	-	2,937	0,201	0,079	-	-
	9	-	2,104	0,359	0,000	-	-
<b>C2</b>	3	0,040	0,000	0,000	0,008	0,072	2,614
	4	0,010	0,007	0,001	0,008	0,140	8,029
	5	0,010	0,054	0,002	ld	0,262	5,500
	7	0,023	2,035	0,463	ld	11,747	2,071
	9	0,004	0,036	0,038	ld	2,971	9,057
<b>C3</b>	3	-	0,000	0,000	0,005	0,024	2,257
	5	-	0,042	0,001	0,010	0,221	4,257
	8	-	0,030	0,033	0,050	2,731	2,629
	9	-	0,032	0,035	0,059	3,867	8,543

Las asociaciones minerales generalizadas de rocas subcalcinas típicas usualmente volcánicas se encuentran en la Figura 38. Se encuentran según su temperatura de equilibrio. Grada de composición más ácida (izquierda) a más básica (derecha).

Riolita	Dacita	Andesita	Basalto
			Olivino
—		—	
— —	— —		Ortopiroxeno
— —	— —		Clinopiroxeno
—	Hornblenda	—	
Biotita			
—			
Muscovita			
	Plagioclasa (% Anortita)		
	30		50
Feldespatos alcalinos	—		
Cuarzo	— — —		

**FIGURA 38: ASOCIACIONES MINERALES GRAFICADAS SEGÚN SU TEMPERATURA RELATIVA DE EQUILIBRIO. IMAGEN OBTENIDA DE BEST (2003).**