



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

APLICACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA TÉCNICA DE  
HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS COMO  
HERRAMIENTA DE EXPLORACIÓN DE PÓRFIDOS CUPRÍFEROS:  
ESTUDIO DE PAMPA ELVIRA Y PAMPA MARIPOSA, REGIÓN DE  
ANTOFAGASTA, CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

EITEL WERNER ROSENKRANZ CONTARDO

PROFESOR GUÍA:  
BRIAN TOWNLEY CALLEJAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
JUAN CARLOS TORO GEORGE  
KATJA DECKART

SANTIAGO DE CHILE  
2017

**RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
Geólogo  
POR: Eitel Werner Rosenkranz Contardo  
FECHA: 23/08/2017  
PROFESOR GUÍA: Brian Townley**

**APLICACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA TÉCNICA DE HIDROGEOQUÍMICA DE  
AGUAS SUBTERRÁNEAS COMO HERRAMIENTA DE EXPLORACIÓN DE  
PÓRFIDOS CUPRÍFEROS: ESTUDIO DE PAMPA ELVIRA Y PAMPA MARIPOSA,  
REGIÓN DE ANTOFAGASTA, CHILE**

Este trabajo presenta los resultados del estudio hidrogeológico e hidrogeoquímico de las aguas subterráneas de las cuencas Pampa Elvira y Pampa Mariposa, Región de Antofagasta, Chile. El objetivo es la aplicación y evaluación de la hidrogeoquímica como herramienta de exploración de cuerpos mineralizados de tipo pórfido cuprífero ocultos bajo cobertura post-mineral.

La zona de estudio se ubica a 100 km al sur de la ciudad de Calama, sobre la cordillera de Domeyko, en una zona de aridez extrema. En este sector se encuentra el Sistema de Fallas de Domeyko, que corresponde al principal control de pórfidos cupríferos del Eoceno medio – Oligoceno temprano, como Chuquicamata, La Escondida y Gaby. Las cuencas en el área de estudio se encuentran cubiertas en gran parte por gravas aluviales de edad miocena cuyo espesor varía entre 10 y más de 200 metros. Contenidos en estas gravas se reconocen acuíferos libres que fluyen de NE a SW, confluyendo en los puntos de descarga, que corresponden a los salares Elvira y los Morros.

La información geoquímica analizada corresponde a muestras de aguas subterráneas tomadas en 25 pozos, entre 2013 y 2016, e incluye parámetros físico-químicos (pH y TDS) y concentraciones de cationes y aniones mayores, además de 13 elementos menores y trazas.

Los resultados indican que el agua subterránea en la zona de estudio es preponderantemente salobre y de pH neutro a alcalino. Mediante la comparación con acuíferos similares del norte de Chile, se estima que las condiciones redox de los sistemas estudiados son oxidantes. Estas condiciones inciden en la especiación de elementos, precipitación mineral y procesos de adsorción, los cuales son los principales controles de la movilidad geoquímica.

Los análisis geoquímicos de las aguas subterráneas indican en 5 pozos, altos contenidos los elementos As, Cu, Mo, Zn, y en algunos casos Pb, en comparación con las aguas superficiales regionales y las aguas subterráneas de los yacimientos de Spence e Inca de Oro. Estas altas concentraciones son consideradas anomalías geoquímicas (desde un punto de vista comparativo) que se generarían desde cuerpos mineralizados posiblemente de tipo pórfido cuprífero ocultos bajo coberturas que estarían siendo lixiviados por las aguas subterráneas. La posible ocurrencia de estos cuerpos mineralizados también es apoyada por los resultados del modelamiento hidrogeoquímico que indica saturación en minerales característicos de pórfidos cupríferos con alteración supergena (atacamita, brocantita, malaquita y tenorita). Por otro lado, estos pozos también presentan altos contenidos de Fe y sulfato, lo cual podría estar relacionado con procesos de oxidación de sulfuros.

Los resultados indican que esta técnica es una herramienta útil a escala regional en la exploración minera de primer orden de pórfidos cupríferos bajo cobertura post-mineral.

*Die goldenen Jahre der Studentenleben sind vorbei...*

## Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a mis Padres quienes siempre me han mostrado un gran apoyo. Ustedes me han enseñado grandes lecciones de vida, a ser una persona perseverante y a confiar en mí mismo. Agradezco también a mi abuela por todo el cariño y amor que siempre me ha dado. A todos mis hermanos que significan mucho para mí, a pesar de las dispuestas por dominio territorial o internet que casi dan comienzo a una III Guerra Mundial.

En segundo lugar, quiero agradecer a los miembros de mi comisión: a Brian Townley por su excelente guía durante mi memoria, a la profesora Katja Deckart por su gran voluntad y siempre buena disposición y a Juan Carlos Toro por todo su apoyo, confianza y consejos. Todos sus consejos y conocimientos me permitieron desarrollar este trabajo.

Agradezco a Exploraciones Mineras S.A. quienes me dieron la oportunidad de realizar no solo mi memoria, sino también mis prácticas profesionales, por lo que han ayudado en gran parte en mi formación como Geólogo.

A mis amigos y malas juntas de la universidad, sin ustedes no habría sobrevivido Plan Común: Miguel, Cristóbal, Pichi, Jercko, Martin, Nachito, Javier, Checho, Papaya, Maus, Mono, David, Oscar, José, Rupert, Orrego, Klaus y Justin. ¡Grande BH!

A mis amigos de Geología: Daniel, Javi, Spiess, Vale, Nicha, Mati, Nacho y Seba. ¡Aguante los Georatas! A los compañeros de la salita de memoristas Laura, Nachete, Aileen, Cayo, Menares, Rudolf y los demás. Gracias por compartir lagrimas durante este periodo.

A mi equipo de futbolito de Geo, ¡Se logro el bicampeonato!

Agradezco a grandes personas que he conocido en los últimos años y con los que he podido compartir en la montaña: David, Pablonski, Cris, Christian y otros, espero sigamos buscando alcanzar cimas en nuestra cordillera.

A la Burschenschaft Andinia por las grandes experiencias y por permitirme conocer a grandes personas y amigos: a Felipe, Jorge, Juancris, Nico, Julio, Lalo y Manfredo con quienes he compartido tantas cervezas y ñoñerías, también a los compañeros de cordada Hans y Mati, a la siempre gruñona Betti, al compañero de supervivencia Steff ligg y ¡a muchos más!

A mi comunidad peregrina Angelina: Rena, Joaco, Jesu, Pancho, Juan, Mimi, Flo 1, Flo 2, Oñate, Penroz, Tomi y Nico y por supuesto también a los grandes desertores en Conce: Jarita, Zambo, Koller y Sebita.

Finalmente, a mi linda polola por todo el apoyo, cariño y paciencia durante mi memoria, que fueron fundamentales para sobrevivir a este largo proceso.

¡A todos muchas gracias!

# Tabla de contenido

1.INTRODUCCIÓN.....	1
Formulación del proyecto.....	1
Objetivos.....	2
1.1.1 Objetivo general.....	2
1.1.2 Objetivos específicos.....	2
Metodología.....	2
1.1.3 Recopilación de antecedentes.....	2
1.1.4 Procesamiento de datos.....	2
1.1.5 Modelamiento hidrogeoquímico.....	3
Fundamentos Teóricos.....	3
Antecedentes Generales.....	5
1.1.6 Ubicación y accesos.....	5
1.1.7 Clima.....	6
1.1.8 Geomorfología regional.....	6
1.1.9 Hidrografía regional.....	6
2.MARCO GEOLÓGICO.....	8
Geología regional.....	8
Geología estructural.....	11
Geología económica.....	13
Sector Salar Elvira.....	14
2.1.1 Geomorfología local.....	14
2.1.2 Geología local.....	15
Sector Salar Los Morros.....	15
2.1.3 Geomorfología local.....	15
2.1.4 Geología local.....	15
Sector Llano Mariposas.....	16
2.1.5 Geomorfología local.....	16
2.1.6 Geología local.....	16
3.MARCO HIDROGEOLÓGICO.....	17
Hidrogeología regional.....	17
Hidrogeología del sector Salar Elvira.....	18
Hidrogeología del sector Salar de Los Morros.....	18
Hidrogeología del sector Llano Mariposas.....	19

4.MUESTRAS DE AGUAS SUBTERRANEAS .....	21
Metodología de muestreo .....	21
Análisis químico .....	24
Validación de los análisis químicos.....	24
5.ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	25
Censura de datos .....	25
Estadística Univariable .....	26
5.1.1 Zonas de estudio.....	26
5.1.2 Comparación con aguas subterráneas de otros yacimientos y aguas superficiales regionales.....	28
6.GEOQUIMÍA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS .....	31
Sector Salar de los Morros.....	31
6.1.1 Parámetros Físico-Químicos .....	31
6.1.2 Geoquímica de elementos mayores.....	35
6.1.3 Geoquímica de elementos menores y traza.....	40
Sector Llano Mariposas .....	43
6.1.4 Parámetros Físico-Químicos .....	43
6.1.5 Geoquímica de elementos mayores.....	46
6.1.6 Geoquímica de elementos menores y traza.....	51
Sector Salar Elvira .....	54
6.1.7 Parámetros Físico-Químicos .....	54
6.1.8 Geoquímica de elementos mayores.....	57
6.1.9 Geoquímica de elementos menores y traza.....	61
Modelamiento hidrogeoquímico.....	64
7.DISCUSIONES .....	66
Sector Salar de los Morros.....	66
Sector Llano Mariposas .....	71
Sector Salar Elvira .....	77
8.CONCLUSIONES .....	82
BIBLIOGRAFÍA .....	84
ANEXO A Ubicación puntos de muestreo.....	87
ANEXO B Análisis geoquímico .....	88
ANEXO C Resultados de análisis químicos .....	96
ANEXO D Resultados del modelamiento hidrogeoquímico.....	97

## Índice de figuras

Figura 1.1 Punto de carga cero para algunas superficies minerales .....	4
Figura 1.2 Ubicación zona de estudio. ....	5
Figura 1.3 Hidrografía regional. Se muestran las distintas cuencas hidrograficas de la región y en blanco algunos salares .....	7
Figura 2.1 Geología regional de la zona de estudio (escala 1:250.000).....	10
Figura 2.2 Mapa estructural regional.....	12
Figura 2.3 Distribucion de algunos porfidos cupriferos en el norte de Chile.....	14
Figura 3.1 Mapa hidrogeológico de la zona de estudio.....	20
Figura 4.1 Ubicación de pozos de muestreo.....	23
Figura 5.1 Valores de pH y concentraciones de As, Cu, Fe, Mo y Zn de muestras de aguas subterráneas de Llano Mariposas, Salar Elvira, Salar de los Morros, Spence e Inca de oro.....	29
Figura 6.1 Ubicación de pozos de muestreo en sector Salar de los Morros. ....	31
Figura 6.2 Gráfico Box Plot del pH de aguas subterráneas del sector Salar de los Morros.....	32
Figura 6.3 TDS de las muestras de aguas subterráneas del sector Salar de los Morros .....	33
Figura 6.4 pH v/s TDS del sector Salar de los Morros.....	34
Figura 6.5 Diagrama Piper para aguas subterráneas del sector Salar de los Morros.....	35
Figura 6.6 Concentraciones de elementos mayores en aguas subterráneas del sector salar de los Morros .....	36
Figura 6.7 Concentraciones de elementos mayores relativas al TDS, de las aguas subterráneas del sector Salar de los Morros .....	38
Figura 6.8 Concentración promedio de elementos mayores en muestras de agua subterráneas del sector Salar de los Morros .....	39
Figura 6.9 Concentraciones relativas de algunos elementos menores y traza.....	42
Figura 6.10 Ubicación pozos de muestreo en sector Llano Mariposas. ....	43
Figura 6.11 Gráfico Box Plot del pH de aguas subterráneas del sector Llano de Mariposas.....	44
Figura 6.12 TDS de las muestras de aguas subterráneas del sector Llano Mariposas .....	45
Figura 6.13 Diagrama Piper para aguas subterráneas del sector Llano Mariposas .....	46

Figura 6.14 Gráficos Box Plots de las aguas subterráneas del sector Llano Mariposas, para los elementos Calcio, Cloro y Potasio.....	47
Figura 6.15 Concentraciones de elementos mayores relativas al TDS, de las aguas subterráneas del sector Llano Mariposas.....	49
Figura 6.16 Concentración promedio de elementos mayores en muestras de agua subterráneas del sector Llano Mariposas.....	50
Figura 6.17 Concentraciones relativas de algunos elementos menores y traza.....	53
Figura 6.18 Ubicación pozos de muestreo en sector Salar Elvira. ....	54
Figura 6.19 Gráfico Box Plot del pH de las aguas subterráneas del sector Salar Elvira.....	55
Figura 6.20 TDS de las muestras de aguas subterráneas del sector Salar Elvira .....	56
Figura 6.21 Diagrama Piper para aguas subterráneas del sector Salar Elvira .....	57
Figura 6.22 Concentraciones de elementos mayores relativas al TDS, de las aguas subterráneas del sector Salar Elvira.....	59
Figura 6.23 Concentración promedio de elementos mayores en muestras de agua subterráneas del sector Salar Elvira.....	60
Figura 6.24 Concentraciones relativas de algunos elementos menores y traza.....	63
Figura 6.25 Diagrama de clasificación de distintos tipos de aguas naturales según el ambiente natural al que pertenecen, indicando condiciones de redox (pe) y pH .....	65
Figura 7.1 Concentración de SO <sub>4</sub> versus Ca (en meq/l) en muestras de agua subterránea de Salar de los Morros.....	68
Figura 7.2 Mapa de ubicación de pozos y acuífero (marcado de color morado) del sector Salar de los Morros.....	71
Figura 7.3 Concentración de SO <sub>4</sub> versus Ca (en meq/l) en muestras de agua subterránea de Llano Mariposas .....	73
Figura 7.4 Mapa de ubicación de pozos y acuífero (marcado de color azul) del sector Llano Mariposas .....	76
Figura 7.5 Concentración de SO <sub>4</sub> versus Ca (en meq/l) en muestras de agua subterránea de Salar Elvira .....	78
Figura 7.6 Mapa de ubicación de pozos y acuífero (marcado de color azul) del sector Salar Elvira. ....	81

## Índice de tablas

Tabla 4.1: Tipos de pozos muestreados y profundidad promedio del nivel freático.....	22
Tabla 4.2 Cantidad de muestras por pozo con porcentajes de error de balance iónico menor al 5%. .....	24
Tabla 5.1: Porcentaje de datos menores al límite de detección, por variable, de los tres sectores de estudio.....	25
Tabla 5.2: Estadística básica general para los parámetros físico-químicos y especies disueltas de las muestras de agua subterránea de los sectores de estudio. ....	27
Tabla 5.3: Hidrogeoquímica de sectores de estudio, Spence, Inca de Oro, y cuenca del río Loa. ....	30

# 1 INTRODUCCIÓN

## Formulación del proyecto

La exploración minera en Chile ha enfrentado múltiples desafíos en los últimos años entre estos la exploración de nuevos depósitos minerales cada vez más profundos, y/o bajo zonas con gruesas cubiertas sedimentarias post-minerales, dificultando el uso de las técnicas más comunes en la detección de yacimientos por los elevados costos que estos implican. Es en este sentido que el estudio hidrogeoquímico de aguas subterráneas adquiere mayor relevancia como una herramienta de exploración minera. El agua subterránea permite explorar mineralización a mayores profundidades con respecto a otros métodos geoquímicos, esto debido a que posee la facilidad de infiltrarse por fracturas a grandes profundidades en la corteza. Por otro lado, el agua subterránea presenta gran movilidad y es químicamente reactiva con la mineralización y roca huésped, por lo que luego de interactuar con algún cuerpo mineralizado, esta fluye y se aleja, llevando consigo una impresión geoquímica que puede ser reconocida varios kilómetros aguas abajo. La búsqueda de plumas de dispersión geoquímicas en aguas subterráneas permite determinar vectores geoquímicos que apunten hacia el cuerpo mineralizado de interés. Además entrega anomalías de aspecto más amplio que la geoquímica de roca, por lo que la densidad de pozos de perforación puede ser mucho menor (Leybourne & Cameron, 2010), disminuyendo los costos de exploración.

En el presente trabajo se busca combinar la información bibliografía disponible referente al uso de la técnica de exploración hidrogeoquímica de aguas subterráneas más los antecedentes geológicos, hidrológicos, e hidrogeológicos existentes en torno a las cuencas Pampa Elvira y Pampa Mariposas (norte), para identificar las principales características en aguas subterráneas que puedan ser un reflejo de la ocurrencia de un cuerpo mineralizado en el distrito Gaby de Codelco. Además, se busca evaluar la aplicación de esta técnica en la exploración regional que Codelco-EMSA está realizando en el norte de Chile.

El trabajo de esta memoria es un proyecto en colaboración con Exploraciones Mineras S.A, filial de Codelco, la que provee información existente (geológica, hidrogeológica e hidrogeoquímica, entre otros) de su operación en el clúster de Gaby y zonas cercanas a estas, para generar la base de datos con la que inicialmente se trabaja.

## **Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo general**

Aplicar y evaluar la técnica de hidrogeoquímica de aguas subterráneas como herramienta exploración de pórfidos cupríferos tanto en las cuencas Pampa Elvira y Pampa Mariposa (norte), como en la exploración regional.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Estudiar los fundamentos teóricos la técnica de exploración geoquímica.
- Determinar las principales características geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas de la zona de estudio, que influyan en el comportamiento de las aguas subterráneas.
- Identificar anomalías de contraste y principales características geoquímicas de las aguas subterráneas de la zona de estudio.
- Determinar el comportamiento, movilidad y control de distintos elementos disueltos en las aguas subterráneas.
- Interpretar características geoquímicas de las aguas subterráneas, respecto a la posible ocurrencia de cuerpos mineralizados de tipo pórfido cuprífero bajo la cobertura post-mineral.

## **Metodología**

### **1.1.3 Recopilación de antecedentes**

Esta etapa consiste en la recopilación de información de los fundamentos teóricos de la exploración geoquímica usando aguas subterráneas, hidrogeología, dispersión de especies disueltas y modelamiento de sistemas de agua subterránea.

Como segunda etapa se realiza un levantamiento de información sobre los muestreos de las aguas subterráneas existentes en las cuencas Pampa Elvira y Pampa Mariposa, junto con antecedentes geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos de estos sectores. Gran parte de esta información se obtiene de la base de datos de EMSA-Codelco sobre su operación en mina Gaby.

### **1.1.4 Procesamiento de datos**

Los datos hidrogeoquímicos de las aguas subterráneas de las cuencas de Pampa Elvira y Pampa Mariposas se analizan mediante estadística univariable (determinación de estadísticos

básicos). El análisis también incluye la caracterización de las aguas subterráneas en base al diagrama de clasificación de Piper, la construcción de gráficos de concentración relativa y modelación estática de los sistemas de aguas subterráneas. Además, se comparan los datos hidrogeoquímicos de las aguas subterráneas de estudio con las de aguas subterráneas de dos yacimientos conocidos (Inca de Oro y Spence) y aguas superficiales regionales.

### **1.1.5 Modelamiento hidrogeoquímico**

Mediante el programa PHREEQC (USGS, 2017), utilizando las mediciones y análisis de las variables físico-químicas y geoquímicas de las aguas subterráneas de la zona de estudio, se realiza un modelo estático de los sistemas de aguas subterráneas. Este modelo incluye el cálculo de los índices de saturación y la especiación de los distintos elementos presentes en las aguas subterráneas. Esto permite conocer el comportamiento de los distintos elementos en solución, además del equilibrio termodinámico de distintos minerales de interés, para su uso en la interpretación de las distintas concentraciones anómalas detectadas.

## **Fundamentos Teóricos**

Para el uso de geoquímica en aguas subterráneas como método de exploración es importante entender el mecanismo mediante el cual se generan las anomalías geoquímicas en los depósitos de distinto tipo. Las anomalías observadas en geoquímica de aguas subterráneas se forman principalmente por procesos de dispersión hidromórfica (Leybourne & Cameron, 2010).

Para formar anomalías geoquímicas, primero el agua subterránea debe fluir a través de un cuerpo mineralizado. Es importante además que las condiciones de Eh y pH sean las adecuadas, ya que influyen en la extensión y el estilo de reacción de los minerales de mena, y en la movilidad y dispersión de metales/metaloides asociados a la mineralización de mena. Si las condiciones de pH/Eh no son las adecuadas para la disolución/reemplazo mineral y transporte de elementos, las anomalías geoquímicas en solución serán atenuadas o no se formarán (Leybourne & Cameron, 2010).

La movilidad geoquímica en aguas subterráneas se encuentra determinado principalmente por tres factores: la especiación de elementos en solución, precipitación mineral, y procesos de adsorción (Taufen, 1997).

Los análisis químicos indican sólo concentraciones totales de elementos realizados a aguas subterráneas, pero no entregan información directa sobre la forma en que se encuentran los elementos en la solución analizada. Estos elementos se pueden encontrar de diversas formas, ya sea formando cationes, aniones o especies neutras, lo que se encuentra determinado por las condiciones físico-químicas del sistema, en especial por el Eh-pH, y que afectara cómo los distintos elementos interactúan entre sí y con materiales sólidos con carga en aguas naturales (Taufen, 1997). Es por estos motivos que la especiación de los distintos elementos es fundamental en el estudio hidrogeoquímico de aguas subterráneas.

La precipitación mineral también afecta la movilidad de los elementos, ya que, al precipitar un mineral, disminuye la concentración de los elementos que forman parte de su estructura química,

e incluso remueve otros elementos mediante la coprecipitación, o adsorción al nuevo mineral precipitado (Taufen, 1997). Para determinar si una solución posee condiciones para precipitar algún mineral, se calculan los índices de saturación mineral, de tal forma de determinar si una solución se encuentra en equilibrio, sobresaturada o subsaturada respecto a algún mineral.

La adsorción de metales en solución a la superficie de sustratos sólidos va a depender de la carga superficial de estas partículas sólidas. Cuando la carga es positiva, se atraen y adsorben especies negativas en solución (aniones), mientras que si la carga superficial es negativa el efecto es opuesto, y se atraen y adhieren especies con carga positiva (cationes). Esta carga superficial se encuentra fuertemente influenciada por el pH del sistema, en donde a pH más ácidos, las cargas superficiales son en general positivas y a pH más alcalinos, las cargas superficiales tienden a ser negativas. El valor pH o punto de carga cero, al cual las superficies de las partículas cambian su carga, es distinta para cada partícula sólida (Figura 1.1). Esta información junto con la especiación de los elementos permite interpretar si la ocurrencia de algún elemento será como ion libre en solución o si ocurrirá adsorbido a alguna partícula en suspensión, coloide, o sustrato inmóvil (Taufen, 1997). Las partículas coloidales poseen diámetros entre 1 nanometro a 10 micrones y se componen de granos minerales (por ejemplo, partículas de caolinita, illita, óxidos de Fe), precipitados amorfos, bacterias y otras sustancias.

Mineral	pH <sub>pzc</sub>
$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ [1]	9.1
$\alpha\text{-Al(OH)}_3$ [1]	5.0
$\text{Fe}_3\text{O}_4$ [1]	6.5
$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	6.7
$\text{Fe(OH)}_3$ [1]	8.5
Goethite [2]	7.3
$\text{MnO}_2$ [2]	2 – 4.5
kaolinite	4.6
montmorillonite	2.5
calcite	9.5
albite	2.0

1. Stumm and Morgan, 1970.
2. Davis and Kent, 1990.

Figura 1.1 Punto de carga cero para algunas superficies minerales. Extraído de Taufen (1997).

## Antecedentes Generales

### 1.1.6 Ubicación y accesos

El área de estudio se encuentra en la región de Antofagasta, comuna de Sierra Gorda, aproximadamente a 100 km al sur de la ciudad de Calama y 30 km al oeste del Salar de Atacama, sobre la cordillera de Domeyko, ocupando parte de las cuencas Pampa Elvira y Pampa Mariposa (norte del Cerro Mariposa).

El acceso se puede efectuar desde Calama directamente hacia el sur por la ruta 23-CH por 15 km, y luego por el camino hacia Gaby por otros 70 km (Figura 1.2).

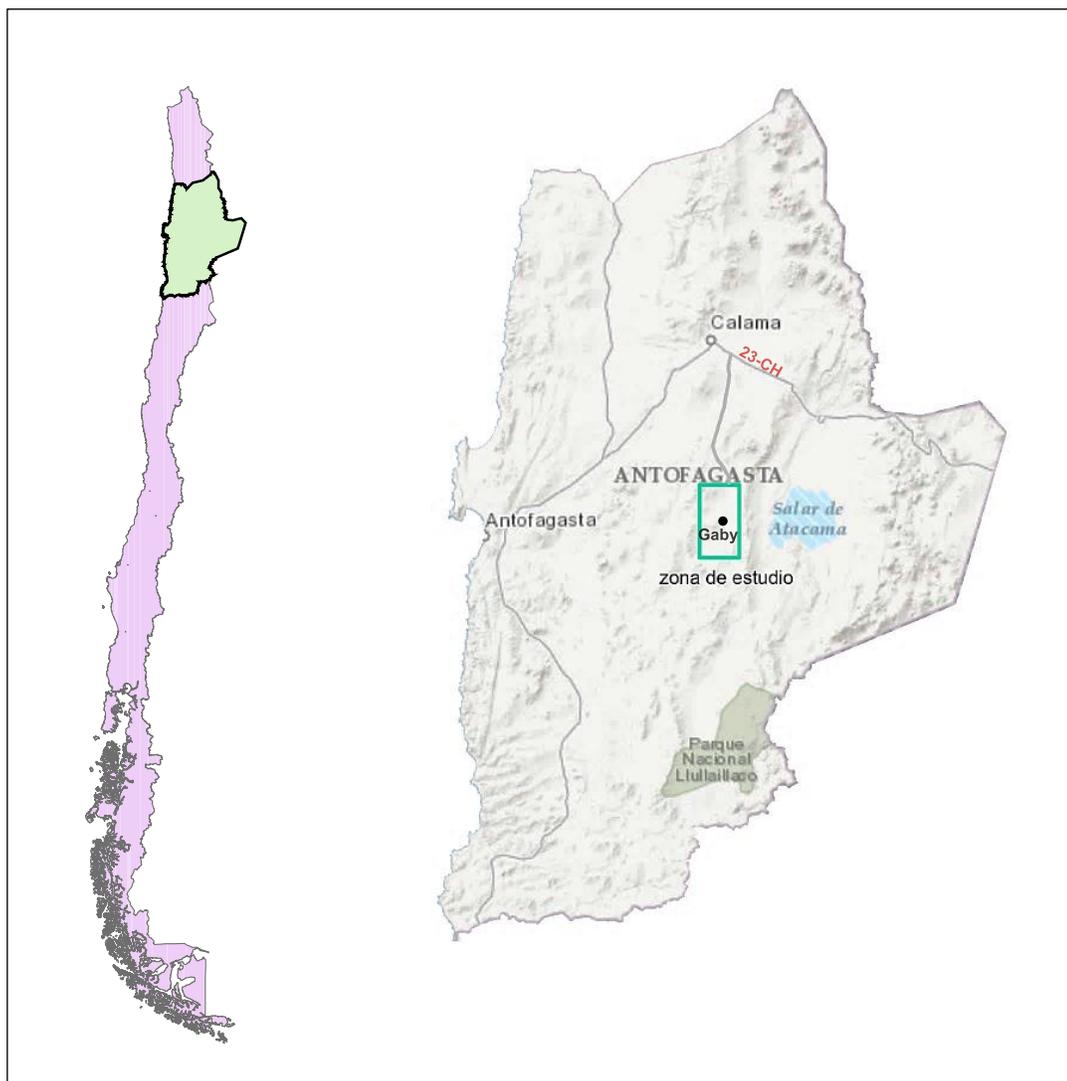


Figura 1.2 Ubicación zona de estudio.

### **1.1.7 Clima**

El clima en la zona de estudio es extremadamente árido. Según información de la Dirección General de Aguas (1988) las precipitaciones en este sector promedian menos de 10 mm/año. El periodo de lluvias ocurre principalmente entre diciembre y marzo (invierno altiplánico), cuando masas de aire húmedas provenientes de la cuenca amazónica llegan a la zona altiplánica. En general, las tormentas en la región están caracterizadas por alta intensidad, corta duración y limitado alcance espacial.

La cantidad de precipitación dentro de la región está en función de la elevación, donde las montañas reciben grandes cantidades de lluvia en comparación con las pampas y depresión central. La evapotranspiración también depende fuertemente de la altura y se estima que va desde 150 a 250 mm/año, pero bajo los 4.200 metros de altura la evapotranspiración es igual a la precipitación (Water Management Consultants, 1997).

### **1.1.8 Geomorfología regional**

Dentro de la región de Antofagasta se han identificado 5 zonas fisiográficas-estructurales: Cordillera de la Costa, Depresión central y Pampas, Cordillera de Domeyko, Pre altiplano, y Cordillera de los Andes. La zona de estudio se encuentra situada en la Cordillera de Domeyko.

La Cordillera de Domeyko está constituida, en la parte occidental, por una franja de serranías y planicies, la que gradúa hacia el este a un cordón montañoso continuo. Este último, se extiende por 450 km con un ancho de 20 a 30 km, orientado con dirección norte-noreste y con alturas entre 3.300 y 4.000 m s.n.m. En promedio, la cordillera de Domeyko posee una elevación de 3.000 m s.n.m. El relieve de esta zona está fuertemente influenciado por la litología y estructuras. Los altos cerros corresponden a afloramientos de granitos, granodioritas y monzonitas, resistentes a la erosión, que han sido alzados estructuralmente. Las cuencas entre estos cerros corresponden a depresiones estructurales rellenas con detritos originados en los cerros circundantes (Water Management Consultants, 1997).

### **1.1.9 Hidrografía regional**

El principal flujo de agua superficial de la región corresponde al río Loa, que se extiende por 440 kilómetros, desde el volcán Miño hasta el mar, y que posee una alimentación de régimen mixto fluvionival, manteniendo un flujo de agua continuo durante todo el año.

La región se caracteriza por una amplia presencia de salares, conservados gracias a las escasas precipitaciones y altas tasas de evaporación de la región (Figura 1.3).

Las cuencas Pampa Elvira y Pampa Mariposa (norte) corresponden a subcuencas endorreicas que forman parte de la cuenca Endorreicas Salar Atacama-Vertiente Pacífico, y se ubican en el extremo norte de esta última (Figura 1.3).

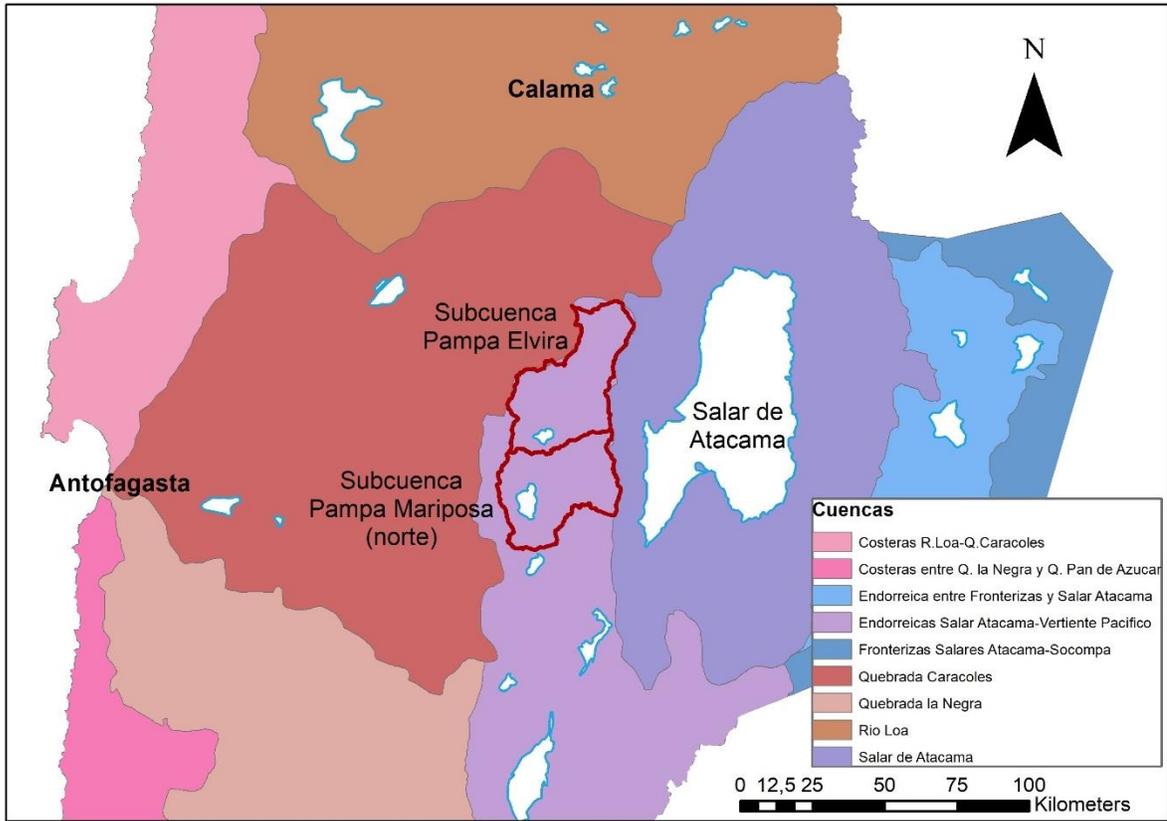


Figura 1.3 Hidrografía regional. Se muestran las distintas cuencas hidrograficas de la región y en blanco algunos salares. Se destacan en rojo las subcuencas Pampa Elvira y Pampa Mariposa (norte). Modificado de mapa hidrográfico, DGA, 2016.

## 2 MARCO GEOLÓGICO

En esta sección, se describe la geología, estructuras y ocurrencia de yacimientos metalíferos, enfocados en la Cordillera de Domeyko. Se describe además la geología y geomorfología local del área de estudio, la cual ha sido dividida en tres sectores (Figura 2.1): Salar Elvira (sector central); Salar Los Morros (sector sur), y Llano Mariposas (sector norte). Esta división es realizada en base a la geología y estructuras, además de la cercanía de los pozos de muestreo a estos distintos sectores.

### Geología regional

La geología regional está centrada en la Cordillera de Domeyko, expuesta en detalle en la Hoja de Toconao del Servicio Nacional de Geología y Minería (Ramírez & Gardeweg, 1982). Esta se observa en la Figura 2.1.

Las rocas de la Cordillera de Domeyko consisten, principalmente, en una mezcla de unidades volcánicas y sedimentarias, de edades mesozoicas y cenozoicas. Las rocas volcánicas van desde andesitas a tobas. Las rocas sedimentarias se componen de conglomerados, areniscas y evaporitas. Las unidades estratigráficas presentes en la Cordillera de Domeyko, de más antiguo a más joven, son:

- Formación Agua Dulce (TrJad): 1.000-1.600 m de andesitas, brechas andesíticas, tobas y conglomerados, de probable origen continental. Esta formación sobreyace, en discordancia angular, a los Estratos El Bordo, al este del cerro Químal, y subyace, concordantemente, a las rocas sedimentarias, marinas, de la Formación Torcazas (del Bajociano), en los cerros Agata y Torcazas, y a rocas de la Formación Caracoles (del Caloviano), en el cerro Alacrán. Asignada al Triásico-Jurásico inferior.
- Formación Purilactis (JKp): Más de 1.000 m de areniscas y conglomerados, pardo-rojizos, con intercalaciones de yeso, probablemente continentales. Esta unidad se apoya, en discordancia angular, sobre los Estratos El Bordo, al oeste del cerro Chocolate, y el techo de la Formación se encuentra erosionado y cubierto, en discordancia angular, por rocas volcánicas y sedimentarias de la Formación Cinchado y por rocas sedimentarias de la Formación Tambores. Se le ha asignado una edad jurásica superior a cretácica.
- Formación Tambores (Tt): más de 450 m de paraconglomerados, con intercalaciones de areniscas de grano grueso, ambos de origen continental. Esta unidad se dispone, en discordancia angular, sobre las formaciones Agua Dulce, Purilactis y Cinchado, en las nacientes de las quebradas de la vertiente oriental de la Cordillera de Domeyko, entre El Bordo y Cerro Negro, donde subyace, generalmente con discordancia, a los depósitos aterrazados. Esta Formación ha sido asignada al Oligoceno-Mioceno medio.

En la cordillera de Domeyko también se reconocen distintos plutones de composiciones, principalmente, granítica y granodiorítica. Estos son: granitoides del Paleozoico (Pzgd); granitoides del Cretácico (Kg, Kgd, Kmc), que intruyen a las rocas graníticas paleozoicas y a rocas

estratificadas mesozoicas (formaciones Agua Dulce y Purilactis); y pórfidos graníticos del Cretácico-Terciario (Tg), los que intruyen a la formación Agua Dulce, a la Formación Purilactis y a rocas plutónicas, paleozoicas y cretácicas. En toda el área, los diversos intrusivos están parcialmente cubiertos por la Formación Tambores, además de sedimentos y volcanitas cenozoicas.

La geología regional también incluye importantes depósitos no consolidados, no diferenciados de edad terciaria y cuaternaria. Aproximadamente 30% de toda la provincia de Cordillera de Domeyko está cubierta por estos sedimentos, que corresponden a sedimentos detríticos, principalmente de origen aluvial, los cuales conforman extensos piedemonte y llanuras, y en forma secundaria de origen lacustre. Los espesores van desde menos de 10 m hasta más de 200 m. En el sector de la cordillera de Domeyko se reconocen las siguientes unidades:

- Depósitos aterrazados (TQt): sedimentos medianamente litificados, constituidos, predominantemente, por gravas, arenas y limos, con estratificación regular y granulometría variable, observables en las pampas de la Cordillera de Domeyko. Corresponden a depósitos de piedemonte y corrientes de barro, los cuales se encuentran seccionados por los cauces de las quebradas actuales, y cuya potencia esta entre 3 y 4 m. Esta unidad tiene un rango de edad entre el Mioceno Superior y el Cuaternario.
- Depósitos aluviales (Qal): mezcla heterogénea constituida por gravas, arenas, arcillas y limos de composición polimictica, a veces, cementados por sales. Se originan de corrientes de barro o avenidas, y su espesor es de algunos centímetros a 1 m. A esta unidad se le ha asignado una edad cuaternaria.
- Depósitos salinos (Qcls): forman parte del relleno sedimentario de cuencas endorreicas y constituyen salares en la zona de estudio, como el salar Elvira y los Morros. Estos depósitos salinos consisten en cubiertas evaporíticas, con niveles freáticos someros y están constituidos principalmente por limos salinos con un alto contenido de yeso y/o cloruro de sodio. Esta unidad ha sido asignada al Cuaternario.

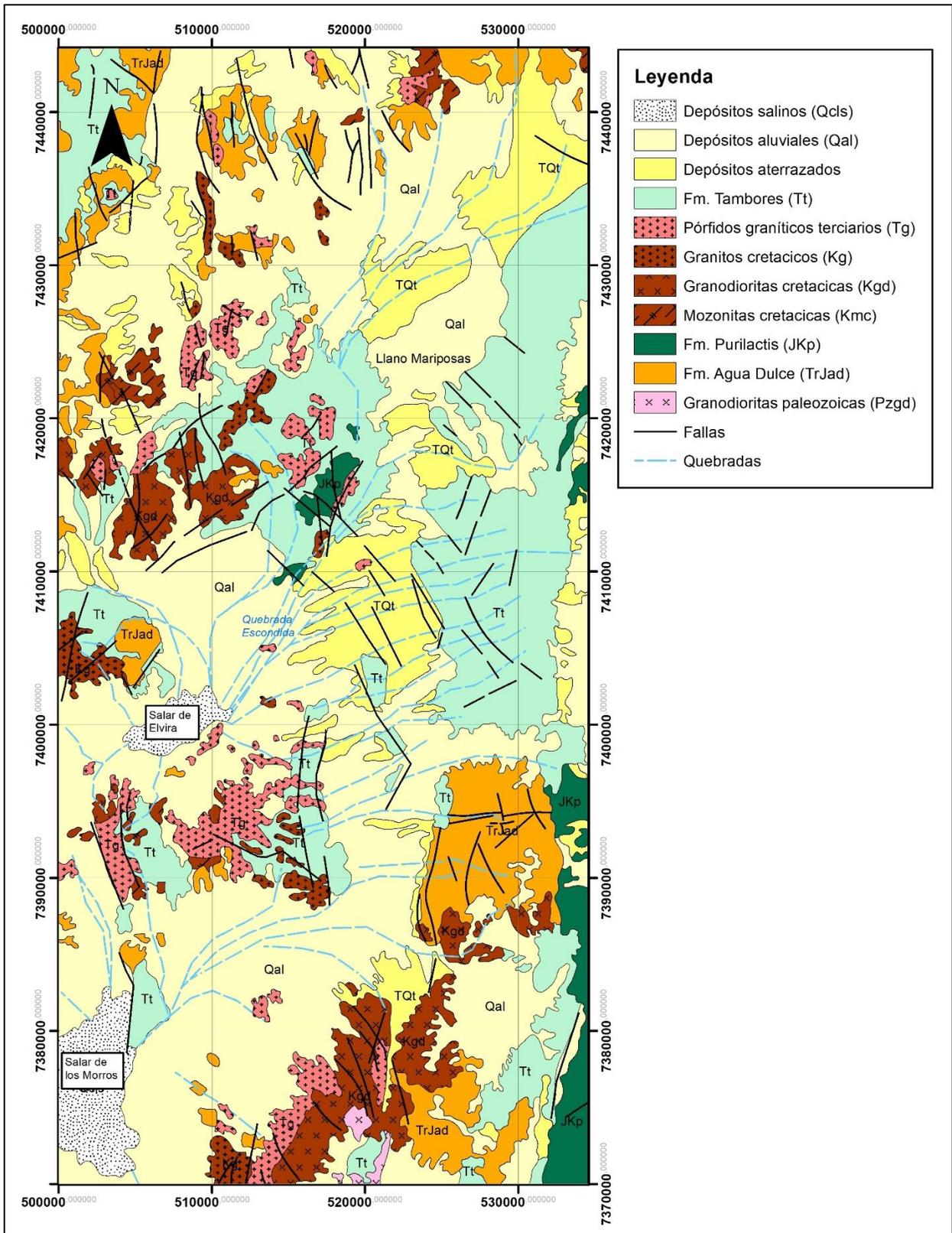


Figura 2.1 Geología regional de la zona de estudio (escala 1:250.000). Modificado de Ramirez & Gardeweg (1982).

## Geología estructural

A escala regional, distintos trabajos publicados reconocen la existencia de un sistema de fallas de rumbo del Eoceno-Oligoceno en la Cordillera de Domeyko, llamado Sistema de Fallas de Domeyko, el que ejercería un importante control en el emplazamiento de pórfidos cupríferos oligocenos (Maksaev, 1990; Boric *et al.*, 1990; Mpodozis *et al.*, 1993a).

Este sistema de fallas se extiende paralelo al orógeno por más de 1.000 km, entre Collahuasi y el valle del río Copiapó (Figura 2.2), y se encontraría segmentado en distintos sectores, donde cada tramo tendría sus propias características estructurales independientes de las otras (Mpodozis *et al.*, 1993b).

La zona de estudio es parte del segmento limitado al sur por el Salar Punta Negra y al norte por la Sierra de Limón Verde, y estaría caracterizado, a gran escala, por ser un sistema de fallas transcurrente sinistral (Mpodozis *et al.*, 1993a). Este segmento, de 60-70 km de ancho, se compone de un bloque de basamento, el que estaría limitado, al oeste, por un sistema de fallas de rumbo (Fallas Sierra de Varas, Centinela y de los Toros) y múltiples fallas secundarias, que separa esta zona de la Depresión Central; al este, por la banda de sedimentos cretácicos de la Formación Purilactis, del borde occidental del Salar de Atacama; al norte, por el macizo de Sierra Limón Verde, compuesto de granitos carboníferos y esquistos paleozoicos; y al sur, por la depresión del Salar de Punta Negra.

El bloque de basamento de la Cordillera de Domeyko se habría desplazado hacia el norte, principalmente durante el Eoceno, gracias al sistema de fallas transcurrentes sinistral al oeste, formando una cuenca extensional al sur (Punta Negra), pero que al estar limitado al norte por un bloque rígido (Sierra de Limón Verde), habría traspasado el desplazamiento hacia el este, mediante la rotación dextral de sub-bloques, segmentados del bloque de basamento de Domeyko, en dirección a la cuenca cretácica de Purilactis. Siguiendo el modelo descrito por Beck *et al.* (1993), la rotación de bloques habría generado una serie de cuencas extensionales, las que hoy en día corresponden a salares al interior de la Cordillera de Domeyko (Mpodozis *et al.*, 1993b).

En la zona de estudio los bloques presentes son los Bloques de Sierra Mariposas, Los Morros, y Cerro Quimal (Figura 2.2). Los macizos de Sierra Mariposas y Los Morros se encuentran limitados por el oeste, por la falla Mariposas y la falla Pampa Elvira, respectivamente, que corresponden a fallas de rumbo, subcirculares y cóncavas hacia el este. Estas fallas estarían asociadas a la rotación dextral de estos bloques (Mpodozis *et al.*, 1993b).

El bloque de Cerro Quimal se encuentra limitado al noroeste por las fallas de rumbo, falla de Los Toros, de rumbo NNE, y al sureste por la falla Catorce de Febrero, de rumbo NE, y se encuentra dividido por la falla Cenizas, que sigue una traza subcircular cóncava hacia el este. Según Mpodozis *et al.* (1993b), este bloque se habría desplazado hacia el noreste, asociado a un sistema de escape tectónico, con lo cual la porción oriental del bloque, separado por la falla Cenizas, habría sufrido una rotación dextral.

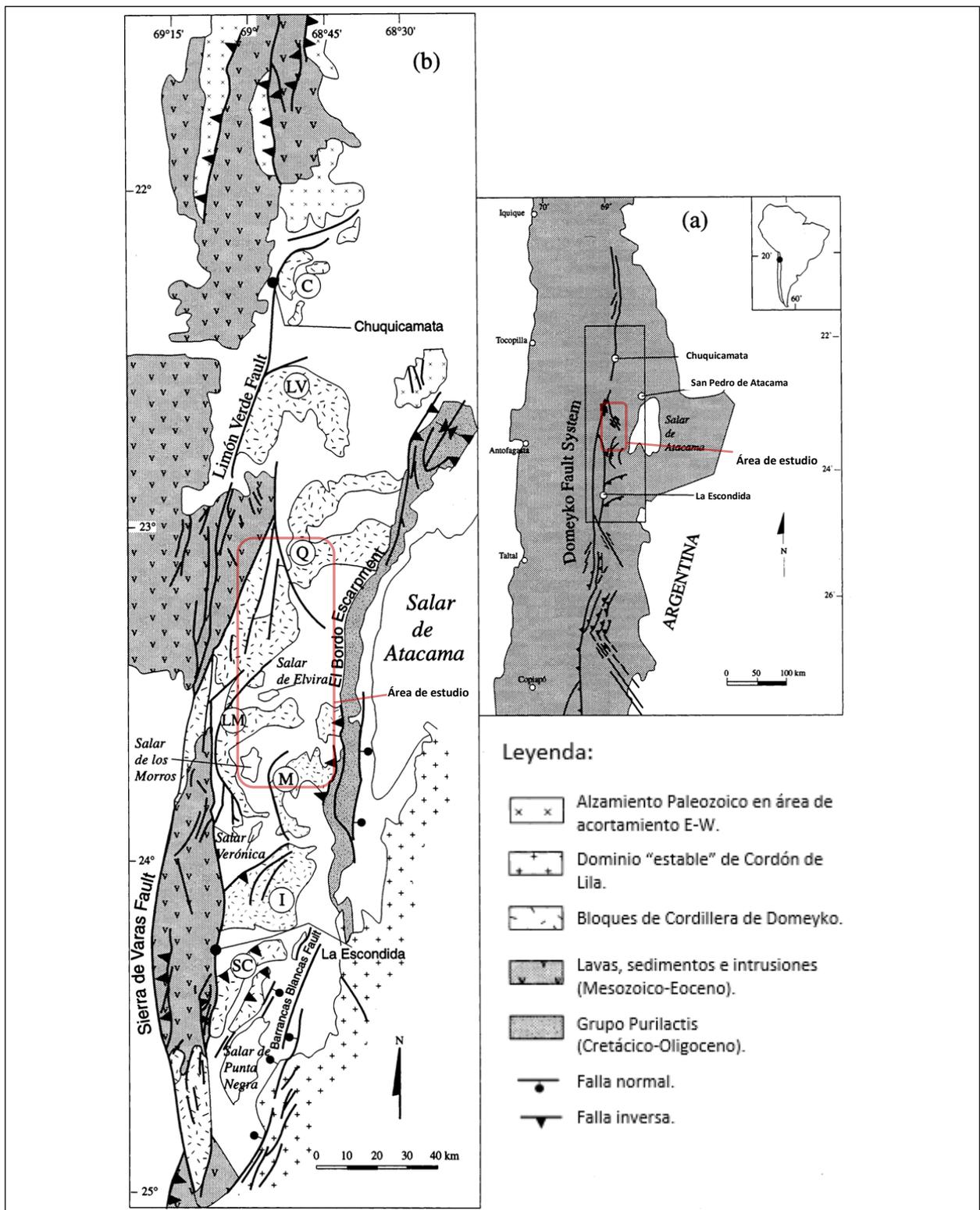


Figura 2.2 Mapa estructural regional. (a) Principales estructuras del Sistema de Falla de Domeyko en el norte de Chile. (b) Mapa morfoestructural esquemático de la Cordillera de Domeyko al oeste del Salar de Atacama. Bloques de basamento: C, Cerros de Chuquicamata; LV, Limón Verde; Q, Quimal; LM, Los Morros; M, Mariposas; I, Imilac; SC, San Carlos. Modificado de Arriagada *et al.* (2000).

## Geología económica

En la región de Antofagasta se reconocen distintos cinturones metalogénicos, paralelos al orógeno, cada uno formado durante una época metalogénica acotada. Uno de estos cinturones, formado durante el Eoceno medio-Oligoceno temprano, el cual se extiende a lo largo de la Cordillera de Domeyko, tiene la mayor concentración de recursos de cobre en el mundo, en donde se han identificado a lo menos 7 depósitos de clase mundial (Sillitoe *et al.*, 2005).

En esta franja metalogénica, una gran cantidad de los depósitos son de tipo pórfido cuprífero, la mayoría con importantes cantidades subordinadas de molibdeno. Los pórfidos cupríferos de mayor importancia económica (Chuquicamata, La Escondida) están alineados de norte a sur mostrando una estrecha relación con las diversas trazas del Sistema de Fallas de Domeyko (Figura 2.2). Estos pórfidos se encuentran cercanos o sobre el trazo de la falla principal del Sistema de Falla de Domeyko, lo que indica que estas fallas habrían servido como conductos para el emplazamiento de los pórfidos (Mpodozis *et al.*, 1993b).

Otro ejemplo de estos pórfidos cupríferos corresponde al depósito de Gaby (Figura 2.3). Este se encuentra en la cuenca Pampa de Elvira (Figura 4.1), cubierta por cerca de 40 m de gravas aluviales. Posee una zona oxidada de hasta 180 metros de espesor, que sobreyace a sulfuros hipógenos (Cameron *et al.*, 2004).

En la Cordillera de Domeyko existen también otros tipos de depósitos, de menor importancia económica que los mencionados anteriormente. Entre estos se encuentran pórfidos cupríferos de edad eocena (Esperanza, Polo Sur) que no parecen tener relación directa con estructuras regionales (Mpodozis *et al.*, 1993b). Además, se reconocen, en esta franja, exóticos de cobre (Mina Sur, El Tesoro, Vicky), formados por drenaje lateral de soluciones supergenas de cobre, desde zonas de enriquecimiento en formación (Sillitoe *et al.*, 2005). Finalmente, existen también cuerpos vetiformes epitermales de plata y oro, y otros depósitos metalíferos menores.

Posterior a la formación de los depósitos de tipo pórfido cuprífero, durante el Mioceno temprano a medio se produjeron fenómenos de alzamiento, donde los depósitos fueron exhumados, siendo afectados por procesos de oxidación, lixiviación y enriquecimiento supergeno, con un fuerte control estructural. Finalmente las zonas oxidadas y enriquecidas fueron preservadas luego del comienzo de la hiperaridez en el norte de Chile, en el Mioceno tardío (Sillitoe *et al.*, 2005; Boric *et al.*, 1990).

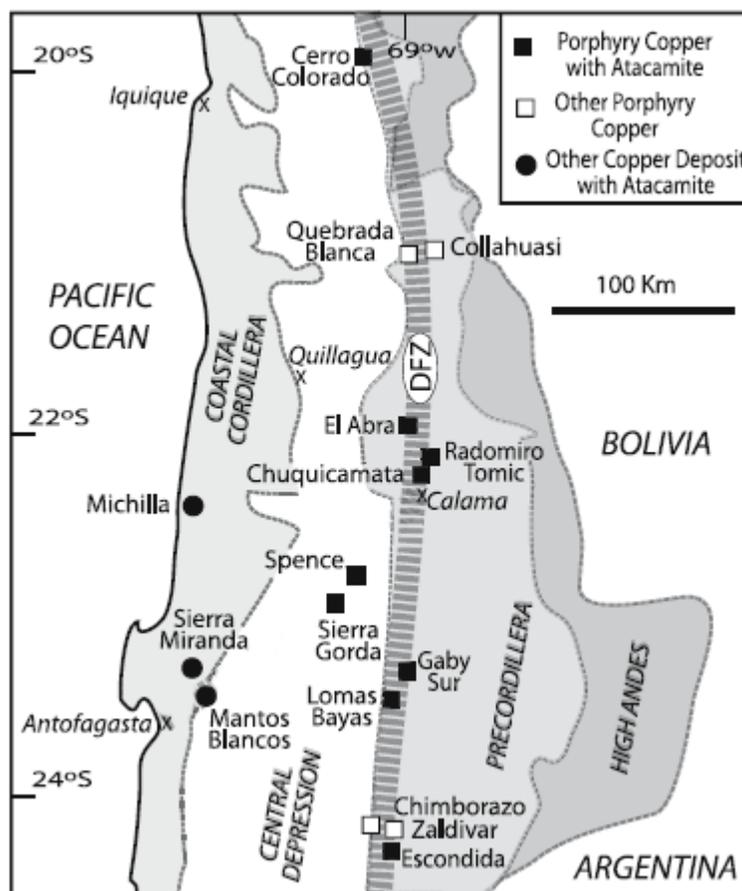


Figura 2.3 Distribucion de algunos porfidos cupriferos en el norte de Chile. DFZ: Sistema de Falla de Domeyko. Modificado de Cameron *et al.* (2007).

## Sector Salar Elvira

### 2.1.1 Geomorfología local

El sector Salar Elvira es una depresión estructural a 2.385 m, rodeada por cerros de elevación entre 3.000 y 3.400 m. Los cerros más altos en este sector son, al sur, el Cerro Jaspeado (2.808 m), al este, Cerro Loma Ancha (3.198 m), y al noroeste, Cerro Punta Amarilla (3.289 m).

Esta cuenca posee un sistema de drenaje interno, que consiste en quebradas efímeras las que convergen hacia el punto más bajo de la depresión. Muchas de las quebradas más pequeñas son tributarias de Quebrada Escondida, la que representa la expresión de agua superficial más grande en la cuenca. Esta quebrada posee una dirección suroeste y esta probablemente controladas por estructuras. La mayoría de drenajes más pequeños no logran llegar al Salar Elvira o a Quebrada Escondida, lo que sugiere que sus flujos ocasionales sufren evaporación o se infiltran antes de llegar a estos (Water Management Consultants, 1997).

## **2.1.2 Geología local**

Los depósitos no consolidados del Terciario (TQt) y Cuaternario (Qal) cubren la mayor parte de este sector. En los bordes norte, oeste y sur de este sector, en los cerros Catorce de Febrero, Matías y Jaspeado, respectivamente, afloran rocas graníticas (Kg, Tg) y granodioríticas (Kgd), las que en algunos sectores se encuentran parcialmente cubiertas por la Formación Tambores (Tt). También, se reconocen rocas de la Formación Purilactis, en el borde noreste, y algunos afloramientos de la Formación Agua Dulce (TrJad1), en el cerro Matías.

En este sector se encuentra la falla 14 de Febrero, la que corresponde a una falla mayor asociada al Sistema de Fallas de Domeyko, de alto ángulo y rumbo NE, y que corta a las rocas del borde noroeste, además, se reconoce un complejo sistema de fallas secundarias, con direcciones norte-sur, noroeste y noreste, que cortan a las rocas intrusivas en los bordes norte, oeste y sur.

## **Sector Salar Los Morros**

### **2.1.3 Geomorfología local**

Este sector corresponde a una depresión estructural, en donde se encuentra el salar Los Morros a 2.313 m, encerrado por cerros con elevaciones entre los 2.800 y 3.400 m. Este salar se encuentra en el límite occidental de la cuenca de drenaje. Los cerros más altos del sector son: al norte, el cerro Jaspeado (2.808 m), al oeste, el cerro Amarillo (2.867 m), al sur, el cerro Redondo (2.892 m), y al sureste, Sierra Mariposas con alturas de hasta 3.219 m.

Hacia el este del salar, las pendientes son suaves, aumentando aproximadamente 250 m de altura en 20 km, en cambio hacia el oeste, las pendientes son más pronunciadas, aumentando 500 m de altura en menos de 5 km (Water Management Consultants, 1997).

Esta cuenca cerrada tiene un sistema de drenaje interno de corrientes efímeras que convergen hacia el salar, en donde gran parte de las quebradas no logran formarse completamente hasta el salar, lo que indicaría que los flujos de agua intermitentes se evaporen o se infiltren en los sedimentos aluviales antes de alcanzar el salar (Water Management Consultants, 1997).

### **2.1.4 Geología local**

En los bordes de la depresión del salar de Los Morros afloran múltiples intrusivos plutónicos, principalmente pórfidos graníticos (Tg) y granitos (Kg), los que, en el borde norte de la cuenca, se encuentran parcialmente cubiertos por la Formación Tambores (Tt). Rocas de la Formación Tambores (Tt) también se encuentran hacia el centro de la cuenca, y están en contacto por falla normal con las evaporitas del salar. De forma más marginal se encuentran rocas de la Formación Agua Dulce (TrJad) en la zona norte de la cuenca. La parte central de la depresión se encuentra cubierta principalmente por depósitos no consolidados aluviales (Qal), y depósitos evaporíticos del salar.

Una falla mayor de rumbo, subcircular y cóncava al este, falla Pampa Elvira, bordea la depresión de salar de Los Morros, cortando las rocas intrusivas occidentales. Además, se reconocen fallas secundarias, en dirección NNW, que cortan los afloramientos de rocas intrusivas en los bordes de la depresión.

## **Sector Llano Mariposas**

### **2.1.5 Geomorfología local**

El sector Llano Mariposas es una depresión, ubicada al oeste de la Cordillera de la Paciencia, que se encuentra rodeada por cerros, los que representan bloques estructurales alzados, con alturas entre los 2.800 y los 4.200 m. En el sector oeste se presenta el Cerro Golondrina (3.064 m), en la zona noroeste, el cerro Mariposas (3.349 m), y en el sector noreste y de mayor importancia, el cerro Quimal (4.278 m).

Esta cuenca es drenada por un sistema de quebradas que descienden desde el norte, donde se encuentran los cerros Quimal y Mariposas. Estos drenajes efímeros convergen hacia el sur de la depresión, para luego formar Quebrada Escondida, y terminar finalmente en el salar Elvira (Water Management Consultants, 1997).

### **2.1.6 Geología local**

En el borde suroeste, se encuentran rocas cretácicas de la Formación Purilactis (JKp), las que se encuentran intruidas por pórfidos graníticos cretácicos-terciarios (Tg). Rocas de la Formación Tambores (Tt) se encuentran en gran parte de los bordes este y suroeste, y en este último, cubren parcialmente granodioritas cretácicas (Kgd), y afloramientos del Terciario de pórfidos graníticos (Tg). Al igual que en las otras cuencas, la porción central de esta depresión se encuentra cubierta por depósitos aterrizados del Terciario (TQt), y principalmente por sedimentos no consolidados aluviales cuaternarios (Qal).

Una falla mayor, falla Cenizas, corta a este sector en dirección noroeste. En el sector oriental, fallas secundarias normales, de rumbo noroeste, cortan a la Formación Tambores (Tt). En el borde suroeste de la cuenca, se reconocen fallas de orientación norte-sur, como noreste-suroeste, que cortan a la Formación Tambores (Tt) y a los intrusivos del sector.

### 3 MARCO HIDROGEOLÓGICO

La información hidrogeológica fue obtenida del informe técnico de Codelco (Water Management Consultants, 1997).

#### **Hidrogeología regional**

La hidrogeología regional se dividió en 5 clases que reflejan similitudes generales en propiedades hidráulicas de las unidades geológicas que las constituyen. Las unidades hidroestratigráficas se caracterizan ante todo por semejanzas en porosidad y permeabilidad. Esta clasificación está basada en la naturaleza (primaria o secundaria) y magnitud de la porosidad y la permeabilidad (Water Management Consultants, 1997).

- Depósitos no consolidados: sedimentos fluviales, glaciales, aluviales, lacustres y eólicos. Estos poseen porosidad y permeabilidad primaria. El almacenamiento y transmisividad de estos depósitos es en general mucho mayor que el de las otras unidades.
- Rocas sedimentarias y mezclas sedimentarias/volcánicas consolidadas: Conglomerados, areniscas, limolitas, calizas y evaporitas, consolidadas solas o con intercalaciones con ignimbritas, brechas o dacitas. La porosidad y permeabilidad de esta unidad es una combinación entre primaria y secundaria dependiendo de la composición y grado de compactación de la secuencia, aunque en general, ambas son muy bajas resultando en rocas relativamente impermeables que actúan como barreras de flujo de agua subterránea.
- Rocas clásticas volcánicas/continentales fracturadas: comprende ignimbritas y andesitas fracturadas, o una combinación de brechas, dacita y andesita intercaladas con sedimentos clásticos continentales. En general domina la porosidad y permeabilidad secundaria. Las características hidráulicas son muy variables, por lo que estas rocas pueden actuar como barrera y también como conductos para el flujo de agua subterránea en la región.
- Rocas volcánicas: consiste en depósitos piroclásticos riolíticos a dacíticos, andesitas y basaltos. En general la magnitud de la porosidad y permeabilidad secundaria es muy baja, por lo que estas rocas poseen almacenamiento y transmisibilidad despreciable a escala regional. Como resultado, estas rocas actúan como barreras de flujo de agua subterránea.
- Rocas intrusivas: Intrusivos graníticos, dioríticos, granodioríticos y porfídicos. Poseen porosidad y permeabilidad secundaria baja a despreciable, resultando en almacenamiento y transmisibilidad insignificante. Se consideran barreras de flujo de agua subterránea.

La recarga en la región ocurre principalmente en la Cordillera de los Andes donde las precipitaciones son en promedio mayores a 250 mm/año (DGA, 1988). Como se mencionó anteriormente, bajo los 4.200 m de altura, la precipitación y evaporación son aproximadamente iguales. Por esta razón, la recarga estará limitada a las zonas que tengan una altura mayor a 4.200 m, las que son escasas en la zona de estudio, por lo que la recarga se espera que sea muy limitada en esta área.

## **Hidrogeología del sector Salar Elvira**

En el sector Salar Elvira, el acuífero se encuentra contenido principalmente en la unidad de depósitos no consolidados y parcialmente en la de rocas sedimentarias y mezcla sedimentaria/volcánica, pero en general este último, junto con la unidad intrusiva, actúan como barreras para el flujo de aguas subterráneas de manera horizontal y vertical. Los límites corresponden a rocas con porosidad y permeabilidad escasa a nula, que representan barreras para el flujo regional de aguas subterráneas. En este caso corresponden a las rocas volcánicas, intrusivas y mezclas sedimentarias y volcánicas.

El acuífero corresponde a un sistema carbonatado que se extiende por 150 km<sup>2</sup> aproximadamente. El nivel freático se encuentra a una altura de 2.520 m s.n.m. en el extremo noreste, y desciende hasta una altura de 2.330 m s.n.m. en el extremo suroeste. El acuífero de este sector tiene un espesor que varía entre 50 y 400 metros, y se encuentra bajo cobertura a profundidades de entre 10 y 120 metros, aumentando de noreste a suroeste.

La principal recarga de agua subterránea en el acuífero sería a través del sector noreste, donde se encuentra conectado al acuífero del sector Llano Mariposas, el que según los niveles de aguas subterráneas se encuentra a mayor altura con respecto al acuífero de Salar Elvira. La conexión entre ambos sectores estaría favorecida por múltiples fallas paralelas, con la misma orientación del flujo de aguas NE-SW, presentes en el sector noreste del sector Salar Elvira.

Por otro lado, debido a que este sector se encuentra a alturas menores a 4.200 m, la recarga a partir de precipitaciones se espera que sea prácticamente nula, debido a la alta tasa de evapotranspiración. Las únicas recargas esperables de este tipo se pueden dar desde el norte, donde se encuentra Cerro Quimal, de gran elevación (4.278 m), y localmente en Quebrada Escondida durante tormentas intensas.

El movimiento de agua subterránea dentro del acuífero será principalmente desde el noreste hacia el suroeste, donde se encuentra el salar Elvira, que corresponde al punto de descarga. El principal mecanismo de descarga de aguas subterráneas será mediante la evaporación en la superficie del salar, aunque también se espera que pueda existir pérdida de aguas subterráneas a través de los límites del acuífero, pero esta será despreciable en comparación con la evaporación en el salar.

## **Hidrogeología del sector Salar de Los Morros**

En esta cuenca las principales unidades hidroestratigráficas son la unidad de depósitos no consolidados, la unidad de rocas sedimentarias y mezcla sedimentaria/volcánica, y la unidad intrusiva. De estas unidades, la primera es la que contiene la mayor parte del acuífero, mientras que la segunda unidad también puede contener agua subterránea, o puede actuar como barrera para el flujo de agua subterránea, junto con la unidad intrusiva. El acuífero se encuentra limitado tanto horizontal como verticalmente por unidades intrusivas, que son relativamente impermeables e impiden el flujo de agua subterránea.

El acuífero corresponde a un sistema carbonatado que abarca un área de aproximadamente 200 km<sup>2</sup>. El nivel freático se encuentra a una altura de 2.370 m s.n.m. en el extremo noreste, y desciende a una altura de 2.190 m s.n.m. en el extremo suroeste, donde se encuentra el salar de los Morros. El acuífero en este sector posee espesores que varían entre 50 y 400 metros, y el nivel de aguas subterráneas se encuentra bajo cobertura a profundidades de entre 50 y 130 metros, aumentando de noreste a suroeste.

Al igual que en la cuenca Pampa Elvira, las precipitaciones son escasas en la zona, por lo que la recarga por precipitaciones es despreciable, y solamente se puede esperar recarga de este tipo localmente durante intensas tormentas, las que ocurren en raras ocasiones.

La recarga desde aguas subterráneas probablemente ocurre desde el norte, donde se encuentra Salar Elvira, a través de granitos fracturados, aunque se espera que sea muy baja. En cantidades bastante menores, pueden existir flujos de agua subterránea a través de los sedimentos no consolidados, en donde exista comunicación hidráulica con el acuífero del sector Salar Elvira, el que, según los niveles de aguas subterráneas, se encuentra a mayor altura que el acuífero de Salar de Los Morros.

El movimiento de agua subterránea será principalmente de noreste a suroeste, aunque también se espera movimiento de aguas subterráneas desde los cerros que rodean la cuenca hacia el punto de descarga, que corresponde al Salar de Los Morros.

## **Hidrogeología del sector Llano Mariposas**

En esta cuenca el agua subterránea se encuentra contenida principalmente en los sedimentos terciarios y cuaternarios de la unidad de depósitos no consolidados. Bajo esta se encuentran rocas de la Formación Tambores (unidad de rocas sedimentarias y mezcla sedimentaria/volcánica), la que es considerada como la base del acuífero, pero dependiendo de la conectividad hidráulica con la unidad sobreyacente, puede contener parte de la porción inferior del acuífero. La unidad hidroestratigráfica intrusiva define la base del acuífero hacia el noroeste y suroeste.

El acuífero del sector Llano Mariposas corresponde a un sistema carbonatado que se extiende en un área de 230 km<sup>2</sup> aproximadamente. El nivel freático se encuentra a una altura de 3.100 m s.n.m. en el extremo noreste, en los faldeos del cerro Quimal, y desciende hasta una altura de 2.700 m s.n.m. en el extremo suroeste. El espesor del acuífero varía entre 50 a 450 metros, y se encuentra bajo cobertura a profundidades de entre 40 y 120 metros.

Esta cuenca se encuentra bajo los 4.200 m de altura, por lo que la recarga por infiltración de precipitaciones es despreciable. Las únicas recargas esperables de este tipo se pueden dar desde el Cerro Quimal al NE de la cuenca, y al igual que en las otras cuencas, durante intensas tormentas. Además, se espera que las recargas desde aguas subterráneas también sean mínimas.

El movimiento de aguas subterráneas en la cuenca será principalmente en dirección noreste-suroeste. Además, puede existir flujos de agua subterráneas desde alturas mayores en el Llano de la Paciencia, al este de la cuenca.

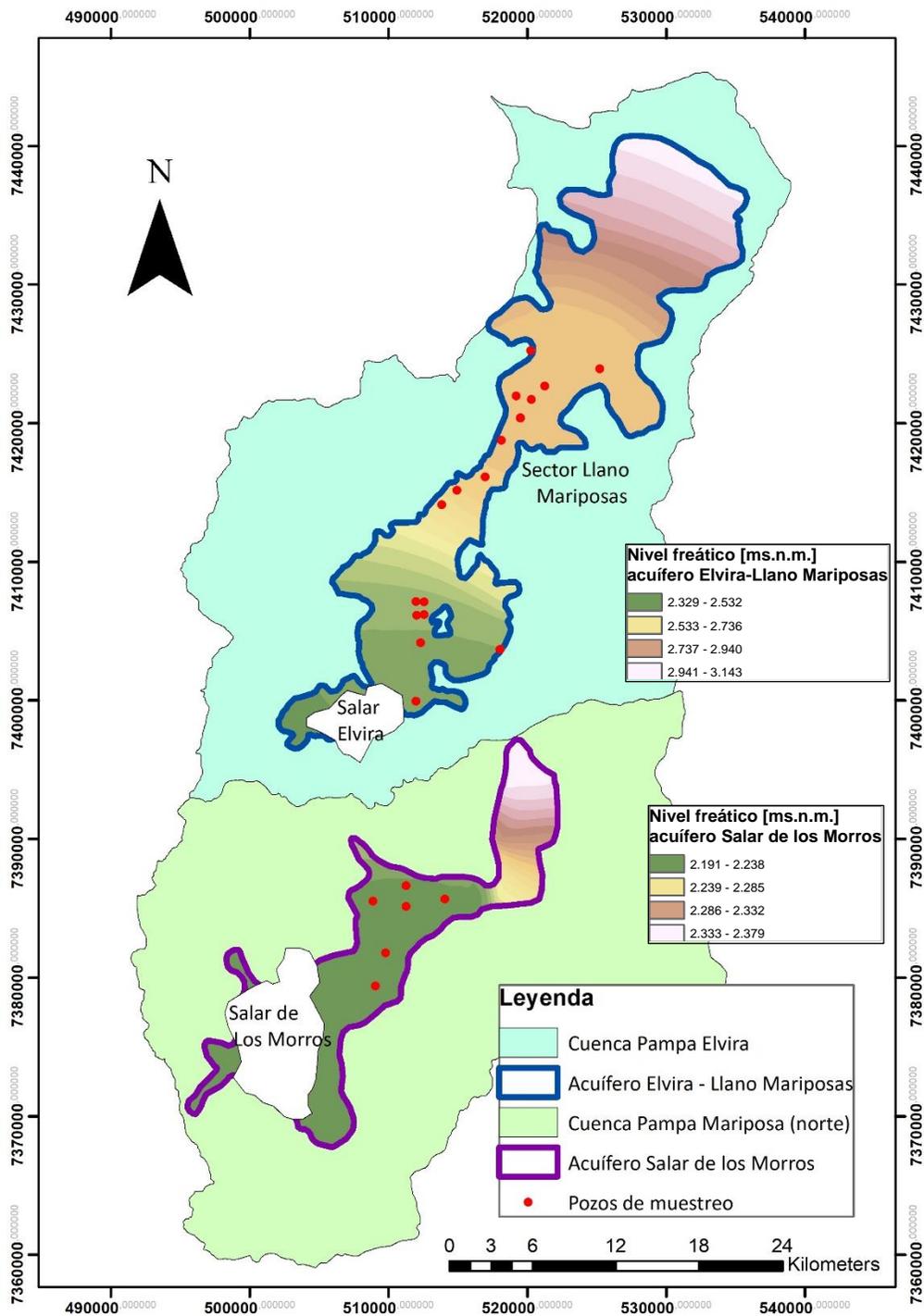


Figura 3.1 Mapa hidrogeológico de la zona de estudio. Se muestran los niveles isofreáticos de cada acuífero, indicando niveles mayores en los extremos NE respecto del SW para ambos acuíferos. Modificado de archivos de Codelco.

## 4 MUESTRAS DE AGUAS SUBTERRANEAS

La información geoquímica de aguas subterráneas usada, corresponde a una base de datos generados por Codelco a partir de los controles mensuales de aguas subterráneas en pozos ubicados en las cuencas Pampa Elvira y Pampa Mariposas (norte). La base de datos incluye 977 muestras de aguas subterráneas pertenecientes a 25 pozos, que fueron tomadas mensualmente entre mayo de 2013 y agosto de 2016. La distribución de los distintos pozos se observa en la Figura 4.1.

El control de las aguas subterráneas incluye el análisis de 24 parámetros, dentro de los cuales se encuentran elementos y especies iónicas mayores, menores y trazas ( $\text{SO}_4$ ,  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{CO}_3$ , Cl, Ca, K, Mg, Na, Al, As, Cd, Cr, Cu, F, Fe, Li, Mn, Mo, Pb, Si y Zn), y además incluye distintos parámetros físico-químicos (pH, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos).

### Metodología de muestreo

La metodología de muestreo de aguas subterráneas se realiza según los protocolos internos de Codelco, que siguen las normas NCH 411/11-1998: Guía para el muestreo de agua subterráneas, perteneciente al Instituto Nacional de Normalización.

El procedimiento de muestreo depende del tipo de pozo, el que, según su uso, pueden ser de producción o de exploración. En general los pozos de producción presentan bombas de impulsión sumergidas, que conducen el agua hacia la superficie, a diferencia de los pozos de exploración. La Tabla 4.1 presenta el tipo de pozos de muestreo y el promedio del nivel freático en cada uno.

Para el muestreo en pozos con bomba, se debe purgar el agua que ha estado en contacto con la tubería, ya que la muestra puede presentar contaminación de algunos metales extraídos de la instalación.

Para el muestreo de pozo sin bomba, se debe verificar que el pozo no presente obstrucciones o se encuentre derrumbado. Para este muestreo es necesario ocupar un muestreador de tipo Bailer o similar, y una piola que supere la distancia desde la superficie hasta 5 metros bajo el nivel freático. La primera extracción de agua es usada para ambientar los distintos instrumentos a utilizar. Luego se debe introducir el bailer tantas veces sea necesario para completar el volumen adecuado a la batería analítica en el recipiente colector de muestra.

En ambos casos, las mediciones *in situ* de parámetros físico-químicos (pH, salinidad, conductividad, temperatura, potencial redox, entre otros) se realizan mediante un equipo multiparámetro (Hanna HI-9828). El dato de la medición que se considera es aquel cuando el instrumento se estabiliza. Luego de cada medición se debe limpiar los electrodos del equipo y el vaso usado, con agua destilada. Una vez finalizadas las mediciones, las sondas deben ser guardadas, al igual que el electrodo de pH/ORP en solución de preservación. El equipo multiparámetro debe ser calibrado una vez a la semana.

Para la colecta de la muestra, se deben enjuagar los frascos como mínimo 3 veces con el agua que se recolectará. Los frascos se llenan completamente con la muestra colectada desde el recipiente colector de muestra, en el caso de los pozos sin bomba. Para los pozos con bomba, se colecta el agua desde la válvula. A las muestras obtenidas se les adicionará el preservante correspondiente de acuerdo con el análisis a efectuar en laboratorio, siguiendo las recomendaciones para preservación de muestras de aguas según la norma NCH-411/3: Guía sobre la preservación y manejo de las muestras. Una vez finalizado el muestreo, se lava con agua destilada el muestreador tipo Bailer y el recipiente colector, para evitar contaminación en muestreos posteriores.

**Tabla 4.1: Tipos de pozos muestreados y profundidad promedio del nivel freático.**

<b>Código pozo</b>	<b>Profundidad nivel freático (m)</b>	<b>Tipo de pozo</b>
<b>AR-1428</b>	124	de exploración
<b>AREL-1</b>	34	de exploración
<b>AREL-2</b>	12	de exploración
<b>AREL-3</b>	41	de exploración
<b>ARMA-10</b>	53	de exploración
<b>ARMA-3</b>	67	de exploración
<b>ARMA-6</b>	51	de exploración
<b>ELB-1</b>	-	con bomba
<b>ELB-3</b>	-	con bomba
<b>ELB-4</b>	-	con bomba
<b>ELB-5</b>	-	con bomba
<b>ELE-3</b>	127	de exploración
<b>LMB-1</b>	84	con bomba
<b>LMB-2</b>	74	con bomba
<b>LMB-4</b>	127	con bomba
<b>LMB-5</b>	79	con bomba
<b>MAB-2</b>	-	con bomba
<b>MAB-5</b>	-	con bomba
<b>MAB-6</b>	-	con bomba
<b>MAB-7</b>	-	con bomba
<b>MAB-8</b>	-	con bomba
<b>MAE-4</b>	184	de exploración
<b>MAE-5</b>	103	de exploración
<b>PMB99-1</b>	56	de exploración
<b>RHE99-2</b>	49	de exploración



Figura 4.1 Ubicación de pozos de muestreo. Los cuadros marcan los sectores de estudio. Se incluye la ubicación de cuerpos mineralizados y botadero del cluster de Gaby, y se indican los bordes de las cuencas.

## Análisis químico

Los análisis químicos de las muestras de aguas subterráneas realizados en laboratorio, fueron realizados mediante distintas técnicas dependiendo del tipo de parámetro analizado. En el caso de los elementos Al, As, Ca, Cd, Cr, Cu, F, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Pb, Si y Zn, la medición de las concentraciones se realiza mediante espectrofotometría de absorción atómica con llama, mientras que el sulfato y TDS se realiza mediante gravimetría, y la alcalinidad mediante volumetría. Las concentraciones de las distintas especies se encuentran en fracción total.

## Validación de los análisis químicos

Los resultados geoquímicos de las distintas muestras fueron evaluados para comprobar la calidad del análisis químico. La evaluación se realizó mediante el cálculo manual del porcentaje de error del balance iónicos de las especies mayores (Cl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>, Ca, Na, K y Mg). El porcentaje de error del balance iónico se expresa como:

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

en donde las concentraciones de cationes y aniones se encuentran en meq/l. Las muestras que presentan un porcentaje de error del balance iónico entre -5 y 5% son consideradas aceptables, mientras que el resto de las muestras con un porcentaje de error mayor no son consideradas para los análisis posteriores de este estudio, ya que podría significar que la concentración de alguna o varias especies iónicas pueden estar sobreestimadas o subestimadas. Finalmente, cerca del 10% del total de las muestras no pasan este control. La Tabla 4.2 muestra el número de muestras por pozo, que serán usadas para los análisis posteriores.

**Tabla 4.2 Cantidad de muestras por pozo con porcentajes de error de balance iónico menor al 5%.**

Código pozo	Número muestras/ total muestras	Código pozo	Número muestras/ total muestras
AR-1428	1/1	LMB-2	35/35
AREL-1	42/42	LMB-4	33/34
AREL-2	30/48	LMB-5	22/34
AREL-3	38/39	MAB-2	40/46
ARMA-10	38/39	MAB-5	42/47
ARMA-3	37/40	MAB-6	38/41
ARMA-6	44/45	MAB-7	49/51
ELB-1	34/35	MAB-8	47/50
ELB-3	37/39	MAE-4	38/40
ELB-4	56/59	MAE-5	40/40
ELB-5	21/22	PMB99-1	34/35
ELE-3	39/39	RHE99-2	13/41
LMB-1	33/35	<b>Total</b>	<b>881/977</b>

## 5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se presentan los resultados del análisis estadístico univariable realizado a los datos geoquímicos de las muestras de aguas subterráneas de los tres sectores de estudio. Este análisis se realiza solo para algunas variables según el porcentaje de datos censurados, considerando solo los datos de las muestras cuyo análisis químico fue considerado aceptable en el capítulo 4. Se incluyen también las estadísticas básicas de los resultados de análisis de otras zonas del norte de Chile realizados por otros autores, para comparar con los resultados obtenidos en la zona de estudio.

### Censura de datos

Los datos censurados, corresponden a aquellos cuyos valores reportados se encuentran bajo el límite de detección de la técnica o instrumento analítico.

**Tabla 5.1: Porcentaje de datos menores al límite de detección, por variable, de los tres sectores de estudio. De color rojo los valores mayores al 20%.**

Variable	Límite inferior de detección (ppm)	% Censura datos Llano Mariposas	% Censura datos Salar Elvira	% Censura datos Salar de los Morros
pH	-	0	0	0
CT	-	0	0	0
TDS	-	0	0	0
SO <sub>4</sub>	-	0	0	0
HCO <sub>3</sub>	5,0	0	0	0
CO <sub>3</sub>	5,0	100	100	46,6
Cl	4,0	0	0	0
Ca	-	0	0	0
K	0,10	0	0	0
Mg	-	0	0	0
Na	-	0	0	0
Al	0,20	48,8	72,4	42,8
As	0,02	66,5	64,3	77,1
Cd	0,01	96,1	90	90,7
Cr	0,02	25,7	40,7	22
Cu	0,10	99,2	96,8	98,3
F	0,05	11,2	14,5	9,3
Fe	0,30	38,8	60,2	0
Li	0,03	0	0	0
Mn	0,01	40,2	53,4	0
Mo	0,10	55,3	63,3	36,4
Pb	0,20	99,2	100	100
Si	3,0	1,2	0	60,6
Zn	0,08	80,4	86,9	89,4

Antes de realizar los cálculos estadísticos, se eliminan todos los elementos y especies iónicas cuyo análisis presenta más de un 20% de datos censurados. Este paso es importante, ya que la presencia de datos bajo el límite de detección implica serios problemas de interpretación para el análisis de datos (Helsel & Hirsch, 2002). Se ha escogido limitar el nivel de censura a 20% ya que para porcentajes mayores los parámetros estadísticos calculados presentan errores muy grandes (Gilliom, 1986).

Para los elementos y especies iónicas que presentan menos del 20% de datos censurados, se usó el método de sustitución simple, el cual reemplaza los datos censurados bajo el límite de detección por un valor igual a la mitad de este límite (Helsel, 1988). Este método es ampliamente utilizado, sin embargo, no posee base teórica (Helsel, 1990), aun así, se ha demostrado experimentalmente que posee mejores resultados que la sustitución simple por valores iguales a 0, o al límite de detección, y presenta errores similares frente a otros métodos más complejos, para niveles de censura de 20% o incluso hasta 40% (Helsel, 1988; Gilliom, 1986).

Finalmente, los elementos y especies iónicas que no son considerados para el análisis estadístico se encuentran en color rojo en la . En esta tabla se observa que una gran cantidad de especies, en particular elementos menores y traza, presentan altos porcentajes de datos bajo los límites de detección. Algunos elementos, como As, Cu, Fe, Mo, Pb, y Zn, son relevantes para este estudio por lo que deberán ser tratados de otra forma para su análisis.

## Estadística Univariante

El análisis estadístico univariante se realiza para los tres sectores de estudio. En la Tabla 5.2 se muestran los resultados, considerando estadísticos básicos como mediana, para definir la posición de los datos, y desviación estándar robusta junto con el coeficiente de variación robusta para definir la dispersión de datos.

Los datos hidrológicos presentan típicamente distribuciones no-normales, con asimetrías positivas y *outliers*, que corresponden a observaciones considerablemente mayores a la mayoría de los datos. Estas características influyen en los análisis estadísticos, por lo que simples mediciones como la media pueden presentar importantes sesgos. Es por este motivo que se ha elegido a la mediana en vez de la media, para la medición de la posición de los datos, ya que este parámetro estadístico es más resistente frente a la presencia de *outliers* y será más representativos de los datos (Helsel & Hirsch, 2002).

### 5.1.1 Zonas de estudio

La Tabla 5.2 presenta los estadísticos básicos por sector de estudio, considerando solo las variables que cumplen con más de un 80% de datos sobre el límite de detección. Se puede ver que, para la mayoría de los elementos en los distintos sectores de estudio, el coeficiente de variación es bajo, lo que indica una baja variabilidad de los datos. Por otro lado, se observa que los elementos que presentan una amplia variabilidad respecto a la mediana son solamente los elementos Fe y Mn del sector Salar de los Morros, los que además registran grandes diferencias entre las concentraciones máximas y mínimas.

**Tabla 5.2: Estadística básica general para los parámetros físico-químicos (valores) y especies disueltas (concentraciones) de las muestras de agua subterránea de los sectores de estudio.**

Variable	Unidad	Muestras	Mediana	Desv. est. rob.	Covarianza % rob.	Rango valores	Mínimo	Máximo
<b>Llano Mariposas</b>								
pH (25°C)		490	7,7	0,2	2,9	22,0	6,0	8,2
CT (25°C)	uS/cm	490	8300	1376	16,6	103036	4463	107500
TDS	ppm	490	6756	1204	17,8	53236	2884	56120
SO <sub>4</sub>	Ppm	490	3552	743	20,9	3659	1701	5360
HCO <sub>3</sub>	Ppm	490	49,0	33,4	68,1	198	13,0	211
Cl	ppm	490	638	132	20,7	2845	412	3257
Ca	ppm	490	443	80,7	18,2	999	5,2	1004
K	ppm	490	5,3	3,0	58,0	44,0	0,1	44,2
Mg	ppm	490	55,9	31,4	56,2	100	16,6	116
Na	ppm	490	1491	392	26,3	1796	800	2596
F	ppm	490	1,2	0,5	43,2	1975	0,0	2,0
Li	ppm	490	0,3	0,2	66,2	0,9	0,1	1,0
Si	ppm	490	7,3	3,3	45,7	32,2	1,5	33,7
<b>Salar Elvira</b>								
pH (25°C)		221	7,3	0,3	4,1	4,4	3,8	8,2
CT (25°C)	uS/cm	221	12480	6749	54,1	121251	7910	129161
TDS	ppm	221	8936	4400	49,2	30636	5260	35896
SO <sub>4</sub>	Ppm	221	2703	505	18,7	3394	1163	4558
HCO <sub>3</sub>	Ppm	221	41,0	13,0	31,6	75,0	5,0	80,0
Cl	ppm	221	2695	2646	98,2	15770	677	16448
Ca	ppm	221	966	841	87,0	5482	205	5688
K	ppm	221	16,6	8,3	49,9	77,9	5,0	82,9
Mg	ppm	221	79,3	24,9	31,4	434	9,7	444
Na	ppm	221	1883	458	24,3	8262	1270	9532
F	ppm	221	1,3	0,3	22,8	2,2	0,03	2,2
Li	ppm	221	0,3	0,2	55,0	2,7	0,2	2,9
Si	ppm	221	7,8	2,1	26,6	23,8	3,5	27,3
<b>Salar de los Morros</b>								
pH (25°C)		170	8,5	1,2	14,0	6,1	3,5	9,6
CT (25°C)	uS/cm	170	20700	3032	14,6	90934	1940	92874
TDS	ppm	170	14063	1369	9,7	59755	1445	61200
SO <sub>4</sub>	Ppm	170	2473	445	18,0	1976	1442	3419
HCO <sub>3</sub>	Ppm	170	46,0	16,3	35,5	126	5,0	131
Cl	ppm	170	5745	357	6,2	33414	3004	36419
Ca	ppm	170	1045	219	21,0	3524	132	3656
K	ppm	170	19,6	8,1	41,3	51,9	8,4	60,3
Mg	ppm	170	90,6	45,3	50,0	655	37,9	693
Na	ppm	170	3339	738	22,1	15987	1928	17915
F	ppm	170	1,2	0,5	43,2	1,9	0,03	1,9
Li	ppm	170	0,2	0,04	24,7	3,7	0,03	3,8
Fe	ppm	170	5,5	8,2	148	256	1,1	258
Mn	ppm	170	0,2	0,3	128	70,0	0,01	70,0

\*TDS: Sólidos totales disueltos; CT: Conductividad eléctrica.

### 5.1.2 Comparación con aguas subterráneas de otros yacimientos y aguas superficiales regionales

Se comparan estadísticos básicos de los análisis de aguas subterráneas realizados por otros autores de los yacimientos Spence e Inca de Oro ambos tipo pórfido cuprífero, y de los análisis de aguas superficiales de la cuenca del río Loa (Anexo A, Tabla A.2). Este último se considera como un background regional.

Los datos de las aguas del río Loa fueron obtenidos de la base de datos de la DGA, y corresponden a muestreos realizados entre mayo 2013 y agosto 2016. Los datos de análisis geoquímicos de muestras de aguas subterráneas de Spence se obtienen de Leybourne y Cameron (2006, 2008) y los de Inca de Oro, de Soto (2012). En ambos casos, las muestras de aguas subterráneas fueron obtenidas tanto dentro del yacimiento como en las cercanías de estos.

Inca de Oro corresponde a un pórfido cuprífero en la región de Atacama, que presenta una zona oxidada bien desarrollada, cubierta por 40 a 230 metros de grava. Spence corresponde a un pórfido cuprífero ubicado en la región de Antofagasta, que también presenta una zona oxidada bien desarrollada con presencia de atacamita, y que tiene una cubierta de gravas de 30 a 180 metros de espesor (Leybourne & Cameron, 2008). El nivel de aguas freáticas se encuentra a una profundidad aproximada de 50 a 90 metros en Spence, y 58 a 100 metros en Inca de Oro (Soto, 2012).

La Tabla 5.3 muestra la mediana, valor máximo y mínimo (solo para el pH) de diferentes parámetros físico-químicos y concentraciones de elementos y especies disueltas, calculados con los datos de las muestras de aguas de las zonas de estudio (Llano Mariposas, Salar Elvira y Salar de los Morros), Spence, Inca de Oro y río Loa. Además, en la Figura 5.1 se presentan las muestras de los sectores de estudio junto con las de Spence e Inca de Oro, para algunos elementos.

En los distintos sectores la mediana del pH presenta valores alcalinos parecidos, aunque en el Salar de los Morros el pH tiende a ser más alto. En los sectores de Salar de Elvira, Salar de los Morros y Spence se registran los valores de pH más ácidos (3,8, 3,5, 4,7, respectivamente) y además presentan una mayor variabilidad, pero tanto en estos sectores como en los otros, los pH son en general neutros a alcalinos (Figura 5.1).

En cuanto a los sólidos totales disueltos, se observa que la mediana de los sectores de estudio aumenta desde Llano Mariposas, a Salar Elvira, hasta Salar de los Morros. Por otro lado, se puede ver que las concentraciones TDS en estos sectores son hasta un orden de magnitud mayor a las de Inca de Oro, que presenta una mediana de 594 ppm, mientras que en Spence la mediana es mucho mayor, con una mediana de 26.050 ppm. En este último sector los altos valores de TDS son atribuidos a una mezcla de aguas freáticas con aguas salinas profundas, que ascendieron por estructuras activas (Leybourne & Cameron, 2006; Cameron *et al.*, 2007).

Respecto al sulfato se observa que los sectores de estudio presentan una mediana de hasta un orden de magnitud mayor que las aguas de Inca de Oro y del río Loa (mediana de 518 y 204, respectivamente), pero son menores a las presentes en Spence (mediana de 6.102 ppm).

En cuanto a elementos menores y traza, se observa que en los sectores de estudio las concentraciones de Fe son mayores a las del río Loa. Además, en los sectores Salar Elvira y Salar de los Morros se registran concentraciones máximas que son hasta un orden de magnitud mayor a

los máximos de Inca de Oro y Spence, mientras que en Llano Mariposas solo son comparables con las de estos yacimientos. Respecto al Cu, Mo y Zn, se puede ver que los máximos registrados en los sectores de estudio también son mayores en al menos un orden de magnitud que los máximos registrados en el río Loa, y son comparables o mayores a las de Inca de Oro y Spence.

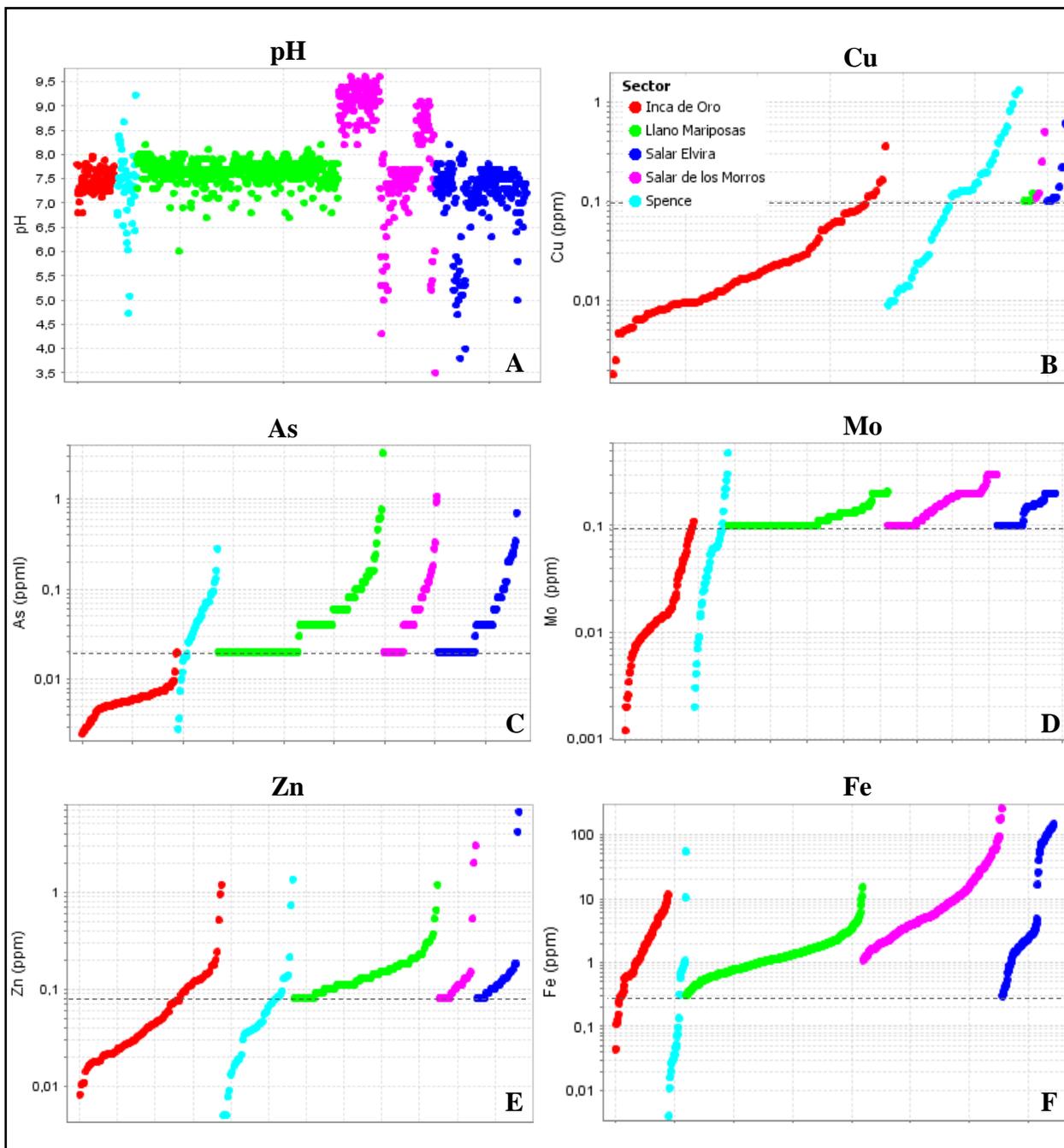


Figura 5.1 Valores de pH y concentraciones (en escala logarítmica) de As, Cu, Fe, Mo y Zn de muestras de aguas subterráneas de Llano Mariposas, Salar Elvira, Salar de los Morros, Spence e Inca de oro. Las concentraciones se distribuyen según la frecuencia acumulada por sector. Las líneas punteadas indican los límites de detección de los análisis químicos realizados por Codelco. Datos extraídos de Leybourne y Cameron (2006, 2008), y Soto (2012).

**Tabla 5.3: Hidrogeoquímica de sectores de estudio, Spence, Inca de Oro, y cuenca del río Loa. Datos de Leybourne y Cameron (2006, 2008), Soto (2012), DGA. Concentraciones en ppm. LM: Llano Mariposas; SE: Salar Elvira; SM: Salar de los Morros.**

Variable	Mediana						Valor máximo						Valor mínimo					
	LM	SE	SM	Spence	Inca de oro	Río Loa	LM	SE	SM	Spence	Inca de oro	Río Loa	LM	SE	SM	Spence	Inca de oro	Río Loa
<b>pH</b>	7,7	7,3	8,9	7,3	7,4	8,1	8,2	8,2	9,6	9,2	7,9	9,9	6,0	3,8	3,5	4,7	6,8	5,7
<b>TDS</b>	6756	8936	13918	26051	594	-	56120	35896	61200	145020	1326	-	-	-	-	-	-	-
<b>Ca</b>	443	967	1077	580	163	158	1005	5688	3656	4018	631	347	-	-	-	-	-	-
<b>K</b>	5	17	18	85	5	38	44	83	60	718	25	225	-	-	-	-	-	-
<b>Mg</b>	56	79	80	263	12	79	117	444	693	1953	21	188	-	-	-	-	-	-
<b>Na</b>	1491	1883	3328	8055	123	614	2596	9532	17915	52974	221	3376	-	-	-	-	-	-
<b>Cl</b>	638	2695	5797	7237	69	819	3257	16449	36419	80467	159	6055	-	-	-	-	-	-
<b>HCO3</b>	49	41	40	153	59	-	211	80	131	629	73	-	-	-	-	-	-	-
<b>SO4</b>	3553	2703	2480	6102	518	204	5360	4558	3419	10045	1867	1431	-	-	-	-	-	-
<b>Al</b>	-	-	-	0,05	0,82	<0,5	17,00	6	1,20	0,86	9,37	1,71	-	-	-	-	-	-
<b>As</b>	-	-	-	0,04	0,01	0,65	3,20	0,70	1,06	0,28	0,02	2,69	-	-	-	-	-	-
<b>Cd</b>	-	-	-	-	0,00	<0,01	0,02	0,02	0,11	-	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-
<b>Cr</b>	0,02	0,02	0,03	-	0,01	<0,05	0,09	0,36	0,52	-	0,05	<0,05	-	-	-	-	-	-
<b>Cu</b>	-	-	-	0,12	0,02	<0,02	0,12	0,61	0,50	1,3	0,36	0,04	-	-	-	-	-	-
<b>Fe</b>	0,66	-	8,80	0,07	1,46	0,08	15,09	147	258	54,45	11,56	7,79	-	-	-	-	-	-
<b>Li</b>	0,28	0,31	0,17	5,45	0,03	-	0,98	2,85	3,75	10,06	0,06	-	-	-	-	-	-	-
<b>Mn</b>	0,02	-	0,33	0,19	0,14	0,04	0,89	6,69	70,00	3,95	1,68	2,54	-	-	-	-	-	-
<b>Mo</b>	-	-	0,10	0,05	0,01	<0,05	0,21	0,20	0,30	0,48	0,11	<0,05	-	-	-	-	-	-
<b>Pb</b>	-	-	-	0,00	0,01	<0,07	0,32	0,10	-	0,02	0,13	<0,07	-	-	-	-	-	-
<b>Si</b>	7,30	7,80	-	8,20	15,80	-	33,70	27,30	7,10	33,80	35,49	-	-	-	-	-	-	-
<b>Zn</b>	-	-	-	0,04	0,04	<0,01	1,18	6,69	3,00	1,34	1,17	0,14	-	-	-	-	-	-

## 6 GEOQUIMICA DE AGUAS SUBTERRANEAS

En esta sección se presentan los resultados de las mediciones y análisis de las distintas variables físico-químicas y geoquímicas, de los muestreos de aguas subterráneas realizados en los distintos sectores de estudio.

### Sector Salar de los Morros

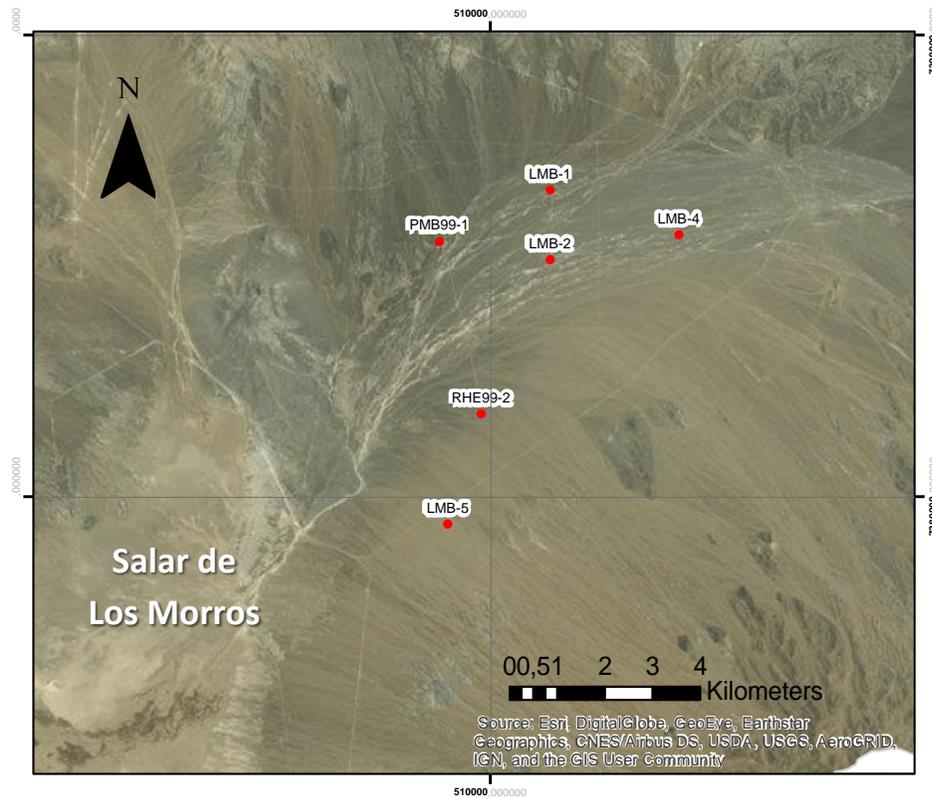


Figura 6.1 Ubicación de pozos de muestreo en sector Salar de los Morros.

#### 6.1.1 Parámetros Físico-Químicos

El pH de las aguas subterráneas del Sector Salar de los Morros se puede ver en color gris en la Figura 6.2, el que considera todos los muestreos realizados en la zona desde el 2013 al 2016. En promedio, el pH tiene un valor de 8,4, con valores que oscilan entre 7,1 y 9,6 (sin considerar *outliers*). Esto indica que las aguas subterráneas de este sector son neutras a alcalinas. Según lo descrito por Hem (1985), gran parte de estas muestras se encuentran por sobre el rango esperado para aguas naturales sin contaminación, que debiese ser entre 6,5 y 8,5, aunque valores mayores o menores a estos pueden existir debido a distintos procesos y reacciones naturales ocurriendo en las aguas subterráneas, por ejemplo, reacciones de disolución de carbonatos o hidrólisis de feldespatos.

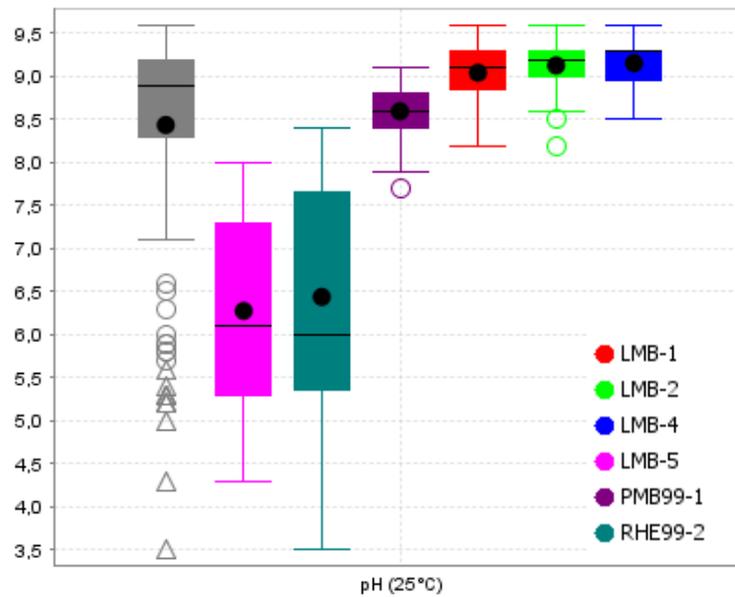


Figura 6.2 Gráfico *Box Plot* del pH de aguas subterráneas del sector Salar de los Morros. En gris se consideran los muestreos de todo el sector, y los otros colores distinguen los distintos pozos de muestreo. Los círculos representan *outliers* ( $>1,5$  IQR de la media) y los triángulos *far outliers* ( $>3$  IQR de la media).

En la Figura 6.2 se puede ver que las aguas subterráneas de los pozos LMB-1, LMB-2 y LMB-4 poseen valores relativamente similares con un pH alcalino, al igual que en el punto PMB99-1, aunque este último muestra un pH promedio relativamente menor a los antes mencionados. Algunas muestras en los pozos LMB-2 y PMB99-1 presentan un pH anómalo bajo, con respecto a los promedios locales de estos pozos.

Los valores de pH más bajos del sector corresponden a muestras tomadas en los pozos LMB-5 y RHE99-2, ubicados al SW de los otros pozos. El pH promedio en estos pozos es de 6,3 y 6,4, respectivamente, es decir poseen un pH levemente ácido, aunque los valores oscilan ampliamente entre 4,3 y 8 en el caso de LMB-5 y entre 3,5 y 8,4 en el caso de RHE99-1. Estos pH promedio son notoriamente más bajos que el resto de los pozos y representan anomalías o *outliers* con respecto a las demás aguas del sector Salar de los Morros.

Los sólidos totales disueltos (TDS) en las aguas subterráneas representa el total de precipitados que se obtienen al evaporar una muestra de agua filtrada. Este parámetro también es llamado salinidad y dependiendo de la cantidad presente, el agua subterránea se puede clasificar como agua dulce ( $<1.000$  mg/l TDS), agua salobre (1.000 a 20.000 mg/l TDS), agua salada (20.000 a 35.000 mg/l TDS) y salmuera ( $>35.000$  mg/l TDS) (Drever, 1997).

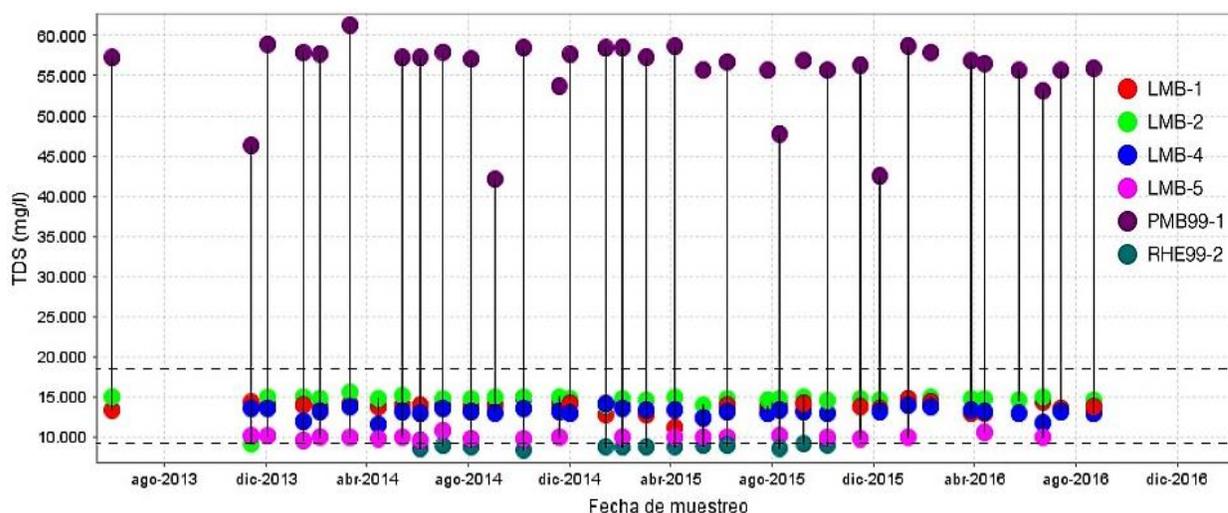


Figura 6.3 TDS de las muestras de aguas subterráneas del sector Salar de los Morros, tomadas desde junio de 2013 a agosto de 2016. Las líneas punteadas indican los límites superior e inferior del *background*. Las líneas continuas corresponden a muestras tomadas en una misma fecha.

En la Figura 6.3 se muestran todas las mediciones de TDS obtenidas en los muestreos realizados en los distintos pozos del sector Salar de Los Morros. Se puede ver en esta figura que los puntos LMB-1, LMB-2, LMB-4, LMB-5 y RHE99-2 presentan valores TDS entre los 1.000 y 20.000 mg/l, por lo que las aguas subterráneas presentes se clasifican como aguas salobres, en cambio en PMB99-1 el rango de valores se encuentra sobre los 35.000 mg/l TDS, por lo que el agua subterránea en este punto corresponde a una salmuera.

En la Figura 6.3 se puede ver que el punto PMB99-1 presenta solo valores anómalos (*far outliers*), con un promedio TDS de 55.625 mg/l, muy por sobre el umbral superior del *background* (18.232 mg/l TDS). Por otro lado, el agua subterránea en el punto RHE99-2 muestra valores anómalos (*outliers*), con un promedio TDS de 8.821 mg/l, bajo el umbral inferior del *background* (9.407 mg/l TDS). En el punto LMB-2 también se registró un valor anómalo bajo, igual a 9.156 mg/l TDS.

Al comparar los valores pH v/s TDS, se puede ver que las muestras poseen comportamientos distintos. El primer grupo de pozos (LMB-1, LMB-2, LMB-4) posee aguas subterráneas muy similares entre si, de tipo salobres con valores de pH alcalinos (en promedio pH 9,1). Por otro lado, los pozos LMB-5 y RHE99-2, ubicados al SW de los pozos antes mencionado y en el sentido del flujo de aguas subterráneas, poseen aguas subterráneas de tipo salobre pero con menor concentración de TDS que el primer grupo, y con una amplia variabilidad de pH (en promedio pH 6,3, ácido). Las muestras del punto PMB99-1 poseen aguas subterráneas de tipo salmuera a un pH alcalino (en promedio pH 8,6) menor al de las muestras del primer grupo.

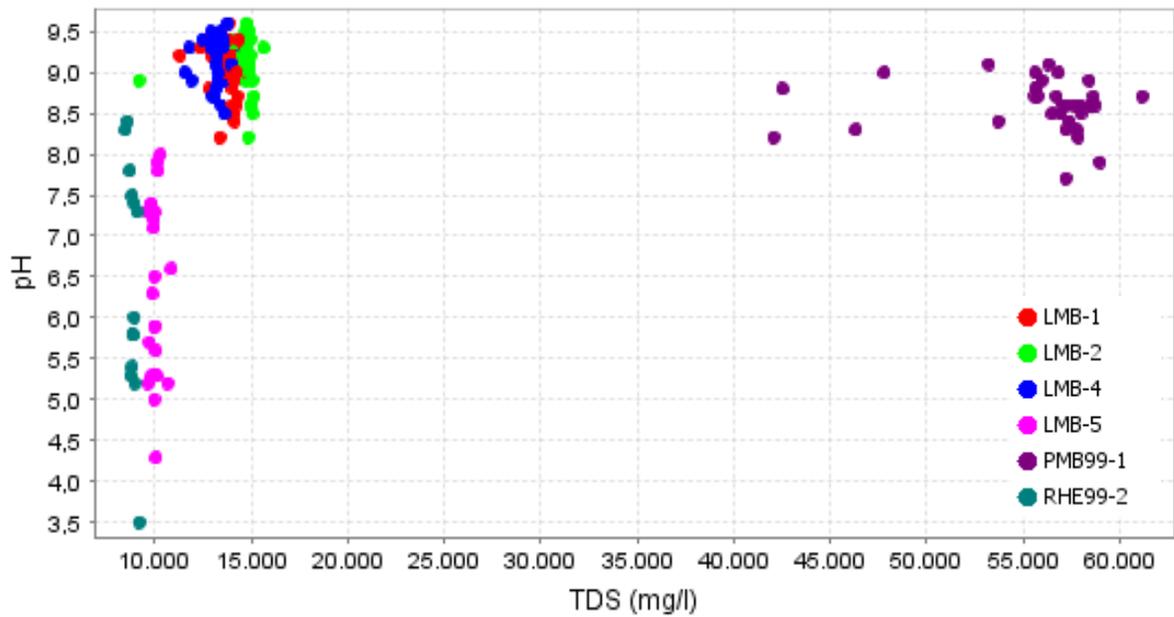


Figura 6.4 pH v/s TDS del sector Salar de los Morros. En colores los distintos pozos muestreados.

La conductividad eléctrica se correlaciona muy bien con los sólidos totales disueltos (Anexo B, Figura B.1.1), y muestra valores promedio de 31.059  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Los mayores valores se alcanzan en el punto PMB99-1, y los valores más bajos en el punto RHE99-2, lo cual es concordante con los resultados de TDS.

## 6.1.2 Geoquímica de elementos mayores

Los elementos mayores corresponden a todos los elementos y especies que se encuentran a una concentración  $>5$  mg/l (Merkel *et al.*, 2005). Según esta definición, y en base a los resultados de los análisis realizados a las muestras de aguas subterráneas, los elementos mayores presentes en estas aguas del sector salar los Morros son: Ca, K, Mg, Na, Cl,  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{SO}_4$  y Fe. Este último, es normalmente considerado un elemento menor en aguas naturales por lo que será analizado posteriormente. En esta sección se incluyen solamente los elementos que hayan pasado el control del balance iónico.

### 6.1.2.1 Clasificación del agua subterránea

Utilizando un diagrama de clasificación de Piper (Figura 6.5), se grafican las proporciones, en miliequivalentes por litro, de los cationes mayores (Ca, Mg, (Na+K)) y aniones mayores (Cl,  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ ). Según esto, las aguas subterráneas de este sector son del tipo cloruradas sódicas.

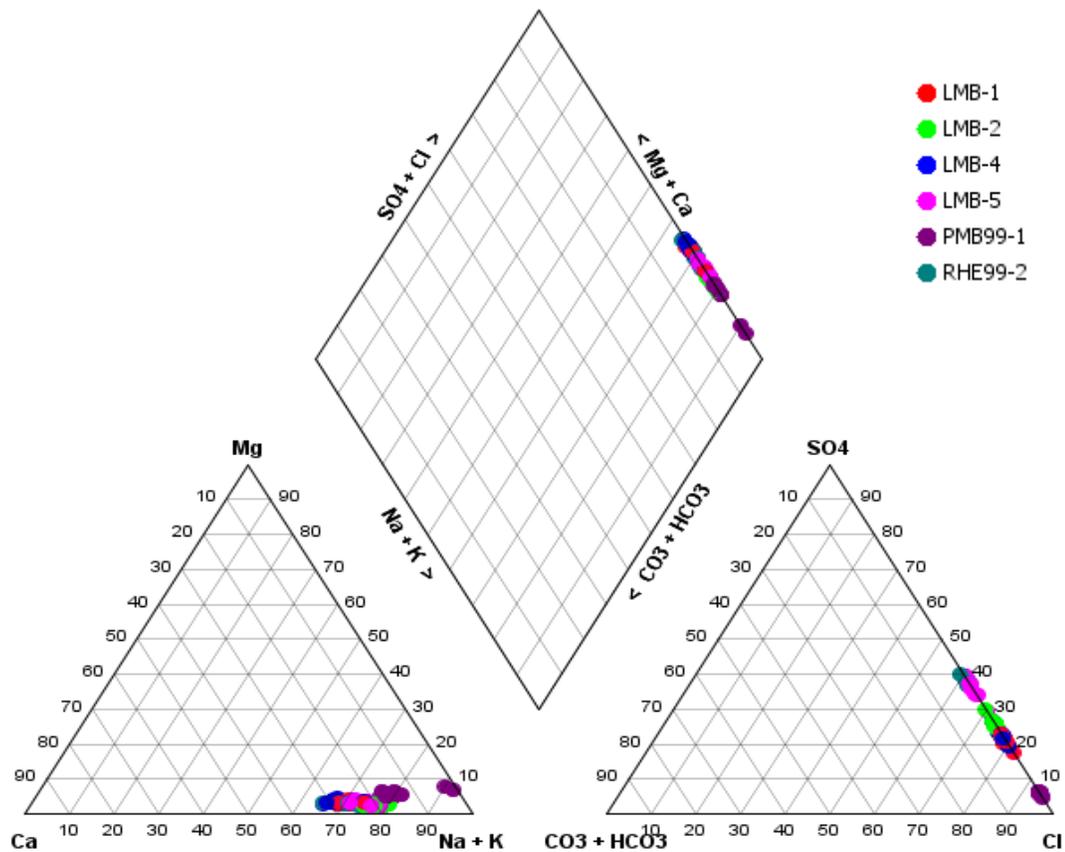


Figura 6.5 Diagrama Piper para aguas subterráneas del sector Salar de los Morros. Los colores representan los distintos pozos del sector.

### 6.1.2.2 Concentraciones de elementos mayores

En la Figura 6.6 se muestran las concentraciones de los distintos elementos mayores en las aguas subterráneas del sector Salar de los Morros. La distribución de las muestras corresponde a la frecuencia relativa acumulada, en donde son ordenadas de menor a mayor concentración, lo que ayuda a reconocer las muestras que presenten las mayores y menores concentraciones.

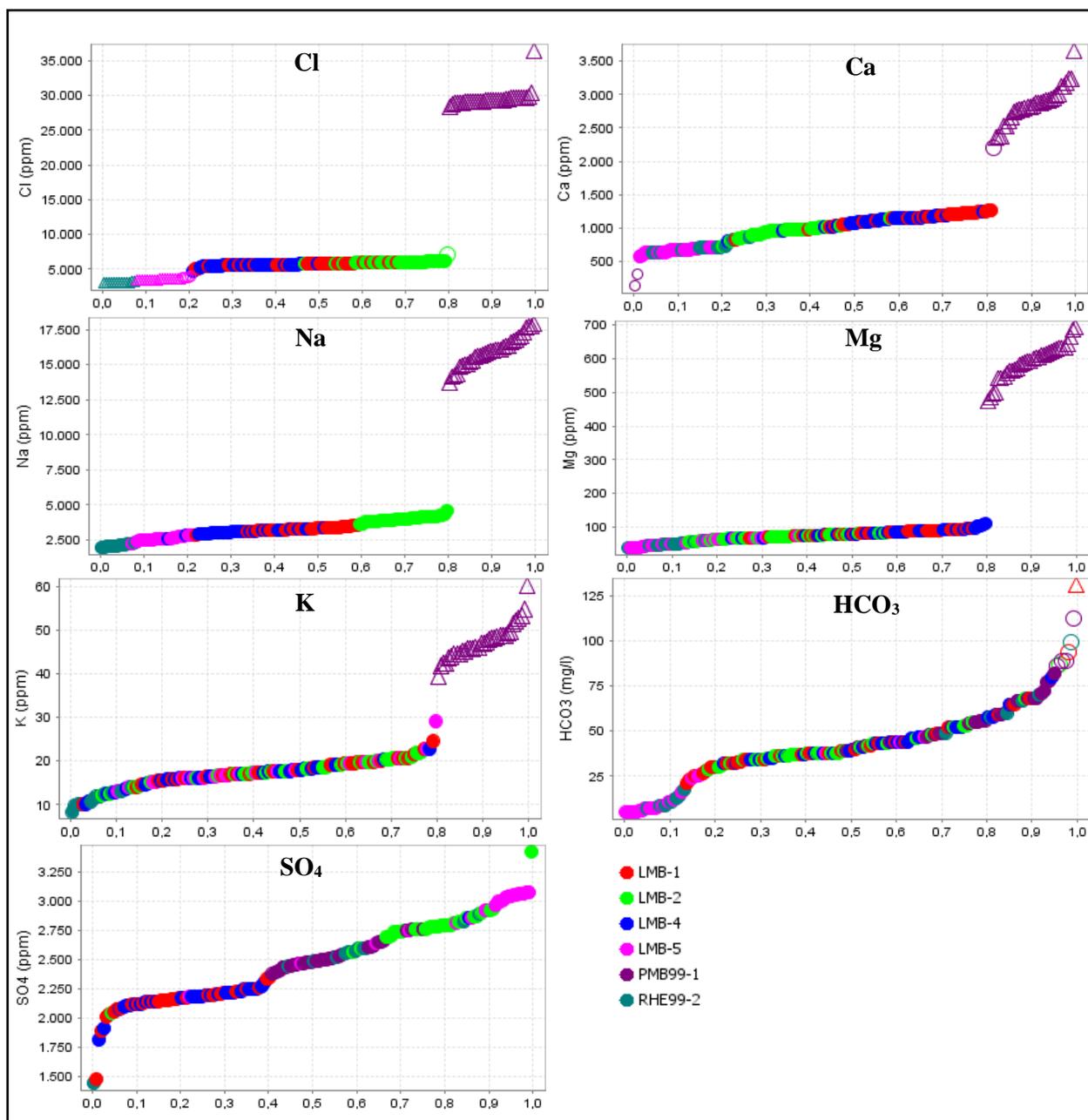


Figura 6.6 Concentraciones de elementos mayores en aguas subterráneas del sector salar de los Morros. Las muestras se encuentran distribuidas según la frecuencia relativa acumulada. Los colores representan los distintos pozos. Los círculos y triángulos vacíos corresponden a anomalías respecto a todo el sector.

En el gráfico para el cloro (Figura 6.6), las aguas subterráneas en PMB99-1 destacan por tener concentraciones altas que corresponden a anomalías respecto al resto de los pozos. Esta situación se repite también en los gráficos para Na, Ca, K y Mg, pero no así para el sulfato ( $\text{SO}_4$ ) y el bicarbonato ( $\text{HCO}_3$ ). Las aguas subterráneas en LMB-5 y RHE99-2 presentan concentraciones bajas para cloro que corresponden a anomalías respecto a los otros pozos, y si bien esta situación no se repite para el resto de los elementos mayores, si existe una tendencia a tener las concentraciones más bajas en varios de estos elementos (Na, Ca y, en menor medida, Mg y  $\text{HCO}_3$ ). En el resto de los pozos no se observan tendencias generales.

En la Figura 6.7, se muestran las concentraciones, de los elementos mayores, relativas a los sólidos totales disueltos. En esta figura se observa que el agua subterránea del sector Salar de los Morros se puede diferenciar en dos tipos, el primero agrupa los pozos LMB-1, LMB-2 y LMB-4, el que se encuentra en la zona NE de la cuenca, y el segundo a los pozos LMB-5 y RHE99-2, ubicados al SW del primer grupo, en la zona centro sur de la cuenca. El agua subterránea en el primer grupo presenta mayor salinidad que los del segundo grupo, lo que se encuentra asociado a mayores concentraciones de Cl, Ca, Na, Mg y en menor medida K y  $\text{HCO}_3$ . Respecto al sulfato, se observa que las muestras del pozo LMB-2 no poseen las mismas signaturas químicas que los demás pozos del sector NE, y junto con las muestras del pozo LMB-5, poseen los valores más altos de toda la cuenca del Salar de los Morros. Los valores más altos de  $\text{HCO}_3$  en el Salar de los Morros, se observan en las aguas subterráneas del pozo PMB99-1 (Anexo B, Figura B.1.2), aunque el valor más alto pertenece a LMB-1.

El pozo PMB99-1 se encuentra ubicado en el sector NE de la cuenca, pero sus aguas subterráneas se distinguen del resto de las aguas subterráneas en este sector, al presentar salinidad notoriamente mayor, lo que es concordante con mayores concentraciones de elementos mayores (Anexo B, Figura B.1.2).

Los gráficos para el Cl y Na (Figura 6.7) muestran una correlación positiva con respecto al total de sólidos disueltos.

En el pozo LMB-2, una muestra (junio del 2013) presenta un valor muy bajo de TDS con respecto a las demás muestras en este pozo. Se puede ver que los valores de los elementos mayores en esta muestra se encuentran dentro del promedio de valores que se presentan en este pozo, es decir el valor de los sólidos totales disueltos no corresponde al valor según las concentraciones de elementos mayores. Es posible que esto constituya un error en el análisis o registro de este parámetro para esta muestra.

En la Figura 6.8 se presentan las concentraciones promedio de los distintos elementos mayores según la dirección de flujo general del agua subterránea en el sector. Según esto, se observa que las aguas subterráneas se encuentran empobrecidas en los elementos Ca, Cl, Na, Mg y  $\text{HCO}_3$ , en el sector SW respecto a las aguas del sector NE. En cambio, se observa que las aguas subterráneas se enriquecen en sulfato en la dirección de flujo. Respecto al K, no se reconoce algún cambio notable entre las aguas subterráneas de un sector con otro. Se observa, además, una correlación positiva entre Cl y Na, y una correlación negativa entre el Ca y  $\text{SO}_4$ .

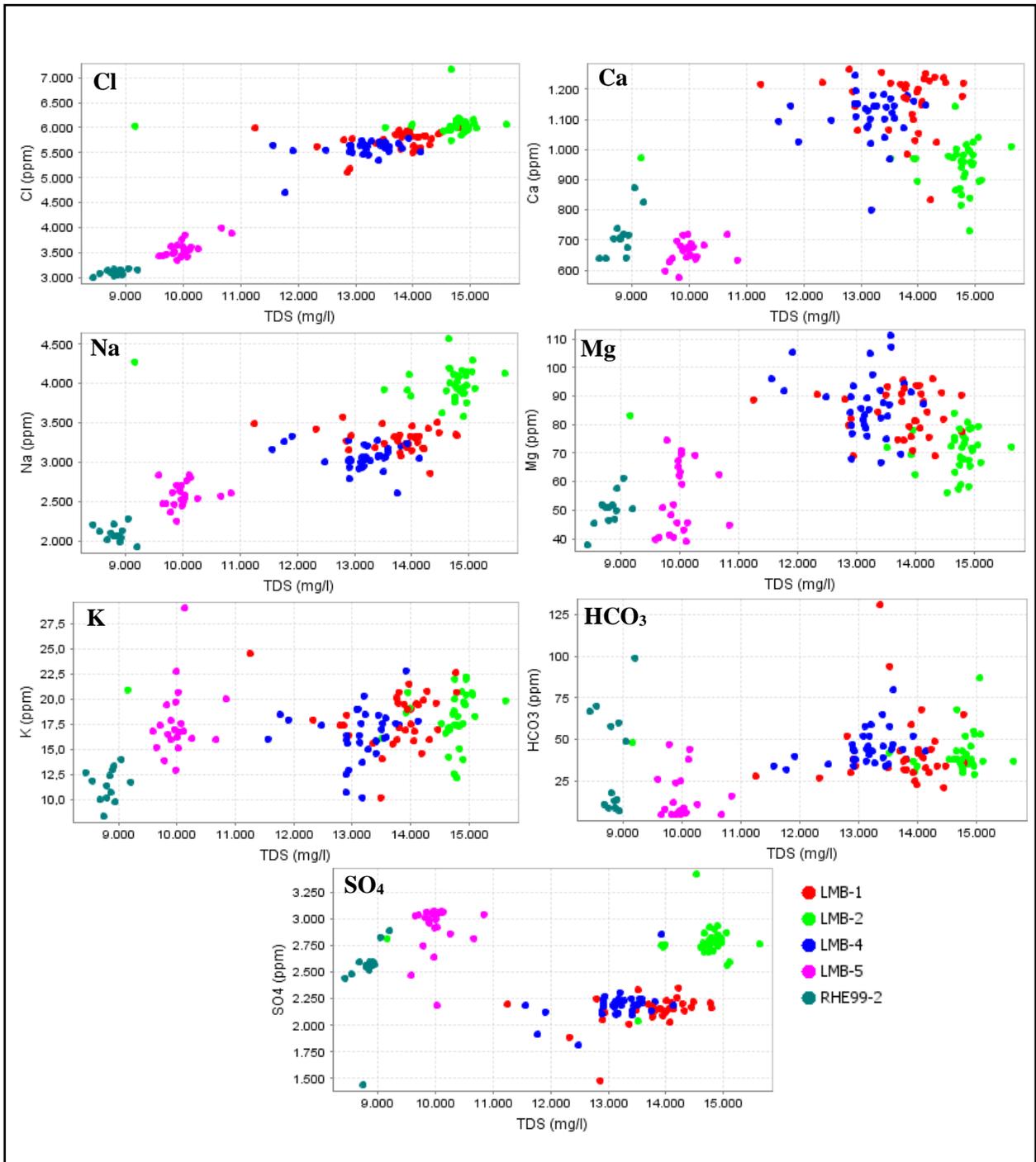


Figura 6.7 Concentraciones de elementos mayores relativas al TDS, de las aguas subterráneas del sector Salar de los Morros. No se incluye el pozo PMB99-1. En colores los distintos pozos muestreados.

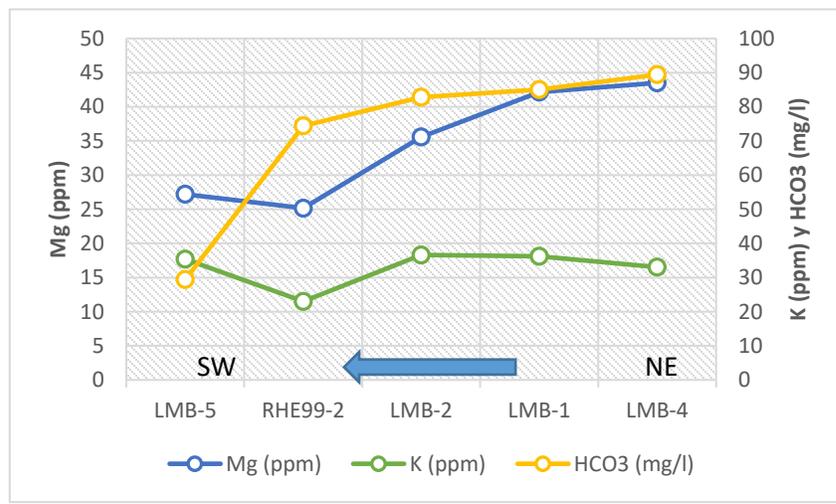
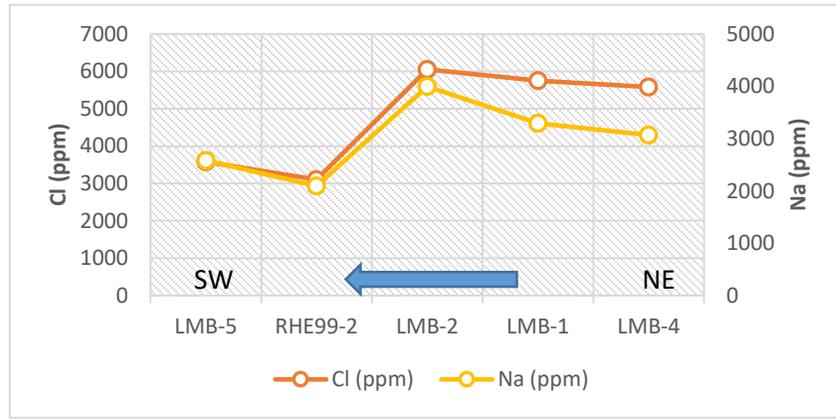
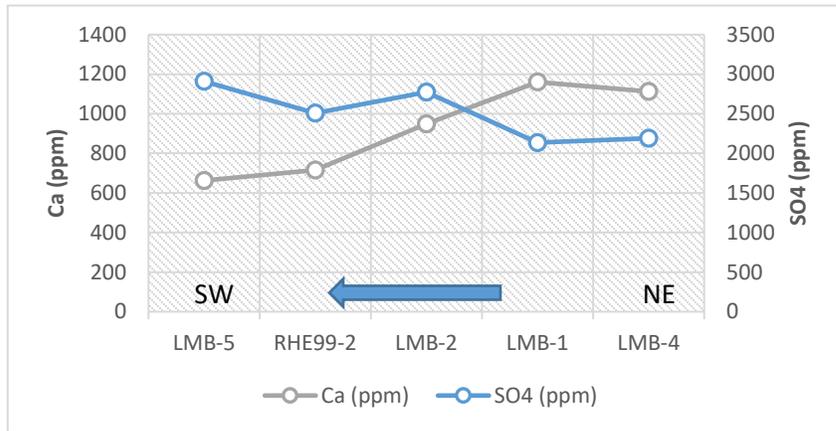


Figura 6.8 Concentración promedio de elementos mayores en muestras de agua subterráneas del sector Salar de los Morros. La flecha indica la dirección de flujo general del agua subterránea.

### 6.1.3 Geoquímica de elementos menores y traza

Los elementos menores corresponden a aquellos que se encuentren en concentraciones entre 0,1 y 5 mg/l, y los elementos traza son todos aquellos que estén en concentraciones menores a 0,1 mg/l (Merkel *et al.*, 2005).

Dado que los métodos analíticos usados en laboratorio tienen límites de detección muy altos con respecto a las bajas concentraciones que poseen los elementos de este tipo, no es posible discernir entre elementos menores y traza para varios de estos elementos, por lo que serán estudiados juntos. Estos elementos corresponden a Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Li, Mn, Mo, Pb, Si, Zn.

#### 6.1.3.1 Concentraciones de elementos menores y traza

Al igual que para los elementos mayores, las concentraciones de varios elementos menores y traza muestran una diferencia entre las aguas subterráneas del sector NE y las del sector SW de la cuenca del Salar de los Morros. En las muestras del sector NE se observan concentraciones mayores de elementos como Al, Cu, Mo y Zn, en cambio, las aguas subterráneas del sector SW muestran concentraciones mayores en elementos como Cr, Fe y Mn. Estos resultados se muestran en la Figura 6.9, en donde se distingue entre el sector SW (pozos LMB-5 y RHE99-2), el sector NE (pozos LMB-1, LMB-2 y LMB-4), y el punto PMB99-1, el cual se encuentra en el sector NE, pero es tratado de forma especial.

A continuación, se describen los resultados observados por elemento (Figura 6.9).

**Aluminio:** Las mayores concentraciones de aluminio se encuentran en las muestras de agua subterránea del sector NE, siendo el valor más alto registrado 1,2 ppm en el punto LMB-2, aunque los pozos LMB-4 y PMB99-1 también registran valores de 1,0 ppm.

**Arsénico:** Aunque la mayoría de los valores entre el sector NE y SW son similares, las mayores concentraciones de arsénico ocurren en muestras del sector NE, con máximos de 1,06 y 0,92 ppm en los pozos LMB-4 y LMB-2 respectivamente. En el sector SW las mayores concentraciones ocurren en LMB-5, siendo el mayor valor registrado de 0,12 ppm.

**Cadmio:** En las muestras de aguas subterráneas del sector Salar de los Morros se registran bajas ocurrencias de cadmio. Los únicos registros de este elemento ocurren en el sector NE, y en PMB99-1. En este último se registra el valor máximo de 0,11 ppm (Anexo B, Figura B.1.3).

**Cromo:** Las concentraciones más altas de cromo ocurren en las aguas subterráneas del sector SW, especialmente en el punto RHE99-2, en donde el valor más alto registrado es de 0,52 ppm. En el sector NE la mayor concentración de este elemento es de 0,12 ppm, aunque en el punto PMB99-1 se registran valores de hasta 0,22 ppm.

**Cobre:** Las muestras del sector NE son las únicas en registrar concentraciones de Cu sobre el nivel de detección. Estas ocurren en los puntos LMB-2 (0,5 ppm), LMB-1 (0,25 ppm) y PMB99-1 (0,12 y 0,11 ppm) (Anexo B, Figura B.1.3).

**Hierro:** Se observa que las mayores concentraciones de Fe ocurren en muestras del sector SW. En este sector, el punto RHE99-2 presenta las concentraciones más altas de este elemento,

llegando a los 258 ppm. En el sector NE, incluyendo en PMB99-1, las concentraciones de hierro son similares con un máximo de 56,7 ppm.

**Litio:** Las muestras de aguas subterráneas de los sectores NE y SW no muestran diferencias en las concentraciones de este elemento. Las únicas diferencias se observan en las muestras del pozo LMB9-1, que muestran los valores más altos de hasta 1,55 ppm. El valor más alto de todas las muestras corresponde a la muestra de junio de 2014 en LMB-1 (3,75 ppm), que representa una anomalía en todo el Salar de los Morros. En esta misma muestra se registran otros valores anómalos para elementos como Cu, Mn y Zn.

**Manganeso:** Las concentraciones más altas de Mn ocurren en las aguas subterráneas del sector SW. En este sector el punto RHE99-2 muestra las mayores concentraciones de este elemento, de hasta 9,26 ppm. Para los pozos en el sector NE y PMB99-1, las concentraciones de manganeso son similares (promedio 0,82 ppm), aunque la muestra de junio de 2014 en LMB-1 se distingue del resto de las muestras tomadas en este pozo, registrando el mayor valor de todo el Salar de los Morros (70 ppm).

**Molibdeno:** Las concentraciones de Mo en las muestras del sector NE son mayores a las de las muestras del sector SW. No se observan diferencias entre las muestras de los distintos pozos del sector NE, y la concentración más alta registrada en este sector es de 0,2 ppm. En el punto PMB99-1 se registran las concentraciones más altas de toda la cuenca del Salar de los Morros, siendo el máximo valor de 0,3 ppm. En el sector SW solo se registran algunos valores de 0,1 ppm en LMB-5.

**Zinc:** las aguas subterráneas del Salar de los Morros muestran pocos registros de este elemento sobre el nivel de detección. Las muestras del sector NE muestran concentraciones mayores que las del sector SW, registrando máximos de 3 y 2 ppm, en los pozos LMB-2 y LMB-1 respectivamente.

Respecto al fluor y al silicio, las concentraciones entre distintos sectores son similares, con algunos valores más altos que la media, pero que no se mantienen en el tiempo (Anexo B, Figura B.1.3). Por otro lado, para el plomo no se registran concentraciones sobre el límite de detección en ninguna muestra.

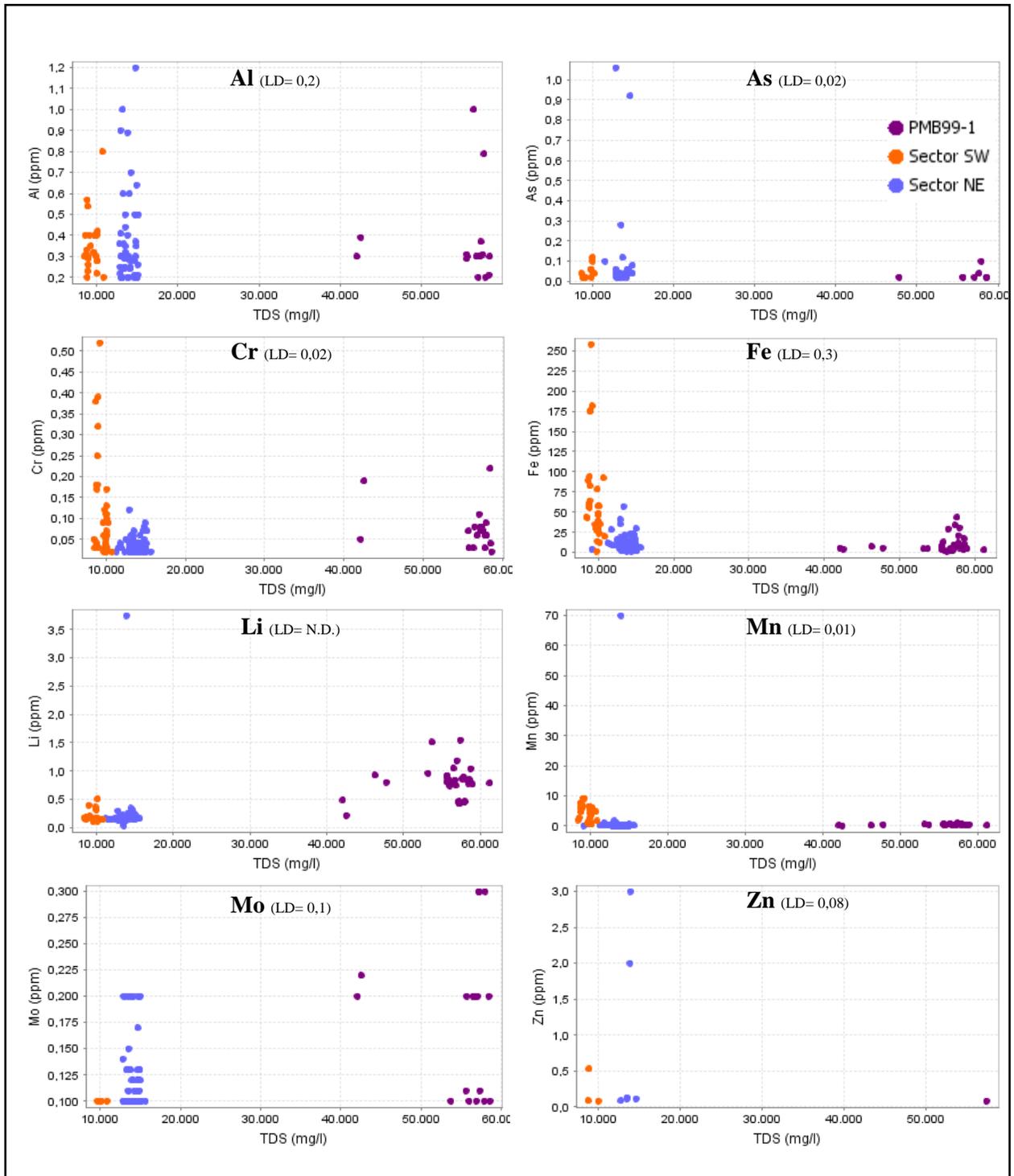


Figura 6.9 Concentraciones relativas de algunos elementos menores y traza. En naranja las muestras del sector SW, en azul las del sector NE, y en morado las de PMB99-1. LD: Límite de detección (ppm).

## Sector Llano Mariposas

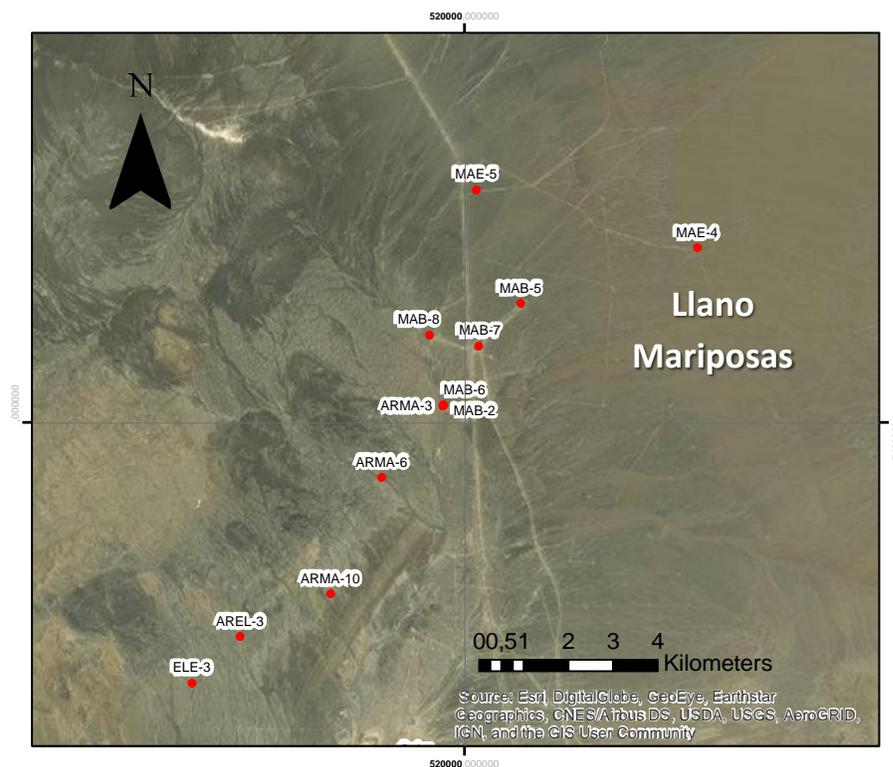


Figura 6.10 Ubicación pozos de muestreo en sector Llano Mariposas.

### 6.1.4 Parámetros Físico-Químicos

En la Figura 6.11 se muestra el pH de las aguas subterráneas del sector Llano Mariposas, considerando todos los muestreos realizados desde el 2013 hasta el 2016. El *box plot* de color gris considera todos los pozos de muestreo. El pH medido en las aguas subterráneas de este sector es en general neutro a levemente alcalino, con valores que oscilan entre los 7,1 y 8,2 (sin considerar *outliers*). Estos valores se encuentran dentro del rango esperado para aguas naturales, entre 6,5 y 8,5 (Hem, 1985).

En esta figura se observa que en promedio los pH de los distintos pozos son muy similares entre sí, presentando algunos valores anómalos, pero que no son constantes respecto a la mayoría de valores.

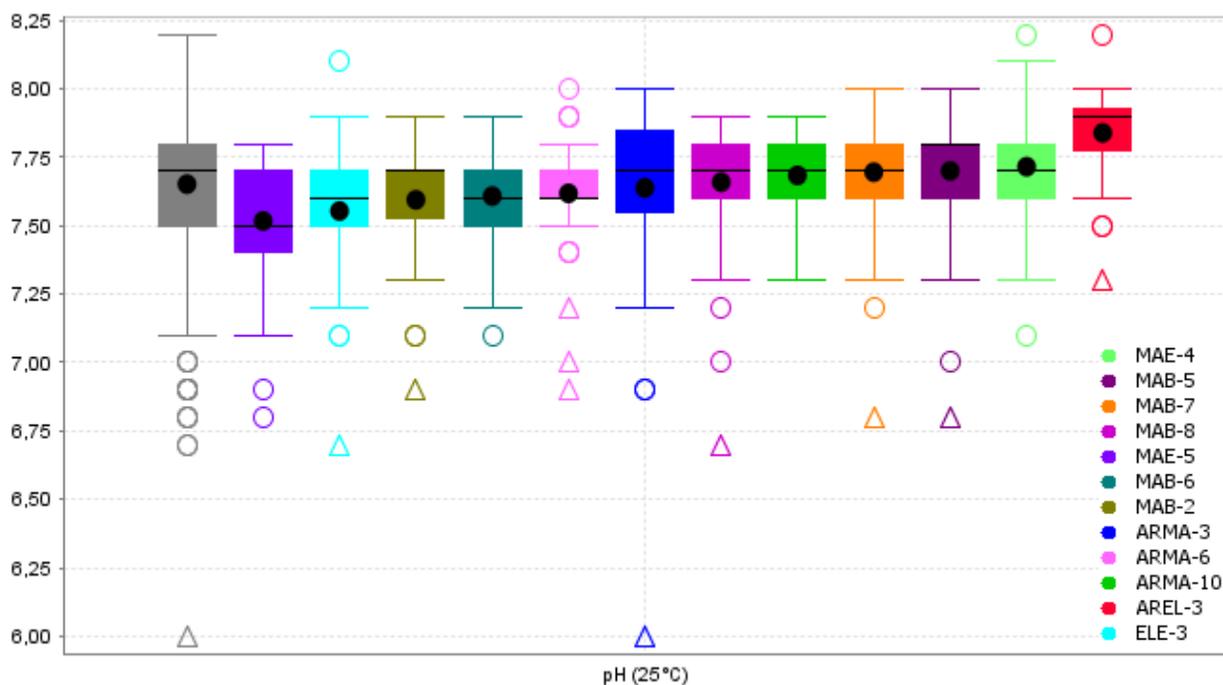


Figura 6.11 Gráfico *Box Plot* del pH de aguas subterráneas del sector Llano de Mariposas. En gris se consideran los muestreos de todo el sector, y los demás colores distinguen los pozos de muestreo. Los círculos representan *outliers* (>1,5 IQR de la media) y los triángulos *far outliers* (>3 IQR de la media).

Los valores de pH más altos del sector corresponden a muestras tomadas en el pozo AREL-3. El pH promedio en este punto es de 7,8, lo que corresponde a un pH levemente alcalino, aunque registra un valor máximo anómalo de 8,2.

En promedio, los pH más bajos de todo el sector se encuentran en las aguas subterráneas muestreadas en el pozo MAE-5. En este punto se observan valores regulares entre 7,1 y 7,8 (en promedio 7,5), es decir un pH neutro a levemente alcalino, aunque en este pozo se presentan algunos pH anómalos de 6,8 y 6,9 (pH levemente ácido), pero que no son únicos y también se registran en muestras de la mayoría de los pozos. El pH más bajo registrado de todas las muestras del sector Llano Mariposas se obtuvo en ARMA-3, con un pH ácido de 6, aunque en promedio las aguas subterráneas en este punto muestran un pH promedio 7,6.

Respecto a los sólidos totales disueltos, en la Figura 6.12 se muestran todas las mediciones obtenidas en los muestreos realizados en los distintos pozos del sector Llano Mariposas. Se observa que los valores de TDS oscilan entre los 3.804 y 9.640 mg/l (sin considerar *outliers*), en promedio 6.919 mg/l TDS, lo que indica que las aguas subterráneas se clasifican como salobres (Drever, 1997).

Se observa que la muestra de agosto 2014 del punto MAB-7, posee un valor anómalo, de 56.120 mg/l TDS, muy por sobre límite superior del *background* (9.640 mg/l TDS). Este valor es consistente con aguas de tipo salmuera, que no se observan en este pozo o en el resto de las aguas subterráneas de Llano Mariposas. Por otro lado, la muestra de agosto 2015 del pozo MAB-6 presenta un valor de 2.884 mg/l TDS, bajo el límite inferior del *background* de todo el sector (3.804

mg/l TDS). A pesar de ser una anomalía, este valor TDS indica un agua subterránea de tipo salobre, el cual si se observa en el resto de aguas subterráneas de este pozo.

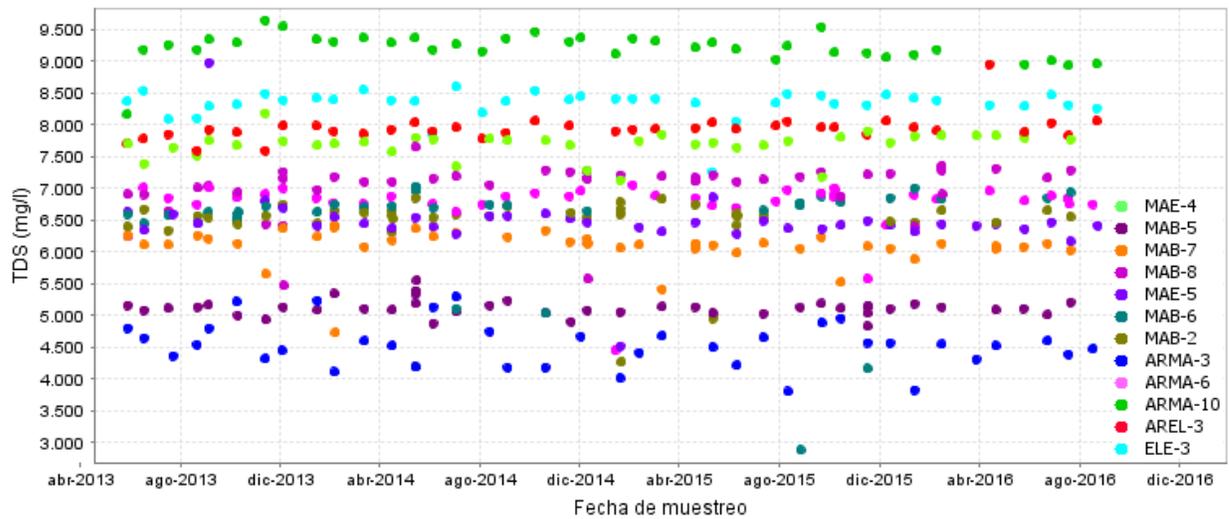


Figura 6.12 TDS de las muestras de aguas subterráneas del sector Llano Mariposas, tomadas desde junio de 2013 a septiembre de 2016.

Respecto a la conductividad eléctrica, se observa que se correlaciona muy bien con los sólidos totales disueltos (Anexo B, Figura B.2.1). Las aguas subterráneas de todo el sector Llano Mariposas muestran una conductividad eléctrica promedio de  $8.675 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Los valores promedio más altos ocurren en las aguas subterráneas de ARMA-10, y los más bajos en ARMA-3, al igual que los resultados obtenidos para los sólidos totales disueltos.

### 6.1.5 Geoquímica de elementos mayores

Los elementos mayores, con concentraciones  $>5$  mg/l (Merkel *et al.*, 2002), presentes en las aguas subterráneas del sector Llano Mariposas son: Ca, Cl, Na, K, Mg,  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{SO}_4$  y Si. Este último se considera normalmente como un elemento menor en las aguas naturales, por lo que se analiza posteriormente. En esta sección se incluyen solamente los elementos que hayan pasado el control del balance iónico.

#### 6.1.5.1 Clasificación del agua subterránea

Usando un diagrama de clasificación de Piper (Figura 6.13), según las proporciones en miliequivalentes por litro de los cationes mayores (Ca, Mg, (Na+K)) y aniones mayores ( $\text{Cl}$ ,  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ ), se grafican las muestras de aguas subterráneas de los distintos pozos.

En este diagrama se observan como tendencia general, que las aguas subterráneas de este sector son principalmente sulfatadas sódicas, aunque en el pozo MAE-5 se registra una muestra que corresponde a agua de tipo clorurada sódica.

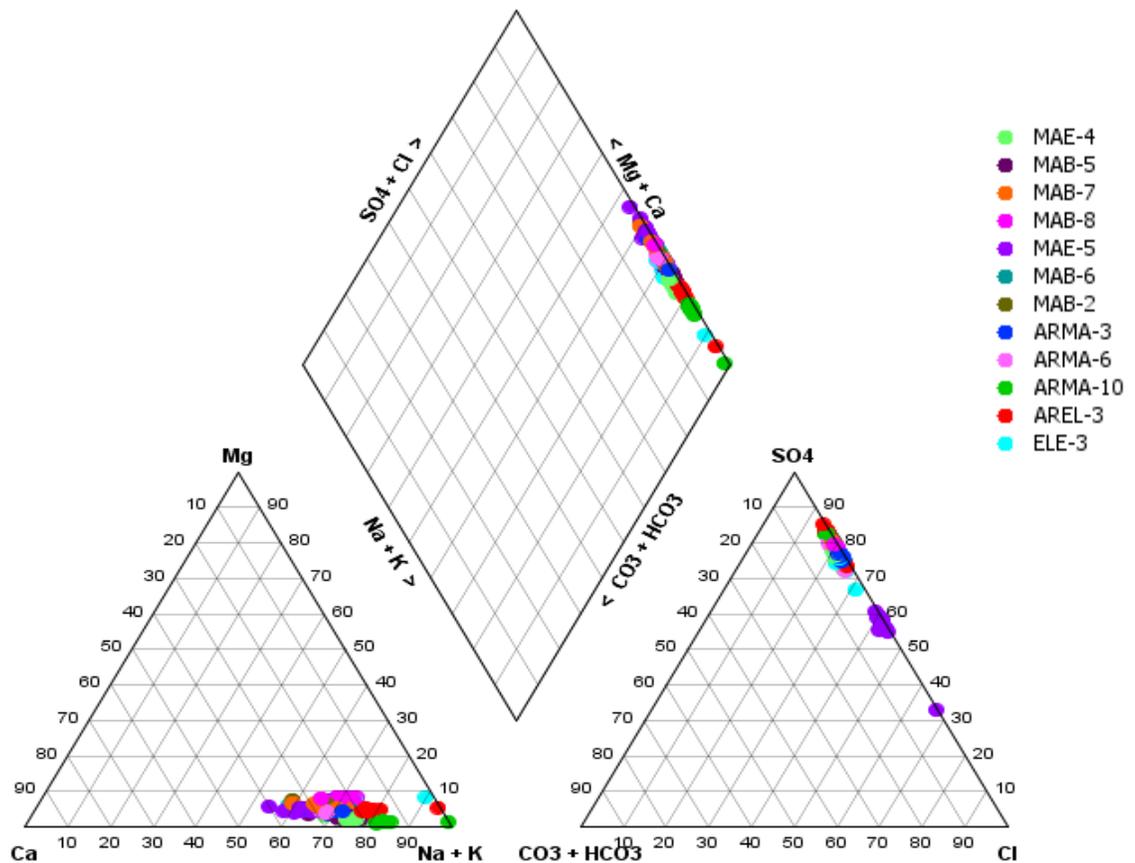


Figura 6.13 Diagrama Piper para aguas subterráneas del sector Llano Mariposas. Los colores representan los distintos pozos del sector.

### 6.1.5.2 Concentraciones de elementos mayores

En la Figura 6.14 se muestran los gráficos *box plots* para algunos elementos mayores, de las aguas subterráneas del sector Llano Mariposas. El color gris considera todas las muestras de este sector.

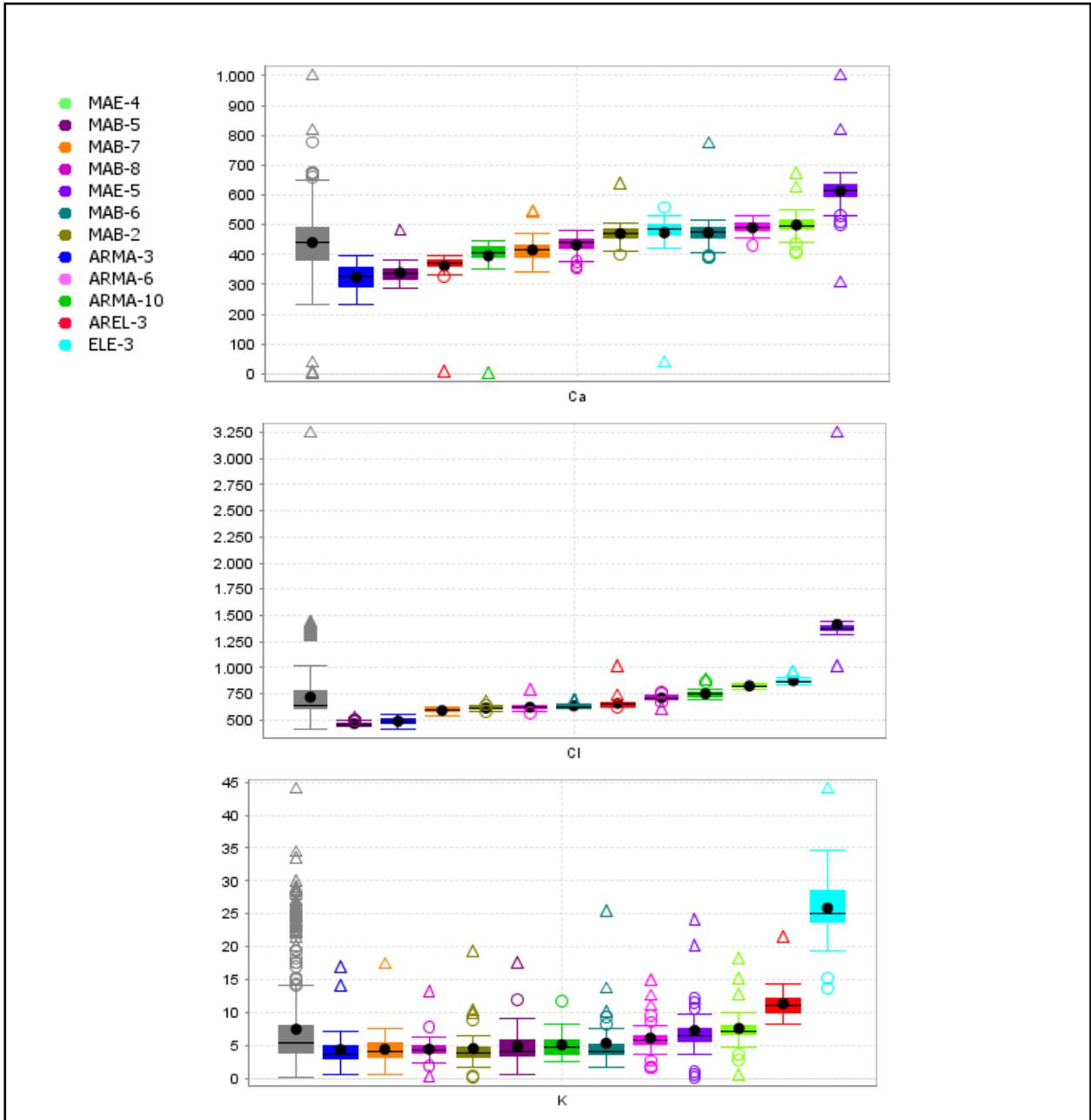


Figura 6.14 Gráficos *Box Plots* de las aguas subterráneas del sector Llano Mariposas, para los elementos Calcio, Cloro y Potasio (valores en ppm). En gris se consideran los muestreos de todo el sector, y los demás colores distinguen los distintos pozos. Los círculos representan *outliers* (>1,5 IQR de la media) y los triángulos *far outliers* (>3 IQR de la media).

En la figura anterior, el gráfico para el calcio muestra que las mayores concentraciones ocurren en el punto MAE-5, con un promedio de 613 mg/l Ca y un máximo de 1.004 mg/l, el que corresponde a una anomalía con respecto a todo el sector Llano Mariposas. Por otro lado, existen algunas muestras en otros pozos que registran concentraciones anómalas bajo el umbral del *background*, pero que no son constantes respecto al promedio en estos pozos.

En el gráfico del cloro se puede ver que las mayores concentraciones en todo el sector Llano Mariposas corresponden a las muestras de MAE-5, que corresponden a anomalías positivas en este sector. Estas muestras registran una concentración promedio 1.414 mg/l Cl, y un máximo de 3.257 mg/l Cl. Para el potasio se observa que las mayores concentraciones ocurren en las muestras de ELE-3, las que corresponden a anomalías positivas en todo el sector Llano Mariposas, con un promedio de 26 mg/l K y un máximo de 44 mg/l K. Respecto al bicarbonato se registran algunos valores anómalos asociados a los pozos ELE-3 y MAE-4, pero que no son constantes localmente en estos pozos. Para los elementos Na, Mg y SO<sub>4</sub> no se registran concentraciones anómalas respecto del promedio del sector Llano Mariposas.

En la Figura 6.15 se observan las concentraciones de los elementos mayores, relativos a los sólidos totales disueltos, registrados en las distintas muestras del sector Llano Mariposas. Se puede ver que existe una buena correlación entre TDS y los elementos SO<sub>4</sub>, Na y en menor medida Cl, para las aguas subterráneas de la mayoría de los pozos, no así para las muestras de MAE-5. Se observa además que en general las muestras de los pozos ARMA-3 muestra signatures geoquímicas notablemente distintas respecto de las aguas subterráneas de los pozos más próximos (MAB-2, MAB-6).

En los gráficos de concentración de elementos mayores relativos al TDS (Figura 6.15) no se incluye la muestra de agosto 2014 del punto MAB-7, que a pesar de que presenta una alta salinidad anómala, no muestra valores anómalos para las concentraciones de elementos mayores. Esto puede indicar que este valor TDS corresponde a un error analítico o en el registro de este parámetro para esta muestra.

Analizando la concentración de elementos mayores según la dirección de flujo del agua subterránea (Figura 6.16), se observa una amplia variabilidad en las concentraciones de elementos mayores entre los distintos pozos, y no se reconoce ninguna tendencia clara de enriquecimiento o empobrecimiento en algún elemento.

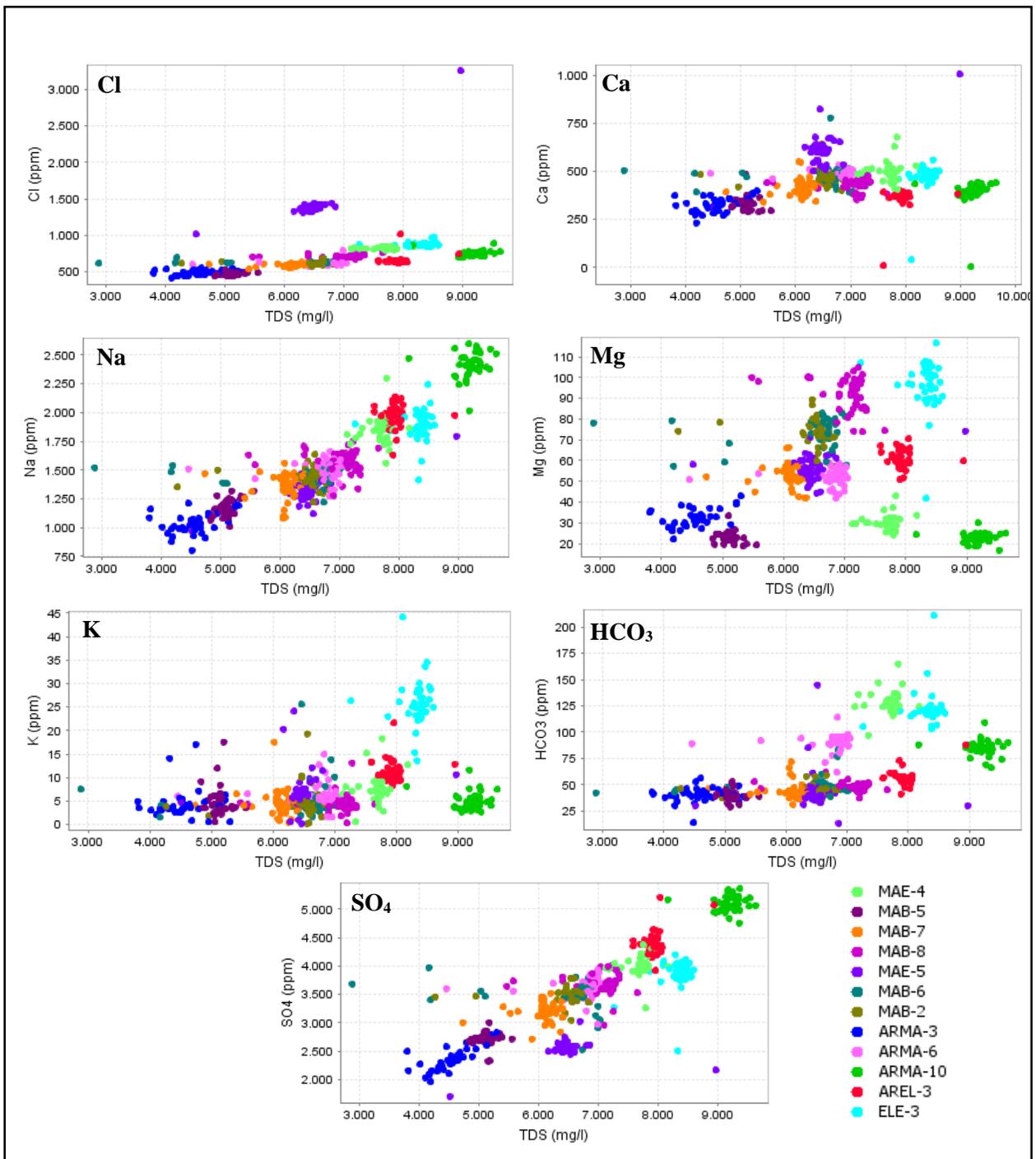


Figura 6.15 Concentraciones de elementos mayores relativas al TDS, de las aguas subterráneas del sector Llano Mariposas. No se incluye la muestra de agosto 2014 del punto MAB-7. En colores los distintos pozos muestreados.

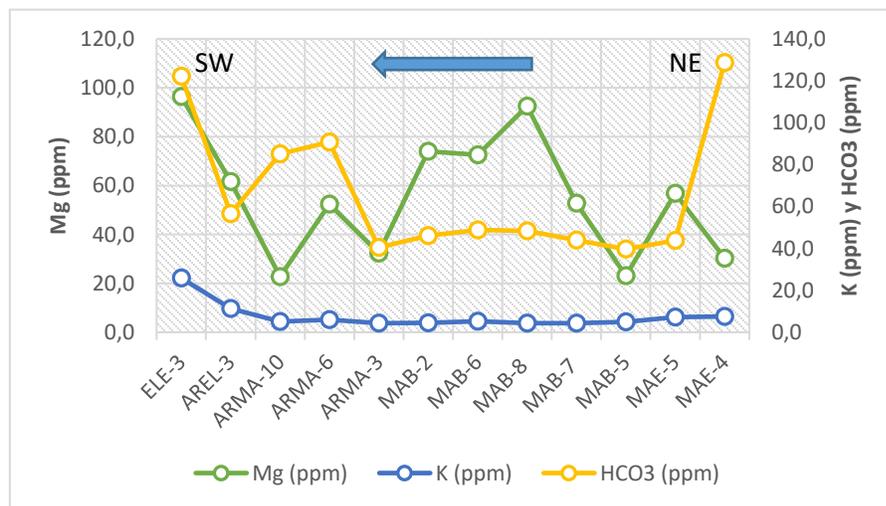
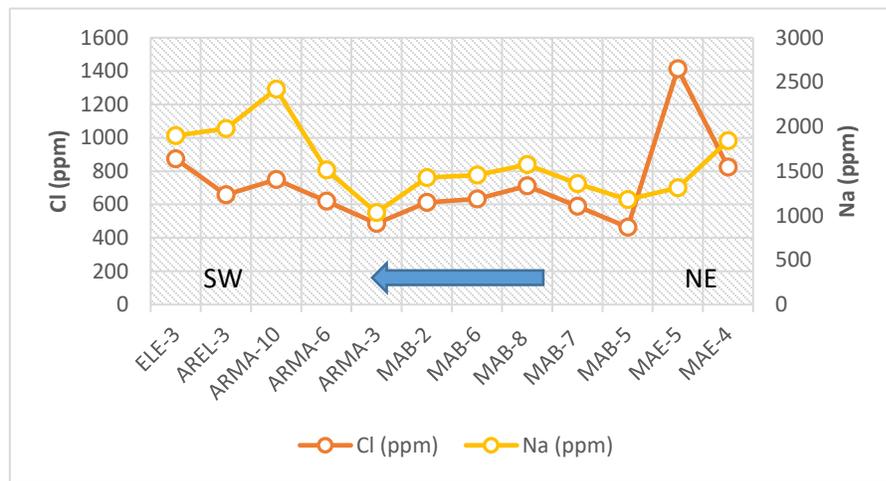
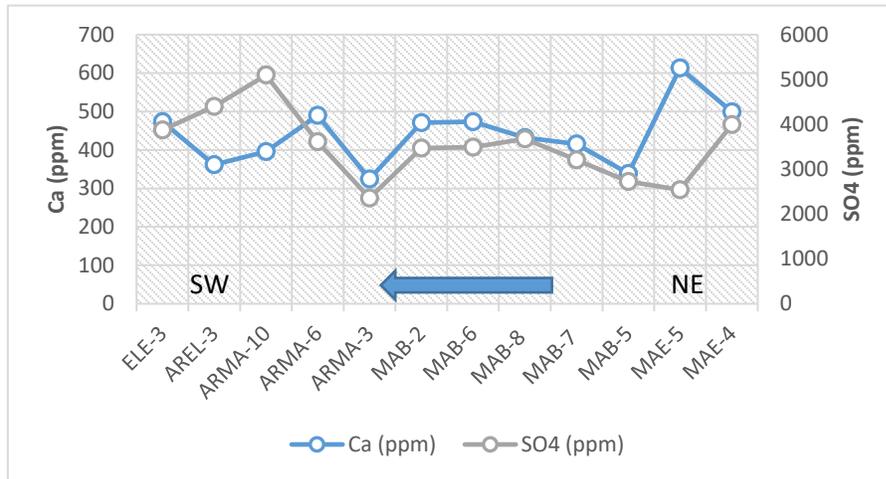


Figura 6.16 Concentración promedio de elementos mayores en muestras de agua subterráneas del sector Llano Mariposas. La flecha indica la dirección regional de flujo del agua subterránea.

### 6.1.6 Geoquímica de elementos menores y traza

Al igual que para los otros sectores, los elementos menores y traza se analizan en conjunto. Los elementos analizados corresponden a Al, As, Cd, Cr, Cu, F, Fe, Li, Mn, Mo, Pb, Si, Zn.

En la Figura 6.17, se muestran las concentraciones de algunos elementos, relativas a los sólidos totales disueltos. Como tendencia general, se observa una amplia distribución geoquímica de las muestras del pozo ARMA-3 (de color azul), para los elementos Al, Fe, Mn y Si, en comparación a las muestras de los demás pozos. A continuación, se presentan los resultados por elemento que se observan en la Figura 6.17:

**Aluminio:** Las mayores concentraciones de aluminio se encuentran en las muestras de agua subterránea del pozo ARMA-3, con un máximo registrado de 17 ppm, muy por sobre los valores registrados en otros pozos, que no superan los 2,5 ppm.

**Arsénico:** Las concentraciones más altas de arsénico ocurren en las muestras de aguas subterráneas de los pozos MAB-2, MAB-7, MAB-8 y ARMA-6, aunque en este último se registra el máximo de 3,2 ppm, mientras que en el resto de los pozos no superan los 0,8 ppm. Se observa, además que las concentraciones más altas en estos pozos ocurren en las mismas fechas, lo que sugiere que el control de este elemento no es de carácter local.

**Cadmio:** En las muestras de aguas subterráneas del sector Llano Mariposas se observan pocos registros de este elemento. Todos los registros muestran una concentración de 0,01 ppm en los distintos pozos, excepto para el pozo ARMA-3, que registra un máximo de 0,02 ppm (Anexo B, Figura B.2.2).

**Cromo:** Las concentraciones de cromo registradas en los distintos pozos son similares entre sí, con valores de hasta 0,07 ppm, aunque el máximo valor se registra en el pozo ARMA-3, con una concentración de 0,09 ppm (Anexo B, Figura B.2.2).

**Cobre:** Las únicas muestras que registran concentraciones de cobre sobre el nivel de detección pertenecen a los pozos ELE 3 y ARMA-3, con valores de 0,12 y 0,1 ppm, respectivamente (Anexo B, Figura B.2.2).

**Flúor:** Las concentraciones de flúor varían ampliamente entre los distintos pozos. Las muestras del pozo ARMA-10 destacan por presentar concentraciones anómalas negativas (entre 0,4 y 0,6 ppm), con respecto al promedio de toda la zona de 1,2 ppm (Anexo B, Figura B.2.2).

**Hierro:** Se puede ver que las mayores concentraciones de hierro se encuentran en las muestras de los pozos MAE-4, ELE-3 y ARMA-3, siendo este último pozo el que registra el máximo de toda la zona de 15,1 ppm.

**Litio:** Se observa que las concentraciones de litio varían ampliamente entre pozos. Las concentraciones más altas de este elemento ocurren en las muestras de agua subterránea del pozo MAB-8, con un promedio de 0,55 ppm, mientras que el máximo ocurre en el pozo ARMA-6, con una concentración de aproximadamente 1 ppm. Se puede ver además que las concentraciones más altas en distintos pozos ocurren en fechas cercanas, lo que sugiere que el control de este elemento no es de carácter local.

Manganeso: Los máximos se registran en muestras de MAE-4, ARMA-3 y MAE-5, con valores de 0,9, 0,51 y 0,39 ppm, respectivamente, aunque en general las concentraciones más altas se observan en los pozos MAE-4 y ELE-3, con concentraciones promedio de 0,1 y 0,08 ppm, respectivamente.

Molibdeno: En la Figura 6.17 se observa que en varios de los pozos ocurren concentraciones máximas de 0,2 ppm, pero solamente en los pozos MAE-4, MAE-5, ARMA-10 y AREL-3 las altas concentraciones son sostenidas. De estos pozos, ARMA-10 y AREL-3, presentan las mayores concentraciones de molibdeno (en promedio 0,15 y 0,14 ppm, respectivamente), y los máximos de toda la zona, 0,21 y 0,2 ppm, respectivamente.

Plomo: Las únicas muestras que registran concentraciones de plomo sobre el nivel de detección pertenecen a los pozos ARMA-3 (0,32 ppm), MAE-4 (0,31 y 0,22 ppm), ELE-3 (0,2 ppm) (Anexo B, Figura B.2.2).

Silicio: Se presentan altas concentraciones de este elemento en los pozos MAB-8, y ARMA-3, con concentraciones máximas de 18 y 34 ppm, respectivamente.

Zinc: En las muestras de aguas subterráneas se observan pocos registros de zinc sobre el nivel de detección en los distintos pozos, excepto en ELE-3, MAE-4 y MAE-5, siendo estos últimos dos los que registran las concentraciones más altas, con máximos de 1,2 y 0,7 ppm, respectivamente.

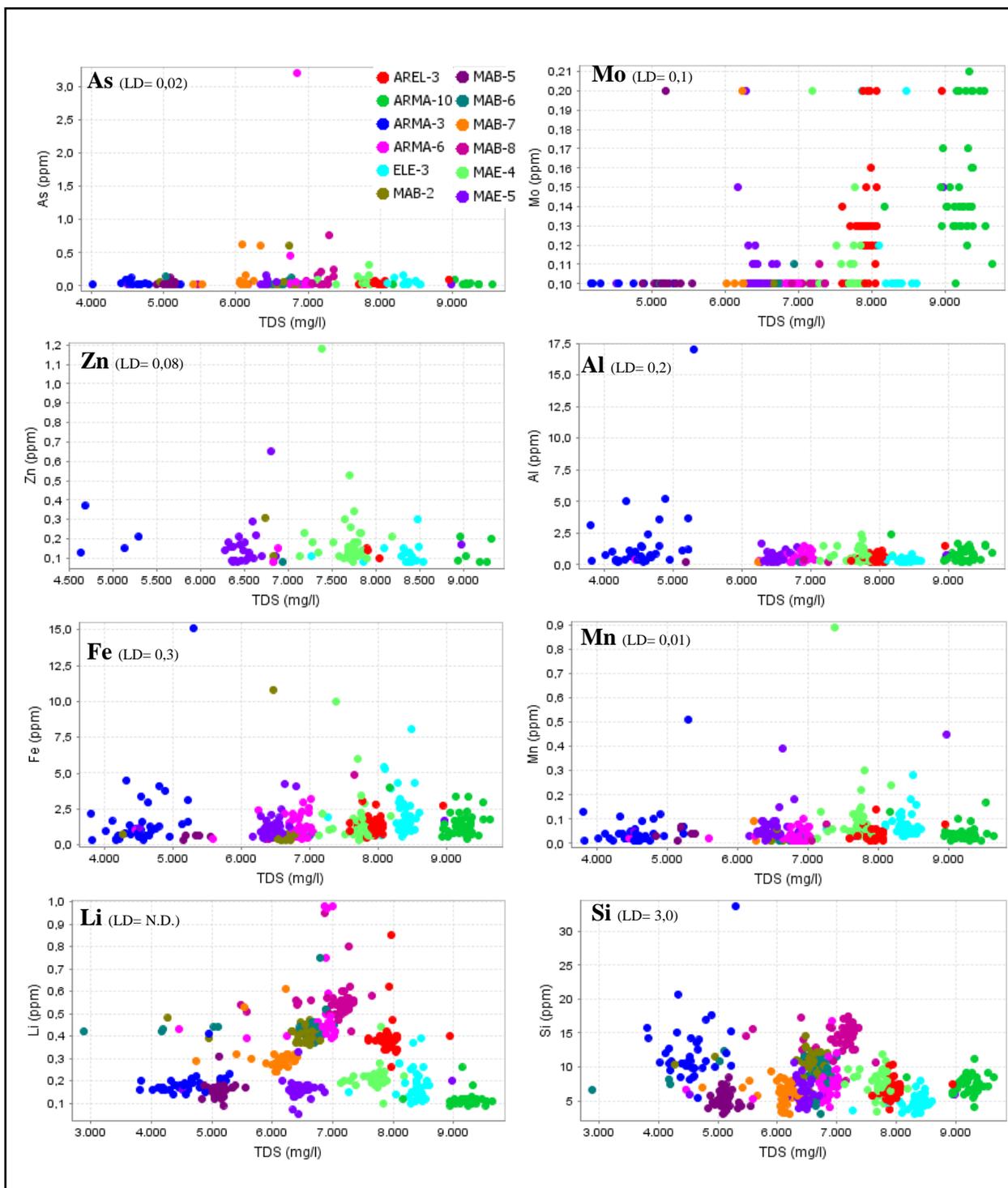


Figura 6.17 Concentraciones relativas de algunos elementos menores y traza. Cada color representa un pozo. LD: Límite de detección (ppm).

## Sector Salar Elvira

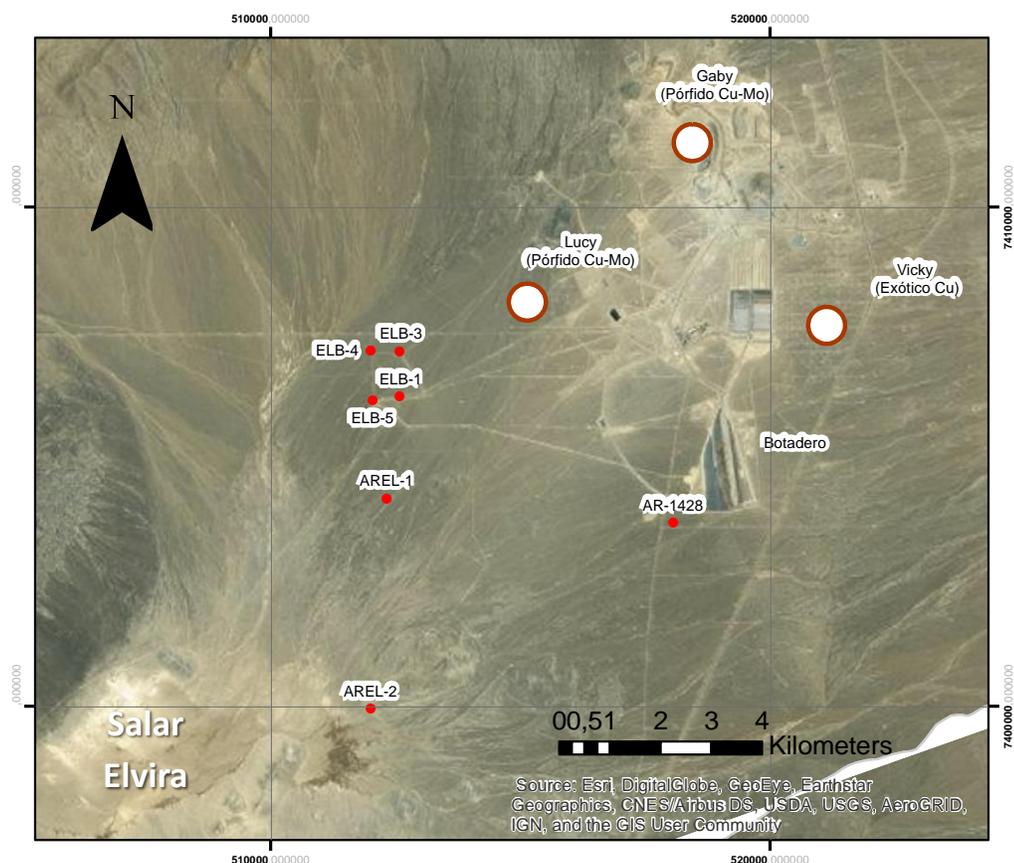


Figura 6.18 Ubicación pozos de muestreo en sector Salar Elvira.

### 6.1.7 Parámetros Físico-Químicos

El pH de las aguas subterráneas del sector Salar Elvira, se muestra en la Figura 6.19. El *Box Plot* de color gris considera todas las muestras de este sector. Se observa que las aguas subterráneas presentan valores pH que oscila entre 6,5 y 8 (sin considerar *outliers*), lo que indica que en promedio estas aguas subterráneas son neutras a alcalinas. Según lo descrito por Hem (1985), estos valores se encuentran dentro del rango esperado para aguas naturales, de pH entre 6,5 y 8,5.

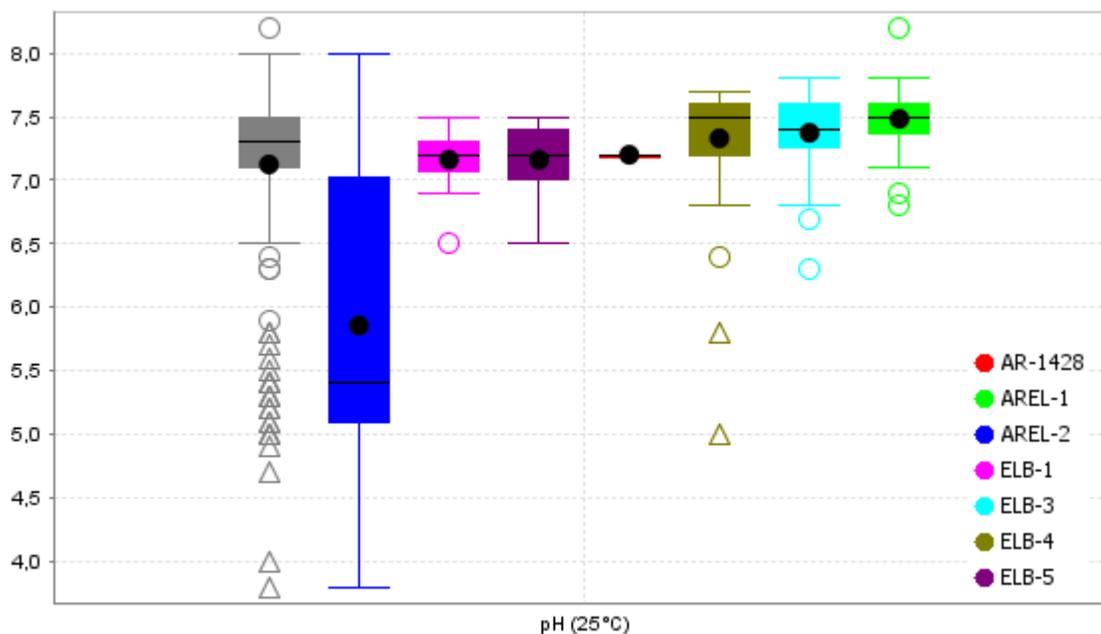


Figura 6.19 Gráfico *Box Plot* del pH de las aguas subterráneas del sector Salar Elvira. En gris se consideran los muestreos de todo el sector, y los demás colores distinguen los distintos puntos de muestreo. Los círculos representan *outliers* ( $>1,5$  IQR de la media) y los triángulos *far outliers* ( $>3$  IQR de la media).

En esta figura se observa que en promedio los pH de todos los pozos, excepto AREL-2, son muy similares entre sí, con promedios entre 7,2 y 7,6, presentando algunos valores pH anómalos respecto a los promedios locales de cada pozo, pero que no son constantes en el tiempo.

Se observa además que las muestras que presentan el pH más bajo, pertenecen al pozo AREL-2. En este punto el pH del agua subterránea tiene un promedio de 5,9, es decir un pH ácido, aunque los valores oscilan entre 3,8 y 8,0. Estos valores son notablemente menores a los registrados en los demás pozos y representan anomalías. Por otro lado, los pH más altos se registran en AREL-1, con un máximo de 8,2, aunque en promedio las aguas subterráneas de este punto tienen un pH levemente alcalino de 7,6.

Respecto a los sólidos totales disueltos, en la Figura 6.20 se muestran todas las mediciones obtenidas en los muestreos realizados en los distintos pozos del sector Salar Elvira. Se observa que los valores de TDS oscilan aproximadamente entre los 5.000 y 22.000 mg/l (sin considerar *outliers*), en promedio 13.457 mg/l TDS, lo que indica que las aguas subterráneas se clasifican como salobres.

Se puede ver que algunas muestras de los pozos ELB-1 y ELB-5 presentan algunos valores anómalos sobre el límite *background*, asociados a aguas subterráneas de tipo saladas. Por otro lado, se observa que las muestras de aguas subterráneas del pozo AREL-2 muestran los valores más altos de todo el sector. Estos valores anómalos oscilan entre los 31.000 y 36.000 mg/l, los que representan aguas subterráneas de tipo saladas y salmueras. Finalmente, la única muestra de AR-

1438 presenta un valor TDS anómalo, de 30.316 mg/l, asociado a un agua subterránea de tipo salada.

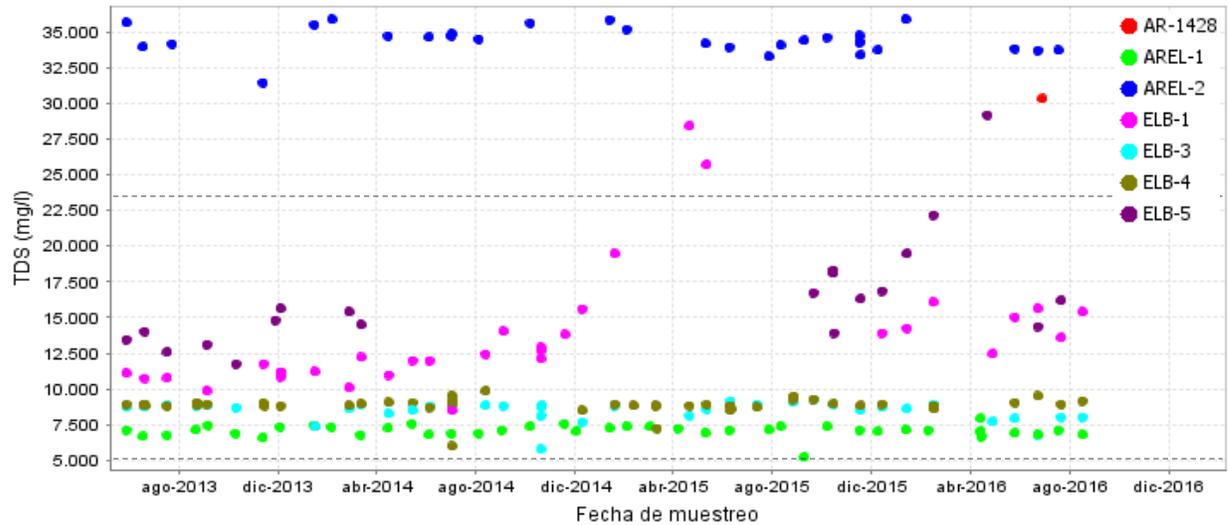


Figura 6.20 TDS de las muestras de aguas subterráneas del sector Salar Elvira, tomadas desde mayo de 2013 a agosto de 2016. Las líneas punteadas indican los límites superior e inferior del *background*.

Respecto a la conductividad eléctrica, se observa que se correlaciona muy bien con los sólidos totales disueltos (Anexo B, Figura B.3.1). Las aguas subterráneas de todo el sector Salar Elvira muestran una conductividad eléctrica promedio de 19.863  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Los valores promedio más altos ocurren en las aguas subterráneas de AREL-2, y los más bajos en AREL-1, al igual que los resultados obtenidos para los sólidos totales disueltos.

### 6.1.8 Geoquímica de elementos mayores

Los elementos mayores, con concentraciones >5 mg/l (Merkel *et al.*, 2005), presentes en las aguas subterráneas del sector Salar Elvira son: Ca, Cl, Na, K, Mg, HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub> y Si. Este último se considera normalmente como un elemento menor en las aguas naturales, por lo que se analiza posteriormente. En esta sección se incluyen solamente los elementos que hayan pasado el control del balance iónico.

#### 6.1.8.1 Clasificación del agua subterránea

Usando un diagrama de clasificación de Piper (Figura 6.21), según las proporciones en miliequivalentes por litro de los cationes mayores (Ca, Mg, (Na+K)) y aniones mayores (Cl, HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>), se grafican las muestras de aguas subterráneas de los distintos pozos.

En este diagrama se observan como tendencia general, que las aguas subterráneas de este sector presentan dos tipos de aguas subterráneas, aguas cloruradas y sulfatadas sodicas, y aguas cloruradas calcicas.

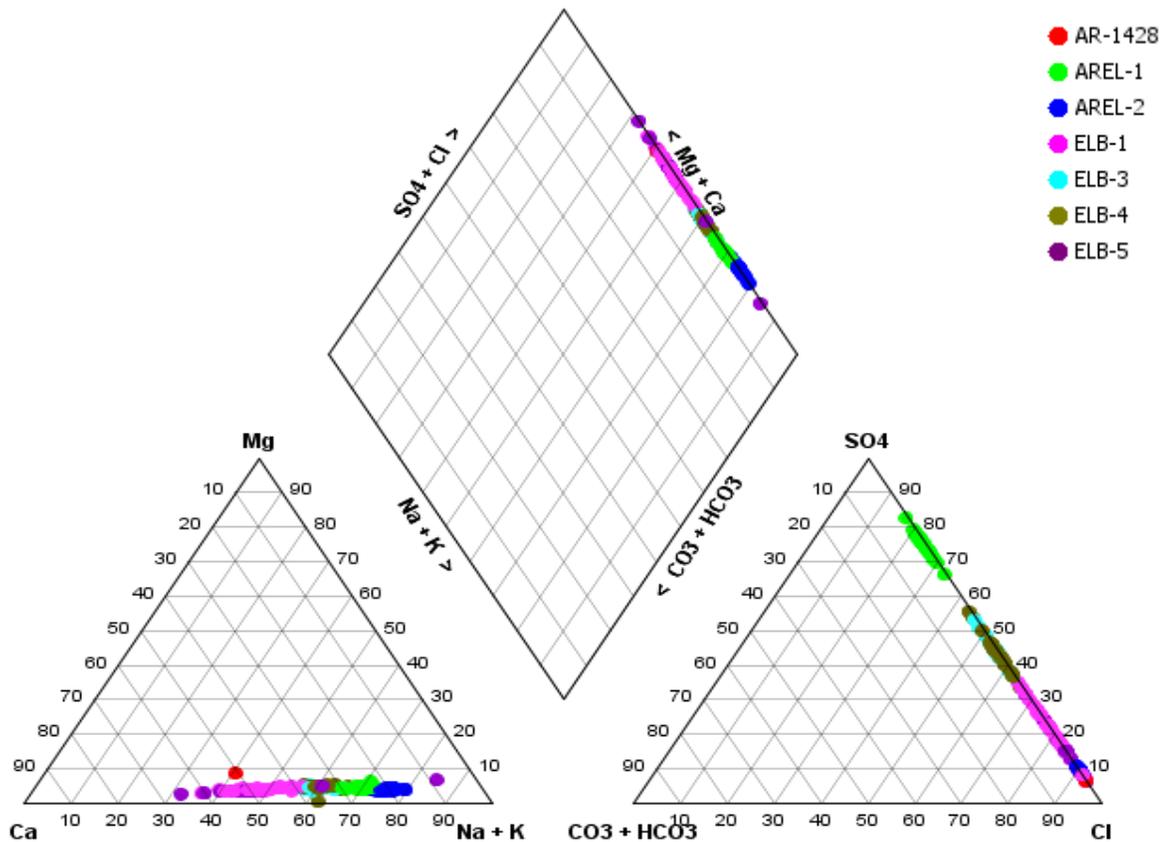


Figura 6.21 Diagrama Piper para aguas subterráneas del sector Salar Elvira. Los colores representan los distintos pozos del sector.

En los pozos ELB-3 y ELB-4 se presentan principalmente aguas de tipo clorurada sódica, y en menor medida aguas sulfatadas sódicas. En ELB-5 y ELB-1 se presentan principalmente aguas subterráneas de tipo cloruradas sódicas, y en menor medida aguas cloruradas cálcicas, al igual que en el pozo AR-1428. Las aguas de AREL-1 son sulfatadas sódicas, mientras que en AREL-2, el agua es de tipo clorurada sódica.

#### 6.1.8.2 Concentración de elementos mayores

En la Figura 6.22 se observan las concentraciones de los elementos mayores, relativos a los sólidos totales disueltos, registrados en las distintas muestras del sector Salar Elvira.

Se puede ver que existe una buena correlación positiva entre TDS y los elementos Ca, Cl, Na, Mg y K. En cambio para el  $\text{SO}_4$  existe una correlación negativa. Se observa para el Ca,  $\text{SO}_4$  y en menor medida Na, las muestras de AREL-2 no se correlacionan bien con las muestras de los otros pozos. Respecto al carbonato, no se observa ninguna correlación clara.

Se observa que las aguas subterráneas en AREL-2, muestran concentraciones anómalas positivas para los elementos Cl, Na, Mg, k y algunas muestras registran valores anómalos bajos para el  $\text{HCO}_3$ . Al igual que la muestra de AR-1428, que también registra concentraciones anómalas positivas, para los elementos Cl, Na, Mg, K y  $\text{HCO}_3$ . Se observan concentraciones anómalas en pocas muestras de los pozos ELB-1, ELB-5 y AREL-1, pero que no son constantes respecto a la mayoría de las muestras en estos pozos.

En la Figura 6.23 se muestran las concentraciones promedio de los elementos mayores según la dirección de flujo del agua subterránea. En esta figura se observa que el agua subterránea se enriquece en los elementos Cl, Na, Mg y K, y se empobrece en  $\text{HCO}_3$ , en el sentido del flujo de agua subterránea, excepto para las muestras del pozo AREL-1 que no siguen esta tendencia. Respecto al Ca y  $\text{SO}_4$ , la tendencia no es clara.

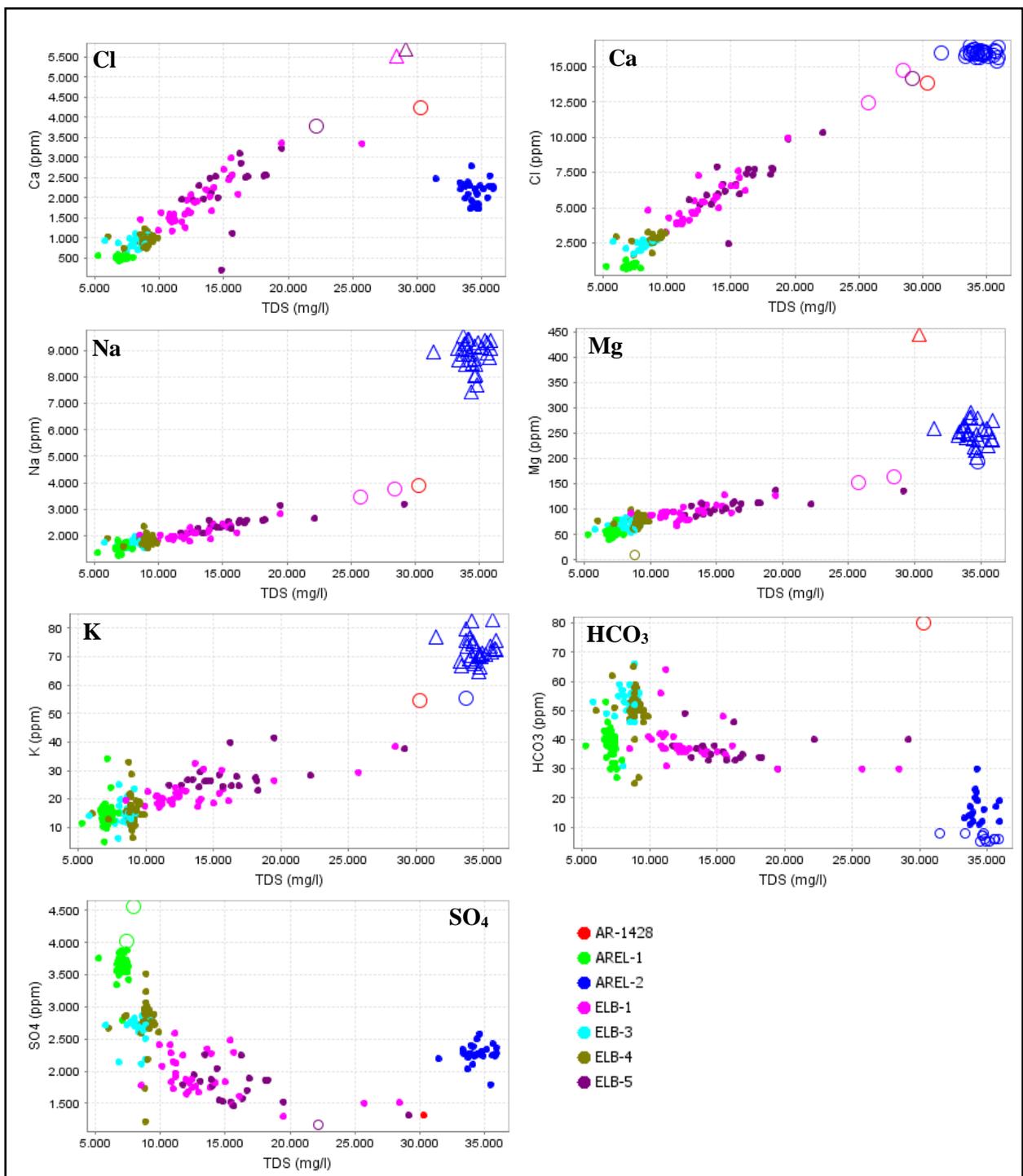


Figura 6.22 Concentraciones de elementos mayores relativas al TDS, de las aguas subterráneas del sector Salar Elvira. En colores los distintos pozos muestreados. Los círculos representan *outliers* (>1,5 IQR de la media) y los triángulos *far outliers* (>3 IQR de la media) respecto de todo el sector.

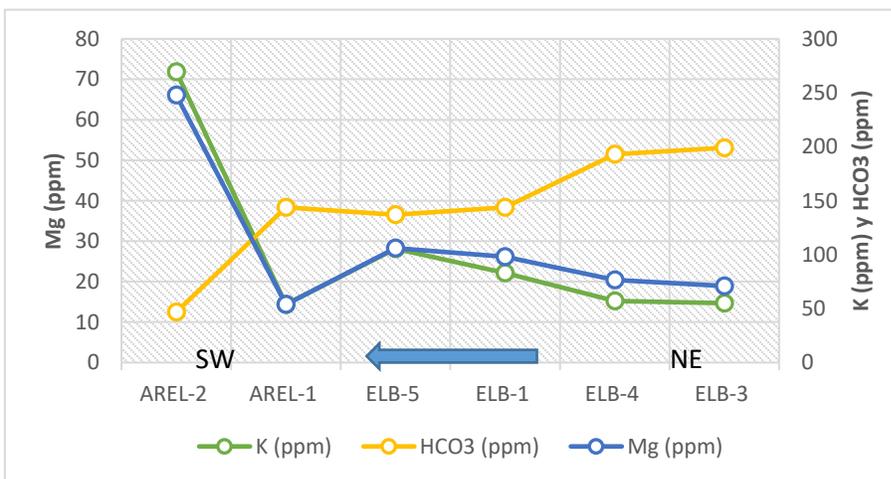
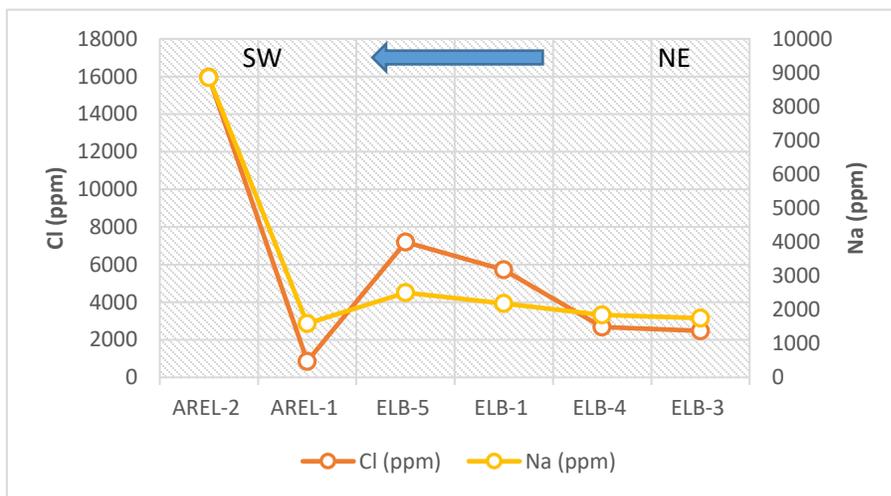
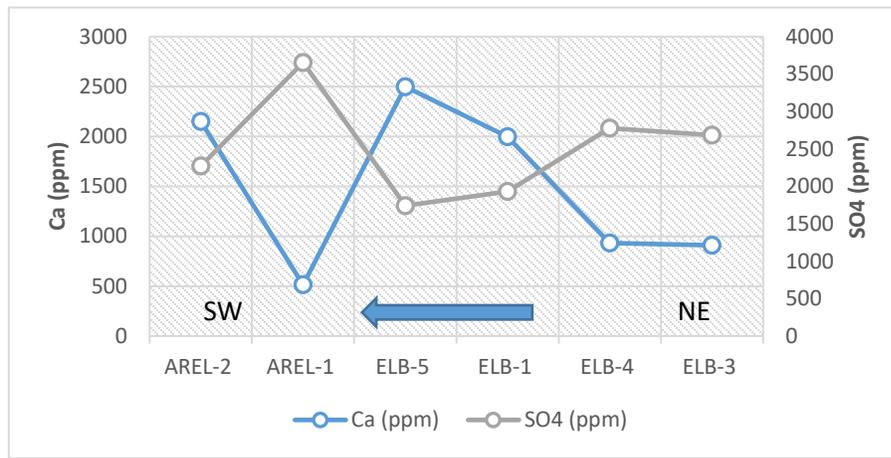


Figura 6.23 Concentración promedio de elementos mayores en muestras de agua subterráneas del sector Salar Elvira. La flecha indica la dirección general de flujo de las aguas subterráneas.

### 6.1.9 Geoquímica de elementos menores y traza

Al igual que para los otros sectores, los elementos menores y traza se analizan en conjunto. Los elementos analizados corresponden a Al, As, Cd, Cr, Cu, F, Fe, Li, Mn, Mo, Pb, Si, Zn.

En la Figura 6.24, se muestran las concentraciones de algunos elementos, relativas a los sólidos totales disueltos. En esta figura se puede ver que la muestra de AR-1428 presenta altas concentraciones en varios elementos respecto a otros pozos. Esto también ocurre en las muestras de aguas subterráneas de los pozos AREL-1 y AREL-2, y además en estos puntos se observa en general, una mayor cantidad de muestras que registran altas concentraciones y con una amplia variabilidad para los distintos elementos. A continuación, se presentan los resultados por elemento que se observan en la Figura 6.24:

**Aluminio:** Las muestras de los distintos pozos registran pocos valores sobre el nivel de detección de este elemento, excepto en AREL-2 y AREL-1. En promedio, las mayores concentraciones de aluminio se encuentran en las muestras de agua subterránea del pozo AREL-1, con valores hasta los 1,07 ppm, aunque en los pozos ELB-5 y AR-1428 registran los máximos de la zona, con concentraciones de 4,6 y 5,8 ppm, respectivamente.

**Arsénico:** En general, las concentraciones entre los distintos pozos son similares, aunque el pozo ELB-4 exhibe el máximo de la zona de 0,7 ppm. Además, en AREL-1 se presenta un mayor número de muestras con contenidos de As respecto de otros pozos.

**Cadmio:** Se registran pocos valores sobre el nivel de detección de este elemento en los distintos pozos, con concentraciones similares de 0,01 ppm en los distintos pozos, excepto en ELB-4 que exhibe el máximo de todo el sector, con un valor de 0,02 ppm (Anexo B, Figura B.3.2).

**Cromo:** Las concentraciones de cromo son similares entre los distintos pozos, excepto en AREL-2 que muestra altas concentraciones respecto a los demás pozos. En este pozo, las muestras registran concentraciones de hasta 0,36 ppm, mientras que los otros pozos registran valores de hasta 0,12 ppm (Anexo B, Figura B.3.2).

**Cobre:** Son pocos los registros de cobre sobre el nivel de detección en los distintos pozos, con valores cercanos a 0,1 ppm, aunque en AREL-1 y ELB-4 se registran concentraciones mayores de 0,22 y 0,61 ppm, respectivamente.

**Flúor:** Las mayores concentraciones de flúor ocurren en las muestras del pozo AREL-1, con valores de hasta 2,2 ppm (Anexo B, Figura B.3.2).

**Hierro:** Los distintos pozos muestran pocos registros sobre el nivel de detección de este elemento, excepto AREL-1 y AREL-2. Este último, presenta los mayores contenidos de hierro, con concentraciones de hasta 147 ppm, mientras que en AREL-1 las muestras registran concentraciones cercanas a 2,5 ppm, aunque en este pozo una muestra registra un valor de 121 ppm. La muestra de AR-1428 también registra un valor alto de 26 ppm.

**Litio:** La muestra de AR-1428 registra el máximo de todo el sector, con una concentración de 2,9 ppm. Las muestras del pozo AREL-2 también muestran altas concentraciones de este

elemento. Se observa además una correlación positiva entre las concentraciones de litio y los sólidos totales disueltos (Anexo B, Figura B.3.2).

**Manganeso:** Las muestras de AREL-2 muestran las mayores concentraciones de manganeso, y registran un máximo de 7 ppm. La única muestra de AR-1428 presenta una concentración de 2,9 ppm, mientras que en el resto de los pozos los contenidos de Mn no superan los 0,2 ppm, aunque algunas muestras de AREL-1 y ELB-4 registran valores mayores.

**Molibdeno:** En AREL-1 se registra un mayor número de concentraciones de molibdeno respecto a otros pozos, con concentraciones que oscilan entre 0,1 y 0,2 ppm, mientras que las concentraciones de este elemento en otros pozos son de 0,1 ppm, con unos pocos valores de 0,2 ppm.

**Silicio:** Se observa que las mayores concentraciones de este elemento ocurren en las aguas subterráneas de AREL-1 y AR-1428, con máximos de 27 ppm, mientras que las concentraciones en los otros pozos se encuentran aproximadamente entre los 5 y 10 ppm.

**Zinc:** Se puede ver que se registran pocos valores sobre el nivel de detección de este elemento en las aguas subterráneas de todo el sector. Las concentraciones en los distintos pozos no superan los 0,2 ppm, excepto en AREL-2 y ELB-4, que registran máximos de 6,7 y 4,1 ppm, respectivamente.

Finalmente, respecto al plomo, no se registran concentraciones de este elemento en las muestras de aguas subterráneas de todo el sector Salar Elvira.

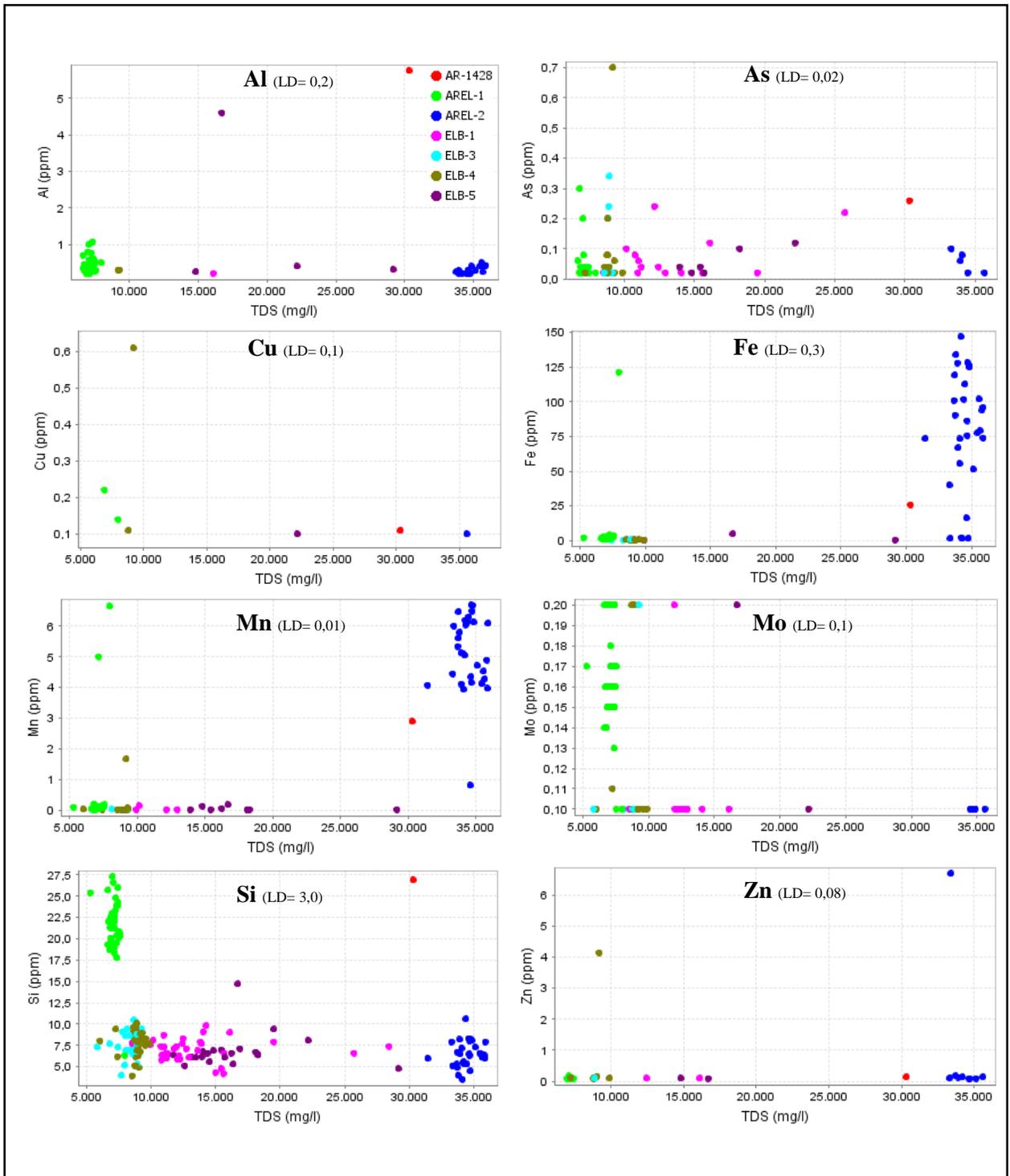


Figura 6.24 Concentraciones relativas de algunos elementos menores y traza. Cada color representa un pozo.

## Modelamiento hidrogeoquímico

El modelamiento hidrogeoquímico permite conocer los índices de saturación y la especiación de los distintos elementos presentes en solución (Anexo D), los que entregan información valiosa sobre el comportamiento de estos elementos y el equilibrio termodinámico de varios minerales, bajo las condiciones del sistema.

El índice de saturación de un mineral se puede expresar mediante la siguiente fórmula:

$$IS = \log \frac{IAP}{K_{sp}}$$

En donde IAP corresponde al producto de la actividad iónica de los iones en solución que forman el mineral, y  $K_{sp}$  es la constante del producto de solubilidades, la que es propia de cada mineral.

El índice de saturación indica si una solución se encuentra en equilibrio termodinámico o no, con respecto a una fase mineral (sólida). En teoría, si el índice de saturación de cierta fase mineral es igual a cero, entonces el fluido se encuentra saturado respecto a este mineral. Si el índice de saturación es positivo, este indica que la solución se encuentra sobresaturado respecto al mineral y este podría precipitar, en cambio si el índice de saturación es negativo, se indica que la solución se encuentra subsaturado respecto al mineral, y por lo tanto podría disolverse. En la práctica, se asume que el equilibrio se encuentra dentro del rango -0,2 a 0,2 (Merkel *et al.*, 2005).

El modelamiento hidrogeoquímico se realiza mediante el software PHREEQC 3.3.1, y utilizando la base de datos WATEQ4F, esto dado que incluye un mayor número de minerales más adecuados para la zona de estudio. A continuación, se presentan los principales minerales cuyos índices de saturación son posibles de calcular:

Alunita, Anhidrita, Atacamita, Brocantita, Calcita, Caolinita,  $CuFe_2O_4$ ,  $CuFeO_2$ ,  $Cu(OH)_2$ , Diasporo ( $AlOOH$ ), Dolomita ( $CaMg(CO_3)_2$ ), Fluorita, Gibbsita ( $Al(OH)_3$ ), Goethita, Halloysita, Hematita, Illita, Jarosita, Magnesita ( $MgCO_3$ ), Magnetita, Malaquita,  $MnOOH$ , Montmorillonita, Pirofilita, Pirolusita ( $MnO_2$ ), Rodocrosita ( $MnCO_3$ ), Smithsonita ( $ZnCO_3$ ), Siderita ( $FeCO_3$ ), Tenorita ( $CuO$ ), Yeso,  $ZnO$ ,  $Zn(OH)_2$ .

Este software también permite conocer la especiación de cada elemento, que teóricamente se encontraría en solución en base a las condiciones físico-químicas iniciales, pero que no necesariamente se presentan en la realidad. Según las condiciones físico-químicas y las distintas concentraciones de elementos, las principales especies de algunos elementos presentes en las aguas subterráneas de la zona de estudio son:

$Al(OH)_4^-$ ,  $H_2AsO_3^-$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Cl^-$ ,  $Cu(OH)_2$ ,  $F^-$ ,  $K^+$ ,  $Li^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $H_4SiO_4$ ,  $Zn^{2+}$ .

Los altos porcentajes de concentraciones registradas bajo el límite de detección presentados en la para distintos elementos de interés, no permiten elegir muestras representativas de las aguas subterráneas de cada pozo, por este motivo para los modelamientos hidrogeoquímicos se escogen las muestras que presentan contenidos de la mayor cantidad de elementos de interés (As, Cu, Mo, Pb, Zn).

Para el modelamiento hidrogeoquímico se asume una temperatura igual a 25°C para las aguas subterráneas en el nivel freático. Este valor es escogido mediante la comparación con otros sistemas similares, como los de Spence e Inca de Oro.

Para el modelamiento hidrogeoquímico de un sistema que contiene elementos que pueden ocurrir en más de un estado de valencia, se requiere especificar las condiciones redox que caracterizan a este sistema. En áreas permeables de rocas fracturadas sin un perfil de suelo, como lo son las gravas que cubren gran parte de las cuencas de la zona de estudio, las condiciones oxidantes comúnmente persisten lejos en el sistema, y en algunos casos el sistema completo se encuentra oxigenado (Freeze & Cherry, 1979). Las cuencas de Spence e Inca de Oro también presentan una cubierta de gravas, y en estos casos, las condiciones redox reportadas por otros autores, son moderadamente oxidantes a oxidantes, en particular en Inca de Oro se presenta un potencial de electrones (pe) promedio igual a 7 (Soto, 2012; Leybourne & Cameron, 2010).

Por estos motivos, el estado redox de los sistemas estudiados es considerado como oxidante, y se caracterizan por un potencial de electrones (pe) igual a 7. Este valor se encuentra dentro del rango de valores teóricos para aguas subterráneas en las condiciones de pH neutro a alcalino de los sistemas de estudio (Figura 6.25).

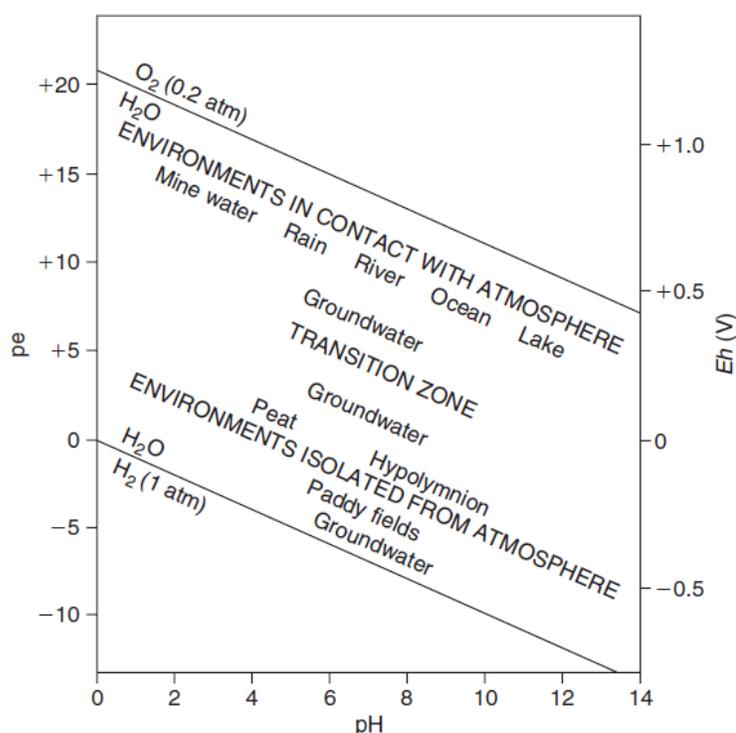


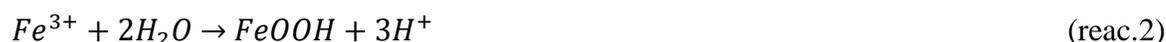
Figura 6.25 Diagrama de clasificación de distintos tipos de aguas naturales según el ambiente natural al que pertenecen, indicando condiciones de redox (pe) y pH. Extraído de Appelo & Postma (2005).

## 7 DISCUSIONES

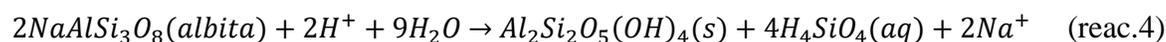
### Sector Salar de los Morros

El agua subterránea de este sector fluye principalmente desde el sector noreste hacia el suroeste, en donde se encuentra el punto de descarga que corresponde al Salar de los Morros. La distribución de los puntos muestreados en este sector se observa en la Figura 4.1, mostrando marcadas diferencias en cuanto al pH y a las variables geoquímicas, entre las aguas muestreadas en el extremo NE (LMB-1, LMB-2, LMB-4) respecto del SW (RHE99-2, LMB-5), lo que indica que están ocurriendo distintos procesos de interacción entre el agua y el medio hospedante, que afectan a las aguas subterráneas de estos dos sectores.

En el caso de las variables físico-químicas, el pH es el parámetro que mejor representa esta diferencia. El agua subterránea muestreada en el sector NE presenta rangos de pH básicos entre 7,7 y 9,6, que también se observan en las aguas del río Loa, que es considerado como *background* regional. En cambio, las aguas subterráneas del sector SW presentan rangos de pH más variables, entre 3,5 y 8,4, presentando valores de pH ácido que no se observan en el *background* regional. En un sistema carbonatado, como el presente en el acuífero del Salar de los Morros, el pH esperable para aguas subterráneas esta entre 7 y 8, aunque bajo ciertas condiciones puede ser considerablemente mayor (Freeze & Cherry, 1979), lo cual es consistente con el pH observado en el sector NE, pero no así en el sector SW. Esto nos indica que en el sector SW existen reacciones químicas entre el agua y el medio hospedante que están aumentando la concentración de iones  $H^+$  en solución. En sistemas de aguas naturales, iones de  $H^+$  pueden ser producidos por varios tipos de reacciones. Dentro de estas se encuentra la oxidación de sulfuros (como piritita), o la oxidación del ion ferroso a ion férrico y la subsecuente precipitación de hidróxidos de hierro (III) (Hem, 1985), que se observan en las reacciones siguientes:



Estos procesos son capaces de explicar cambios en la acidez de las aguas subterráneas, sin embargo, análisis de pH relacionados directamente con estos procesos han reportado rangos de pH más ácidos, de entre 1 y 4 (Hem, 1985), que los observados en el sector SW del Salar de los Morros. En sistemas como el del acuífero de Salar de los Morros, la presencia de carbonatos actúa neutralizando pH ácidos a valores más altos (reacción 3). A este efecto, se le puede sumar el de reacciones de hidrólisis de feldespatos (reacción 4), que también actúan aumentando el pH. Ambas reacciones se observan a continuación:



Respecto a los sólidos totales disueltos, no se observan importantes diferencias entre las aguas de un sector con otro, siendo en ambos casos aguas de tipo salobre, excepto en el pozo PMB99-1. En estos acuíferos se espera que las aguas se vuelvan cada vez más salinas hacia el Salar (Freeze & Cherry, 1979), esta evolución si se observa entre los pozos LMB-4,-1,-2 que se encuentran en una misma línea de flujo, sin embargo las aguas subterráneas presentes en el sector noreste tienden a ser más salinas que las del sector suroeste, más cercanas al Salar de los Morros. Esto podría indicar que las aguas muestreadas en el sector SW pueden estar drenando o recibiendo aportes, desde un sector distinto al del sector NE. Respecto al pozo PMB99-1, se observa sus aguas subterráneas son de tipo salmueras, lo que puede estar representando aguas con mayor tiempo de residencia, y por tanto aguas más evolucionadas. La secuencia de Chevotarev (Freeze & Cherry, 1979) explica la evolución geoquímica de aniones mayores en las aguas subterráneas que se espera dentro de un acuífero. Esta evolución sería desde aguas de tipo carbonatadas a sulfatadas y finalmente a cloruradas, en donde las aguas de tipo cloruradas serían características de una zona más lejana o profunda dentro del acuífero, en donde el flujo de agua es muy lento y las aguas son muy antiguas. Según esto, la alta salinidad en PMB99-1 sería consistente con que las aguas subterráneas en este punto sean más cloruradas respecto del resto (Figura 6.5).

El análisis de elementos mayores también muestra diferencias entre las aguas subterráneas del sector NE y SW. Las aguas subterráneas del sector NE poseen mayores concentraciones de elementos como Cl, Ca, Na, Mg y en menor medida  $\text{HCO}_3$  y K, lo cual es consistente ya que poseen una mayor salinidad respecto a las aguas del sector SW, sin embargo, el sulfato muestra un comportamiento distinto.

Las concentraciones de sulfato en las aguas subterráneas de Salar de los Morros son más altas en comparación al *background* regional, de hasta un orden de magnitud mayor, y se encuentran por sobre los valores reportados en Inca de Oro (Tabla 5.3). En sistemas naturales de aguas subterráneas el sulfato proviene principalmente de la disolución de yeso y anhidrita (Freeze & Cherry, 1979). Respecto a esto, el cálculo de índice de saturación indica que las aguas subterráneas de la cuenca Salar de los Morros se encuentran saturadas en ambos minerales. Por otro lado, la disolución de yeso se encuentra acompañado de la liberación de iones de calcio a la solución. En la Figura 7.1 se presentan las concentraciones de  $\text{SO}_4$  versus Ca (en meq/l) en muestras de agua subterránea del Salar de los Morros. En esta figura se observa que las muestras de los distintos pozos no siguen una relación  $\text{SO}_4:\text{Ca} = 1:1$ . En particular en las aguas subterráneas de LMB-5, RHE99-2 y LMB-2 se observa una mayor presencia de sulfato en relación con el calcio, por lo que la disolución de minerales como yeso o anhidrita no logra explicar las altas concentraciones de sulfato por sí sola.

Otro proceso capaz de liberar sulfato en solución es la oxidación de sulfuros, como se observa en la reacción 1. En este ejemplo, la oxidación de pirita produce un aumento de sulfato acompañado de una disminución en el pH, lo cual se observa en las aguas subterráneas del sector SW, pero no en las aguas del pozo LMB-2. Dado que el sistema es carbonatado, no se descarta la posibilidad que pequeñas cantidades de acidez sean rápidamente neutralizadas por la reacción con carbonatos del sistema (reacción 3). Por otro lado, la oxidación de otros sulfuros como calcopirita, galena y esfalerita, también liberan sulfato a la solución junto con otros iones, pero en estos casos la oxidación no genera iones  $\text{H}^+$  (con  $\text{O}_2$  como agente oxidante), por lo que el pH de la solución no se ve afectado por este proceso.

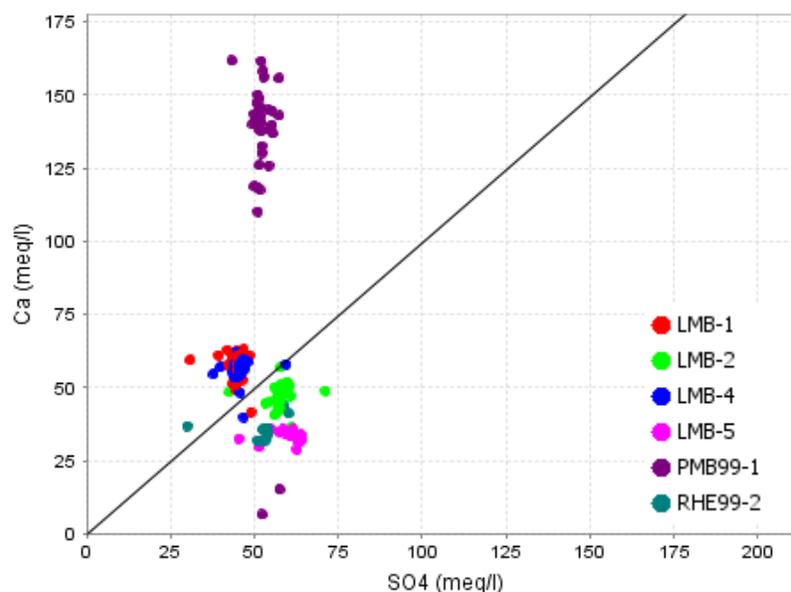


Figura 7.1 Concentración de  $\text{SO}_4$  versus Ca (en meq/l) en muestras de agua subterránea de Salar de los Morros. La línea corresponde a la relación  $\text{SO}_4:\text{Ca} = 1:1$ .

El análisis de elementos menores y traza también muestra diferencias entre las aguas subterráneas de los sectores noreste y suroeste. Las aguas subterráneas de NE muestran mayores concentraciones de Al, Mo, y en menor medida, As y Zn, en cambio en el sector SW muestran mayores concentraciones de Fe, Mn y Cr.

Las concentraciones de hierro en las aguas subterráneas de la cuenca son notablemente mayores al *background* regional, y a las presentes en los yacimientos Spence e Inca de oro, llegando a presentar concentraciones de hasta un orden de magnitud mayor (Figura 5.1, F). Una fuente de altas concentraciones de Fe en las aguas subterráneas es la oxidación de sulfuros ferrosos (Hem, 1985), que sería concordante con una fuente de sulfato distinta de yeso o anhidrita en LMB-2, LMB-5 y RHE99-2.

Respecto al molibdeno, se observa que solo unas pocas muestras del pozo LMB-5 (sector SW) registran concentraciones de 0,1 ppm, mientras que en el sector NE este elemento fue detectado en un mayor número de muestras, con concentraciones mayores a las del sector SW, de hasta 0,2 ppm, y 0,3 ppm en PMB99-1. Estas concentraciones son mayores respecto del *background* regional, y son comparables con las reportadas en Spence e Inca de Oro (Figura 5.1, D). El molibdeno es un elemento común en sistemas de pórfidos cupríferos (Leybourne & Cameron, 2008). Al ser un elemento calcófilo se encuentra normalmente como molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ), o asociado en proporciones variables a sulfuros, por ejemplo, pirita ( $\text{FeS}_2$ ), galena ( $\text{PbS}$ ) y esfalerita ( $\text{ZnS}$ ) (Smedley, *et al.*, 2014). Por otro lado, bajo condiciones oxidantes, este elemento se encuentra disuelto normalmente como un oxoanión, ya sea  $\text{MoO}_4^{2-}$  ( $\text{pH} > 5$ ), o  $\text{HMoO}_4^-$  ( $\text{pH}$  entre 2-5). Debido a esto, a pH altos (neutro a alcalino), el molibdeno no es adsorbido por coloides, a diferencia de otros elementos cuyas especies iónicas son principalmente cationes, como es el caso del Cu, Zn y metales base (Leybourne & Cameron, 2008). A medida que el pH se vuelve más ácido, el molibdeno es adsorbido preferentemente en la superficie de óxidos de Fe y Al, pirita, y en menor

medida, óxidos de Mn y arcillas (Smedley, *et al.* 2014). Respecto a esto, se observa que las aguas subterráneas de todo Salar de los Morros, se encuentran sobresaturadas en óxidos de Fe, Al y Mn. Todo esto sugiere que, en ambos sectores del Salar de los Morros, existiría disolución de minerales que contienen molibdeno, preferentemente sulfuros, y que, en el sector suroeste, las concentraciones de este elemento podrían encontrarse atenuadas debido a procesos de adsorción, debido a las condiciones de pH más ácido.

Las aguas subterráneas de la cuenca de Salar de los Morros muestran concentraciones de arsénico que son comparables con las de Spence, y mayores a las de Inca de Oro (Figura 5.1, C), pero son bajas respecto de los valores reportados en las aguas subterráneas del río Loa. Giblin (1994) expone que en aguas naturales las concentraciones típicas de este elemento son en promedio 2 ppb, valor que se encuentra varios ordenes de magnitud menor a las registradas en el río Loa. Estas altas concentraciones de As han sido explicadas por Romero *et al.* (2003) como resultados de procesos naturales asociados a los campos geotermales de El Tatio afectando al río Salado, tributario del río Loa. Esto indica que, para este elemento, las aguas del río Loa no serían representativas del resto de las aguas de la región. El arsénico puede estar presente como elemento accesorio, formando sulfuros, en sistema de pórfidos cupríferos. Según lo expuesto por Hem (1985), la forma más estable de este elemento en solución en agua es como oxoanión, en donde las especies dominantes son  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  (pH entre 3-7) y  $\text{HAsO}_4^{2-}$  (pH entre 7-11), lo cual coincide con lo observado por el cálculo de especies iónicas. Debido a la especiación de este elemento como oxoanión, al igual que el Mo, se espera que este elemento no sea adsorbido por superficies minerales a pH neutro a alcalino. Hem (1985) también indica que los principales factores que disminuyen las concentraciones de este elemento en solución son los procesos de adsorción y coprecipitación con oxihidróxidos de hierro, de los cuales la goethita se encuentra sobresaturada en las aguas subterráneas del Salar de los Morros, pudiendo atenuar las concentraciones de este elemento en las aguas subterráneas del sector suroeste, debido a las condiciones de pH más ácido.

Las pocas muestras que registran zinc en las aguas subterráneas del Salar de los Morros muestran que, en comparación al sector suroeste, las aguas subterráneas del sector noreste presentan mayores contenidos de Zn, y además son los únicos en registrar contenidos de Cu (LMB-1, 2 y PMB99-1). Se observa que las concentraciones de ambos elementos son comparables con las de Spence e Inca de Oro (Figura 5.1, E), y superan en más de un orden de magnitud al *background* regional. Respecto del Cu, para valores elevados de pH (neutro a alcalino), se espera que la movilidad de este elemento este fuertemente limitada por procesos de precipitación como  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ , coprecipitación con óxidos de hierro, y adsorción a superficies minerales inmóviles (Taufen, 1997). Del cálculo de índices de saturación se observa que  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  se encuentra saturado en las aguas subterráneas de LMB-2, y como se mencionó anteriormente, varios óxidos e hidróxidos de Fe se encuentran sobresaturados en las aguas subterráneas de los distintos pozos, pudiendo limitar la dispersión de este elemento. Por su parte, en condiciones de pH elevado (neutros a alcalino), la movilidad del zinc también se encuentra limitada debido a procesos de adsorción a superficies inmóviles y precipitación/coprecipitación de óxidos e hidróxidos (Soto, 2012). Los índices de saturación muestran minerales de zinc saturados y sobresaturados, en los pozos LMB-1, 2 y 4, los que podrían limitar los contenidos de este elemento en las aguas subterráneas.

De los elementos analizados, el As, Cu, Mo y Zn son reconocidos por los autores Leybourne & Cameron (2010) como elementos claves para la exploración geoquímica en aguas subterráneas de cuerpos mineralizados de tipo pórfido cuprífero que puedan estar ocultos bajo cobertura. Según

estos autores, las plumas de dispersión de anomalías positivas de As y Mo se pueden reconocer en las aguas subterráneas a grandes distancias, en comparación con el tamaño del cuerpo mineralizado, desde el origen de la anomalía, mientras que las anomalías positivas de Cu y Zn ocurrirían en las aguas subterráneas dentro y cercanas al depósito. Estos autores también señalan que en Spence las concentraciones de As y Mo en las aguas subterráneas aumentan dentro del depósito y se mantienen altas por al menos 2 km gradiente abajo desde el depósito, gracias a las condiciones de pH cercanas a neutras y redox moderadamente oxidantes.

En las aguas subterráneas de Salar de los Morros se reconocen anomalías positivas de As, Cu, Mo y Zn en las aguas subterráneas de LMB-1, LMB-2 y PMB99-1, indicando la posibilidad de que ocurran cuerpos mineralizados en las cercanías a estos puntos. Por otro lado, el cálculo de índices de saturación muestra saturación para distintos minerales de Cu en las aguas subterráneas de esos pozos, lo que indica que estos minerales podrían estar presentes, si la cinética de reacciones lo permite. Según este modelamiento, en al menos una muestra, las aguas en LMB-1 muestran saturación en tenorita, mientras que en LMB-2 muestran saturación en atacamita y sobresaturación en tenorita, y finalmente en PMB99-1 muestran saturación en atacamita y tenorita. Estos minerales fueron identificados por Sillitoe (2005) como algunos de los minerales característicos de una zona oxidada de un pórfido cuprífero con alteración supergena. Por otro lado, las altas concentraciones de Fe y de sulfato en relación con el calcio, que se observan en LMB-2, LMB-5 y RHE99-2, sugieren la ocurrencia de procesos de oxidación de sulfuros, en particular pirita.

Las evidencias sugieren la posible ocurrencia de un cuerpo mineralizado de tipo pórfido de Cu-Mo en las cercanías de LMB-2, mientras que, en los otros pozos, las evidencias no son tan concluyentes al respecto. Los pozos más cercanos a LMB-2 se encuentran a más de 1,5 km, por lo que la densidad de pozos no es suficiente para vectorizar hacia la mineralización de interés a partir de la interpolación de datos. Sin embargo, en base al flujo general NE-SW en la cuenca, se estima que el potencial cuerpo de mena podría encontrarse en dirección NE desde el pozo LMB-2 sugiriendo un área de interés prospectivo (Figura 7.2).

Por otro lado, se debe tomar en cuenta que, debido a los altos límites de detección de los métodos analíticos utilizados, existe un sesgo en la información de las concentraciones de los distintos elementos, en particular los elementos menores y traza, por lo que las muestras elegidas para los distintos análisis no son necesariamente representativas de las aguas subterráneas de los distintos pozos. Esto implica que es necesario corroborar los resultados presentados en este estudio con más información geoquímica.

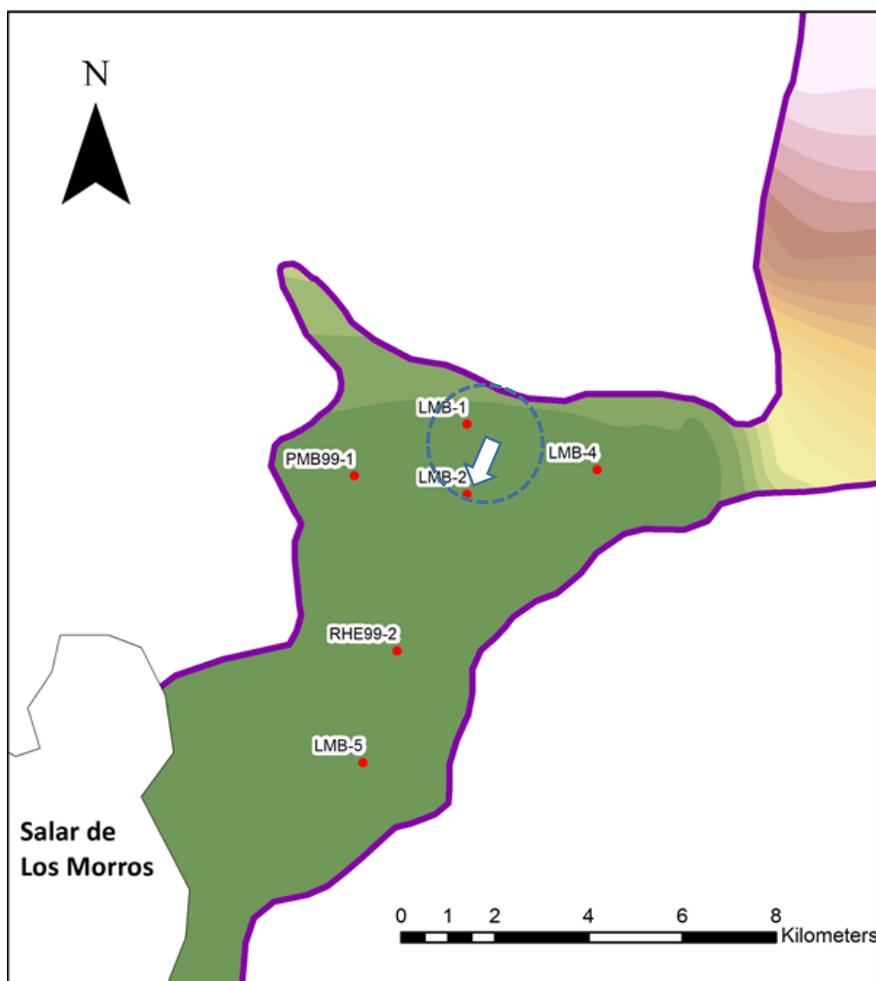


Figura 7.2 Mapa de ubicación de pozos y acuífero (marcado de color morado) del sector Salar de los Morros. Flecha blanca indica la posible dirección de proveniencia de las anomalías geoquímicas. El círculo azul marca el área de interés prospectivo.

## Sector Llano Mariposas

En el acuífero de Llano Mariposas, el agua subterránea fluye principalmente de noreste a suroeste, desde los faldeos del cerro Quimal hacia Quebrada Escondida. Los pozos muestreados se encuentran distribuidos aproximadamente en el mismo sentido del flujo de agua subterránea (Figura 3.1).

Las variables físico-químicas no muestran marcadas diferencias entre los distintos pozos. Respecto al pH, se observa que las aguas subterráneas poseen valores de pH neutros a alcalinos, que oscilan entre 7,1 y 8,2, y que son similares a los valores del *background* regional. Estos valores registrados en el acuífero de Llano Mariposas son esperables para aguas subterráneas en sistemas carbonatados, de pH entre 7 y 8 (Freeze & Cherry, 1979).

Según los valores de los sólidos totales disueltos, las aguas subterráneas de la cuenca Llano Mariposas son de tipo salobre y muestran como tendencia general que las aguas subterráneas de los pozos al NE tienden a presentar menor salinidad que las del SW, que se encuentran aguas abajo en la dirección de flujo. Esto es esperable al representar aguas más evolucionadas, es decir aguas que han interactuado más tiempo con el medio permeable (Freeze & Cherry, 1979). Por otro lado, los pozos MAE-4, ARMA-3 y ARMA-10 no siguen esta tendencia, lo que podría estar indicando distintas profundidades del acuífero en estos puntos en donde aguas más profundas tienden a concentrar una mayor cantidad de solutos y por lo mismo una mayor salinidad, o que las aguas subterráneas de estos sectores pueden estar recibiendo aportes desde otras direcciones distintas al flujo general noroeste-sureste, que aumenten o disminuyan las concentraciones de TDS. Respecto a esto, en la Figura 6.13 se observa que las muestras de aguas subterráneas de cada pozo presentan una baja dispersión y muestran ser del mismo tipo, por lo que no representarían mezclas de aguas.

La clasificación de Piper indica que las aguas subterráneas de la cuenca Llano Mariposas corresponden a aguas de tipo sulfatadas sódicas, por lo que según la secuencia de Chevotarev (Freeze & Cherry, 1979), estas aguas pertenecerían a una zona con poco movimiento de aguas subterráneas.

El análisis de elementos mayores muestra contenidos anómalos de K en las aguas subterráneas de ELE-3. Las concentraciones de potasio en las aguas subterráneas de este pozo promedian 26 ppm, valor que no supera el *background* regional, pero que es dos veces mayor que las concentraciones registradas en los demás pozos de la cuenca Llano Mariposas, constituyendo una anomalía de contraste positiva, localmente en este sector.

El potasio es un elemento abundante en las rocas, que puede encontrarse en feldespatos potásicos, micas, arcillas y sales de potasio. En sistemas naturales de aguas subterráneas, este elemento raramente ocurre en altas concentraciones, comparado a otros elementos mayores, ya que es difícilmente liberado de minerales silicatados y muestra una fuerte tendencia a ser reincorporado a los productos sólidos de la meteorización, especialmente en minerales de arcilla por intercambio catiónico, de donde no pueden ser nuevamente removidos por este mismo mecanismo. Por otro lado, las rocas evaporíticas pueden incluir localmente estratos de sales de potasio, que son altamente solubles y constituyen una fuente de altas concentraciones de potasio en salmueras (Hem, 1985).

La ocurrencia del potasio no está restringida a los sistemas de pórfidos cupríferos, por lo que no es usado como guía de exploración de estos depósitos, sin embargo, puede aportar información valiosa en la exploración de cuerpos mineralizados. En un estudio de las aguas subterráneas del pórfido Cu-Mo de Casa Grande, Taufen (1997) identifica anomalías de pH, potasio, sulfato, arsénico y molibdeno como expresiones anómalas asociadas a la mineralización. Este autor explica las altas concentraciones de potasio en las aguas subterráneas cercanas al yacimiento son resultado del ataque ácido generado por la oxidación de sulfuros de zonas de alteración potásica o fílica del sistema. Respecto a esto, en las aguas subterráneas de ELE-3 el promedio de pH es el menor de toda la cuenca, y las concentraciones de sulfato se encuentran sobre el promedio general, sin embargo, estos no constituyen anomalías respecto a los otros pozos de la cuenca. Sin embargo, no se descarta la posibilidad de que exista generación de acidez en pequeñas cantidades, que pueda ser neutralizado rápidamente, por lo que no se reconozcan pH anómalos bajos. Por otro lado, las concentraciones de sulfato en las aguas subterráneas de la cuenca Llano Mariposas presentan una mediana de 3.552 ppm, al menos un orden de magnitud mayor al

*background* regional (mediana 203 ppm) y comparables con las concentraciones en Spence (mediana 6.102 ppm). Además, en la Figura 7.3 se observa que las muestras de los distintos pozos de la cuenca no siguen una relación  $SO_4:Ca = 1:1$ , y presentan más bien una mayor cantidad de sulfato en relación al calcio, indicando un origen del sulfato distinto a la disolución de yeso o anhidrita, por lo que se sugiere la oxidación de sulfuros como una posible fuente del sulfato.

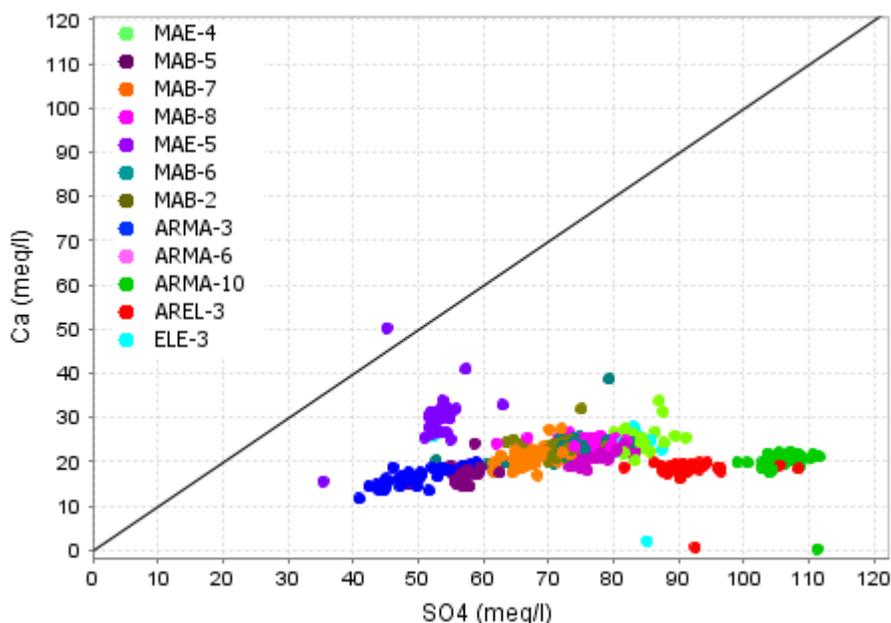


Figura 7.3 Concentración de  $SO_4$  versus Ca (en meq/l) en muestras de agua subterránea de Llano Mariposas. La línea corresponde a la relación  $SO_4:Ca = 1:1$ .

Respecto al ion cloruro, se observan concentraciones anómalas en las aguas subterráneas de MAE-5 (Figura 6.14), pero se desconoce su potencial para la exploración de sistemas de pórfidos cupríferos. Las rocas ígneas no entregan altas concentraciones de este elemento a las aguas naturales circulantes, sin embargo, fuentes considerablemente más importantes están asociadas a rocas sedimentarias, en particular las evaporitas (Hem, 1985), cuyas ocurrencias son esperables en cuencas de drenaje cerradas. De lo anterior se espera que estas sean la fuente más probable de esta anomalía de Cl.

Los resultados de elementos menores y traza muestran en distintos pozos de la cuenca, altas concentraciones de varios elementos respecto del *background* regional y que son comparables con las reportadas en otros depósitos, por lo que son consideradas anomalías positivas de contraste respecto de las aguas regionales. De estos elementos As, Cu, Fe, Mo, Pb y Zn, son elementos de interés que pueden relacionarse con sistemas de pórfidos cupríferos. En particular, los únicos pozos que registran contenidos de todos estos elementos son ARMA-3 y ELE-3.

Respecto al Fe, se observa que las concentraciones son altas en distintos pozos, registrando valores que oscilan entre 0,3 y 15 ppm. Estos valores son mucho mayores a los del *background* regional (mediana de 0,08 ppm Fe), por lo que se consideran anomalías positivas respecto a aguas regionales, y además son comparables con las concentraciones de Inca de Oro que presentan una

mediana de 1,46 ppm, y un máximo de 11,6 ppm (Figura 5.1, F). El hierro es un constituyente común en menas sulfuradas metálicas, como lo son pórfidos cupríferos. Este elemento se encuentra en distintos minerales, como magnetita, biotita y sulfuros de hierro, estos últimos al ser atacados por agua en ambientes oxidantes, forman óxidos férricos, oxihidroxidos, (por ejemplo, hematita o goethita) o hidróxidos férricos ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) (Hem, 1985). Altas concentraciones de hierro pueden ocurrir en solución en sitios de oxidación de sulfuros de hierro, por ejemplo, pirita (reacción 1), lo que también produciría sulfato, y explicaría una fuente de sulfato distinta a la de yeso o anhidrita observado en la Figura 7.3. Otra fuente de altas concentraciones de hierro es mediante la disolución de  $\text{FeCO}_3$  (Hem, 1985). Respecto a esto, se observa que las aguas subterráneas de la cuenca Llano Mariposas se encuentran subsaturadas en este mineral, por lo que se espera que este mineral no se encuentre presente, considerando el bajo movimiento de las aguas subterráneas, lo que implica altos tiempos de residencia de estas en el sistema (Deutsch & Siegel, 1997).

Las concentraciones de arsénico registradas en las aguas subterráneas de la cuenca Llano Mariposas, oscilan entre los 0,02 y 3,2 ppm, estos valores son comparables y mayores a los reportados en los depósitos de Inca de Oro y Spence (Figura 5.1, C), por lo que se consideran anomalías positivas. Los cálculos de especies iónicas muestran que este elemento se encuentra en solución principalmente como oxoanión  $\text{HAsO}_4^{2-}$ , concordante con lo expuesto por Hem (1985) para las condiciones de pH neutro a alcalino, por lo que se espera que este elemento no sea adsorbido por superficies minerales. En condiciones oxidantes y de pH neutro a alcalino, los sulfuros no son estables (Leybourne & Cameron, 2008). Todo esto indica que, en las condiciones presentes en el sistema, se espera que este elemento presente una buena movilidad al no verse afectado por procesos de adsorción o de precipitación.

Los resultados de elementos menores y traza muestran altos contenidos de molibdeno en las aguas subterráneas de distintos pozos, aunque ARMA-10, AREL-3, MAE-4 y MAE-5, presentan una mayor cantidad de anomalías positivas. Estas concentraciones se encuentran entre 0,2 y 0,1 ppm, valores que son por lo menos un orden de magnitud mayor al *background*, por lo que constituyen anomalías positivas de contraste regional, y que son comparables con los máximos valores registrados en Spence e Inca de Oro (Figura 5.1, D). El cálculo de especies iónicas de este elemento indica que se encuentra disuelto como oxoanión, principalmente como  $\text{MoO}_4^{2-}$ , para las condiciones oxidantes y pH neutro a alcalino del sistema, lo cual es concordante con lo expuesto por Hem (1985). Por este motivo, se espera que este elemento presente una buena movilidad, al igual que As, al no sufrir procesos de adsorción o precipitación.

Respecto al plomo, se observa que solo unas pocas muestras, pertenecientes a los pozos MAE-4, ARMA-3 y ELE-3, registran concentraciones de este elemento, las que se encuentran entre 0,2 y 0,3 ppm. Estas concentraciones son al menos un orden de magnitud mayor a las del *background* regional, representando anomalías positivas, y son comparables con los máximos valores registrados en Inca de Oro. Concentraciones anómalas de este elemento se pueden encontrar en sistemas de pórfidos cupríferos, en particular en zonas más distales a los cuerpos de mena, principalmente en zonas de alteración sericitica y en menor medida, en zonas de alteración argílica avanzada y propilítica (Halley *et al.*, 2015). En sistemas naturales, la movilidad de este elemento es baja, debido a la baja solubilidad de los minerales de plomo (Hem, 1985). Las concentraciones de este elemento tienden a mantenerse bajas en las aguas subterráneas, debido a procesos de adsorción a la superficie de sedimentos, y a la coprecipitación del plomo con óxidos de Mn (Hem, 1985). Además, óxidos e hidróxidos de Fe tienen afinidad para adsorber metales, como el Pb, en su superficie en condiciones de pH neutros a alcalino como las de este sistema

(Soto, 2012). Respecto a esto, los índices de saturación muestran una sobresaturación en óxidos e hidróxidos de Fe en las aguas subterráneas de los distintos pozos, y en particular en ELE-3, se presenta una sobresaturación en óxidos de manganeso. Esto implica que la dispersión de este elemento en las aguas subterráneas de la cuenca este posiblemente limitada, y las anomalías reportadas sean de carácter local.

Los contenidos de zinc registrados en las aguas subterráneas de la cuenca Llano Mariposas oscilan entre 0,08 y 1,18 ppm, valores que son al menos un orden de magnitud mayor al *background* regional, por lo que se consideran anomalías positivas, y son similares a las mayores concentraciones registradas en Spence e Inca de oro (Figura 5.1, E). Los resultados indican que la mayoría de las muestras de los pozos MAE-4, MAE-5 y ELE-3 presentan anomalías positivas, mientras que los demás pozos presentan una menor cantidad de anomalías positivas y con menores contenidos de Zn. En particular los pozos MAB-5, MAB-7 y MAB-8 no registran contenidos de este elemento. Debido a los pH elevados (neutro a alcalino) del sistema, se espera que la movilidad del zinc se encuentre limitada procesos de adsorción a superficies inmóviles y precipitación/coprecipitación de óxidos e hidróxidos (Soto, 2012), como oxihidróxidos de Fe, los cuales se encuentran sobresaturados en las aguas subterráneas de la cuenca según los índices de saturación.

Las únicas muestras que registran contenidos de Cu pertenecen a los pozos ARMA-3 y ELE-3, con concentraciones de 0,1 y 0,12 ppm, respectivamente. Las mayores concentraciones registradas en el río Loa son de 0,04 ppm, aunque la mediana es menor a 0,02, por lo que las concentraciones registradas en ARMA-3 y ELE-3 se consideran anomalías positivas respecto del *background* regional. Estas anomalías positivas son comparables con las concentraciones registradas en Spence (mediana 0,12 ppm Cu), y con los máximos registrados en Inca de Oro (0,32 ppm Cu) (Figura 5.1, B). A pH neutro a alcalino, la movilidad del Cu es limitada, pudiendo precipitar como  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ , coprecipitar con óxidos de Fe, o adsorberse a superficies minerales inmóviles (Taufen, 1997). Respecto a esto, los índices de saturación en ARMA-3 y ELE-3, indican que las aguas están sobresaturadas en varios óxidos e hidróxidos de Fe. En el depósito Spence, Leybourne y Cameron (2008) explican que la movilidad del Cu estaría limitada principalmente por la adsorción a arcillas, en vez de oxihidróxidos, y por la precipitación de óxidos, carbonatos o cloruros de Cu secundarios. Respecto a esto, los índices de saturación en ARMA-3 indican saturación en Tenorita y sobresaturación en  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  y  $\text{CuFeO}_2$ , mientras que en ELE-3 indican saturación en malaquita y tenorita, y sobresaturación en  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  y  $\text{CuFeO}_2$ .

Según lo descrito anteriormente, el As y Mo, serían elementos con alta movilidad en las aguas subterráneas, mientras que Cu, Pb y Zn, serían elementos con movilidad limitada, en las condiciones de pH y redox del sistema de Llano Mariposas. Esto es concordante con la distribución de estos elementos en la cuenca, en donde se observan anomalías positivas de As y Mo ampliamente en los distintos pozos, mientras que las anomalías positivas de Cu, Pb y Zn ocurren de manera acotada, en particular en ARMA-3 y ELE-3. Leybourne y Cameron (2010) identifican a estos elementos (As, Cu, Mo, Pb y Zn) como las principales guías de exploración geoquímica en aguas subterráneas para identificar la ocurrencia de pórfidos de Cu-Mo, en particular, la ocurrencia de anomalías positivas de Cu sería de carácter local a los depósitos, mientras que las anomalías positivas de As y Mo serían de carácter local a distal. Por este motivo, las anomalías de los pozos ARMA-3 y ELE-3 serían parte de plumas de dispersión generada por cuerpos mineralizados de tipo pórfido cuprífero, ubicados aguas arriba. Esto es concordante con los resultados del modelamiento hidrogeoquímico, que indica minerales oxidados de Cu (tenorita, malaquita),

saturados y sobresaturados en al menos una muestra de agua subterránea en estos dos pozos. Por otro lado, las altas concentraciones de hierro y sulfato en las aguas subterráneas de la cuenca sugieren una posible relación con procesos de oxidación de pirita u otros sulfuros, minerales que se encuentra ampliamente en sistemas de pórfidos cupríferos, sugiriendo también la posible ocurrencia de estos cuerpos mineralizados ocultos en profundidad.

En el sector de ELE-3, el pozo más cercano se encuentra a 1,5 km aproximadamente. Estos pozos son muy distantes y no permiten vectorizar bien hacia la mineralización, en función de la interpolación de datos. Por otro lado, en ARMA-3 se reconocen 3 pozos a menos de 60 metros, pero son muy cercanos para realizar una interpolación de anomalías útiles. Además de estos pozos, el más cercano se encuentra a más de 1,5 km por lo que la densidad de pozos tampoco es suficiente para vectorizar hacia la mineralización de interés. Sin embargo, en base al flujo general NE-SW en la cuenca, se puede estimar que el potencial cuerpo de mena podría encontrarse en dirección NE desde los pozos ELE-3 y ARMA-3, sugiriendo dos áreas de interés prospectivo (Figura 7.4).

Por otro lado, se debe considerar que existe un sesgo en la información respecto de los contenidos de distintos elementos menores y traza, producto de los altos límites de detección inherentes de los métodos analíticos usados, lo que implica una baja representatividad de las muestras usadas para los modelamientos hidrogeoquímicos, por lo que es necesario corroborar los resultados presentados con más información geoquímica.

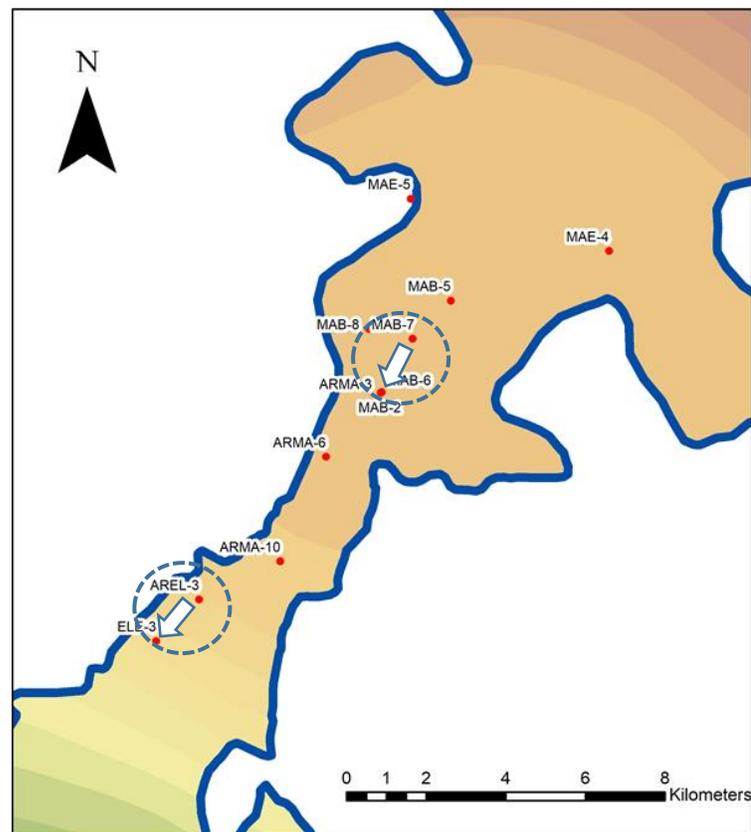


Figura 7.4 Mapa de ubicación de pozos y acuífero (marcado de color azul) del sector Llano Mariposas. Las flechas blancas indican las posibles direcciones de proveniencia de las anomalías geoquímicas. Los círculos azules marcan las áreas de interés prospectivo.

## Sector Salar Elvira

En este sector el agua subterránea fluye principalmente desde el noreste hacia el punto de descarga, que es el Salar Elvira. La distribución de los pozos de muestreo se observa en la Figura 4.1.

Las variables físico-químicas no muestran marcadas diferencias entre las aguas subterráneas muestreadas en los distintos pozos, excepto en AREL-2, en donde las aguas subterráneas presentan notables diferencias en cuanto al pH y a los sólidos totales disueltos. Respecto al pH, se observa que las aguas subterráneas de esta cuenca presentan valores regulares que oscilan entre 6,5 y 8,0 (sin considerar *outliers*), es decir presentan un pH levemente ácido a alcalino. Según lo descrito por Freeze y Cherry (1979), estos valores serían levemente menores a los valores teóricos esperados para sistemas carbonatados, como el de Salar Elvira, en donde se esperarían valores de pH entre 7 y 8. Por otro lado, el pH de las aguas subterráneas de AREL-2 se encuentra entre 3,8 y 8,0, presentando valores ácidos que constituyen anomalías dentro de la cuenca, y que se encuentran bajo los valores teóricos esperables para este sistema. Sin embargo, debido a la cercanía de este pozo al punto de descarga de la cuenca, se espera que las aguas subterráneas estén ampliamente afectadas por procesos oxidantes que en general disminuyen el pH (reacción 2, capítulo 7.1) (Hem, 1985).

Respecto a los sólidos totales disueltos (Figura 6.20), las aguas subterráneas de la cuenca Salar Elvira son de tipo salobre, excepto en AREL-2, en donde las aguas subterráneas son de tipo saladas a salmueras. Esta diferencia es esperable dada la cercanía de AREL-2 al Salar Elvira, en donde las aguas subterráneas se encuentran controladas por procesos evaporíticos que concentran a los solutos en solución. Respecto a los otros pozos, se observa, que las aguas subterráneas aumentan la concentración de TDS hacia el Salar Elvira, excepto AREL-1, en donde las aguas subterráneas presentan en promedio la menor concentración TDS de la cuenca. Esto podría estar indicando que las aguas subterráneas de AREL-1 pueden estar recibiendo aportes desde otras direcciones distintas al flujo general noroeste-sureste, que aumenten o disminuyan las concentraciones TDS.

En el diagrama de Piper de la Figura 6.21, se observa que las aguas subterráneas de la cuenca Salar Elvira son principalmente de tipo cloruradas, mientras que las aguas subterráneas de AREL-1 y unas pocas muestras de ELB-3, ELB-4 son de tipo sulfatadas. Según la secuencia de Chevotarev (Freeze & Cherry, 1979), la evolución geoquímica de aniones mayores en las aguas subterráneas dentro de un acuífero, se espera que sea desde aguas de tipo carbonatadas a sulfatadas y finalmente a cloruradas, en donde las aguas sulfatadas son características de una zona intermedia del acuífero con circulación de agua subterránea lenta, mientras que las aguas de tipo cloruradas serían características de una zona más lejana o profunda en donde el flujo de agua subterránea es muy lento y las aguas son muy antiguas. Tomando esto en cuenta, junto con el flujo general del agua subterránea de noreste a suroeste, se puede ver que las aguas subterráneas de la cuenca siguen esta evolución, excepto en AREL-1, en donde el sulfato vuelve a ser el anión predominante. Esto indica la ocurrencia de procesos que aumenten la cantidad de sulfato respecto de otros aniones, como puede ser mezclas de aguas subterráneas menos evolucionadas, o reacciones que liberen altas cantidades de sulfato.

El análisis de elementos mayores indica que las concentraciones de Cl, Na, Mg y K son anómalas en las aguas subterráneas de AREL-2 respecto a los demás pozos, mientras que los contenidos de Ca, SO<sub>4</sub> y HCO<sub>3</sub> se muestran relativamente bajos. Estas altas concentraciones son esperables dada la alta salinidad presente en las aguas del pozo AREL-2, mientras que los menores contenidos de Ca, SO<sub>4</sub> y HCO<sub>3</sub> pueden estar relacionados con procesos de precipitación de carbonatos y sulfatos, debido a procesos evaporíticos en las cercanías del salar Elvira.

Las concentraciones de sulfato en las aguas subterráneas de Salar Elvira son hasta un orden de magnitud mayor a las del *background* regional, y se encuentran por sobre los valores reportados en Inca de Oro. En los sistemas naturales el sulfato presente en las aguas subterráneas proviene principalmente de la disolución de yeso y anhidrita (Freeze & Cherry, 1979). Respecto a esto, los índices de saturación calculados para las aguas subterráneas de los distintos pozos indican saturación respecto a ambos minerales sulfatados.

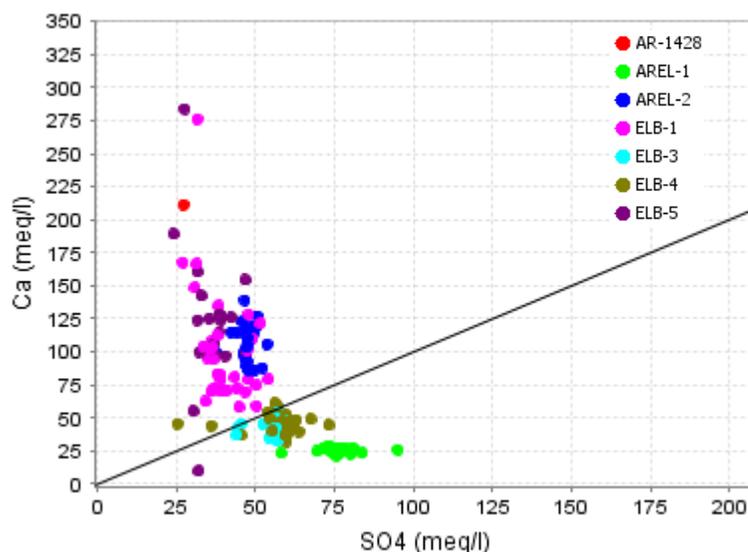


Figura 7.5 Concentración de SO<sub>4</sub> versus Ca (en meq/l) en muestras de agua subterránea de Salar Elvira. La línea corresponde a la relación SO<sub>4</sub>:Ca = 1:1.

Por otro lado, la disolución de yeso o anhidrita se encuentra acompañado de la liberación de iones de calcio a la solución. Respecto a esto, la Figura 7.5 muestra los contenidos de calcio comparados con los de sulfato (en miliequivalentes por litro), para todas las muestras de aguas subterráneas de los distintos pozos. En esta figura se observa que la mayoría de las muestras no siguen una relación SO<sub>4</sub>:Ca=1:1, y en especial las muestras de los pozos ELB-3, ELB-4 y AREL-1 presentan mayores contenidos de sulfato respecto del calcio, indicando un control del sulfato distinto a la disolución de yeso o anhidrita.

Otra posible fuente de sulfato lo constituye la oxidación de sulfuros, como se puede ver en la reacción 1, en donde la oxidación de pirita genera un aumento de sulfato en la solución, acompañado de hierro ferroso y acidez. Respecto a esto último, si bien en los pozos ELB-3, ELB-4 y AREL-1 la mayoría de las muestras presentan un pH neutro a alcalino y solo unas pocas

muestras presentan pH ácido (Figura 6.19), no se descarta la posibilidad de que la acidez sea rápidamente neutralizada por carbonatos (reacción 3, capítulo 7.1) u otros procesos (reacción 4, capítulo 7.1).

El análisis de elementos menores y trazas en las aguas subterráneas de la cuenca indican, en distintos pozos, altas concentraciones de As, Cu, Fe, Mo y Zn respecto de las aguas regionales y que son comparables con las reportadas en otros depósitos, por lo que son consideradas anomalías positivas de contraste respecto de estas aguas. Estos son elementos de interés al estar relacionados con sistemas de pórfidos cupríferos.

En la cuenca Salar Elvira, se registran concentraciones de Fe que oscilan entre 0,3 y 147 ppm, valores muy altos comparados al *background* regional (mediana de 0,08 ppm Fe), representando anomalías positivas. Los altos contenidos no se registran por igual en todos los pozos de la cuenca, sino más bien se concentran en los pozos AREL-1 y AREL-2, alcanzando máximos de 121 y 147 ppm, respectivamente, valores de hasta un orden de magnitud mayor a los máximos registrados en Spence e Inca de Oro (Figura 5.1, F). Una fuente de altas concentraciones de Fe en las aguas subterráneas es la oxidación de sulfuros ferrosos (Hem, 1985), que sería concordante con las altas concentraciones de sulfato en AREL-1, como se mencionó anteriormente, no así en AREL-2, en donde la razón entre  $\text{SO}_4$  y Ca es baja (Figura 7.5). Otra fuente de altas concentraciones de Fe es la disolución de  $\text{FeCO}_3$  (Hem, 1985), respecto al cual los índices de saturación indican una subsaturación en las aguas subterráneas de ambos pozos, por lo que se espera que este mineral no se encuentre presente considerando los altos tiempos de residencia del agua en el sistema (Deutsch & Siegel, 1997). Por otro lado, debido a gran cercanía de AREL-2 al punto de descarga del acuífero, se espera que las aguas subterráneas en AREL-2 sean ampliamente afectadas por procesos evaporíticos, que puedan estar afectando de manera importante la relación  $\text{SO}_4:\text{Ca}$ , y ocultando a los procesos de oxidación de sulfuros como potencial fuente de sulfato.

Las concentraciones de arsénico registradas en las aguas subterráneas de los distintos pozos de la cuenca Salar Elvira, se encuentran entre 0,02 y 0,7 ppm, y son comparables con los reportados en los depósitos de Inca de Oro y Spence (Figura 5.1, C), por lo que se consideran anomalías positivas. Según los cálculos de especiación, este elemento se encuentra disuelto principalmente como oxoanión,  $\text{HAsO}_4^{-2}$  en la mayoría de los pozos, y como  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  en AREL-2. En condiciones de pH neutro a alcalino, como en la mayoría de las aguas subterráneas de la cuenca, se espera que este elemento no sufra procesos de adsorción a superficies minerales debido a su especiación como oxoanión, presentando una buena movilidad en las aguas subterráneas. En cambio, en condiciones de pH ácido, como en AREL-2, la movilidad de este elemento será limitada principalmente por procesos de adsorción y coprecipitación con oxihidróxidos de hierro (Hem, 1985), los que se observan sobresaturados en las aguas subterráneas de AREL-2.

Respecto al molibdeno, se registran altas concentraciones en las aguas subterráneas de distintos pozos, aunque en AREL-1 se observa una mayor cantidad de muestras con molibdeno. Las concentraciones se encuentran entre 0,1 y 0,2 ppm, valores al menos un orden de magnitud mayor al *background* regional, constituyendo anomalías positivas, las que son comparables con las registradas en Spence e Inca de Oro (Figura 5.1, D). Según Soto (2012), en aguas subterráneas este elemento se encuentra disuelto principalmente como oxoanión, lo cual es concordante con el cálculo de especies iónicas, por lo que no sería afectado por procesos de adsorción en condiciones de pH alto (neutro a alcalino). Por otro lado, en AREL-2, las condiciones de pH ácido permitirían que la dispersión de este elemento sea limitada por procesos de adsorción, preferentemente en la

superficie de óxidos de Fe, Al, Mn, y arcillas (Smedley, *et al.* 2014), los cuales se encuentran saturados y sobresaturados en las aguas subterráneas de AREL-2, pudiendo atenuar los contenidos de Mo disuelto.

Los resultados de elementos menores y traza indican que pocas muestras de la cuenca registran contenidos de Zn y Cu. Respecto al zinc, las concentraciones se encuentran en general entre 0,08 y 0,2 ppm, aunque en AREL-1 y ELB-4 se registran máximos de 6,7 y 4,1 ppm, respectivamente. Por otro lado, los únicos contenidos de Cu se registran en ELB-4, ELB-5, AREL-1, AREL-2 y AR-1428, y se encuentran entre 0,1 y 0,6 ppm. Los valores registrados de Zn y Cu representan anomalías positivas respecto al *background* regional, al ser al menos un orden de magnitud mayor, y son comparables con las de Spence e Inca de Oro (Figura 5.1, B y E). En condiciones de pH neutro a alcalino, como en la mayoría de las aguas subterráneas de la cuenca, la movilidad del Zn es limitada debido a procesos de adsorción a superficies inmóviles y precipitación y coprecipitación de óxidos e hidróxidos (Soto, 2012), por ejemplo, oxihidróxidos de Fe, los que se encuentran sobresaturados en las aguas subterráneas de la cuenca. Por su parte, la movilidad del Cu también se encuentra fuertemente limitada pudiendo adsorberse a superficies minerales inmóviles, precipitar como  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  o coprecipitar con óxidos de Fe (Taufen, 1997). Respecto a esto, los índices de saturación indican una sobresaturación en varios óxidos de Fe, y además indican que varios minerales de Cu (malaquita, atacamita, brocantita, tenorita) se encuentran saturados y sobresaturados en los pozos donde se presentan anomalías positivas de Cu, pudiendo limitar la dispersión de este elemento.

De los elementos analizados, Leybourne y Cameron (2010) describen al As, Cu, Mo y Zn, como elementos diagnósticos de mineralización de tipo pórfido Cu-Mo. Según estos autores, los contenidos de As y Mo serían anómalos en las aguas subterráneas dentro del depósito y se mantendrían varios kilómetros aguas abajo de este, permitiendo vectorizar hacia el depósito, en cambio, las concentraciones de Cu serían anómalas solamente en las aguas subterráneas que ocurren en y alrededor del depósito, pero los altos contenidos decrecerían rápidamente aguas abajo. Esta diferencia es explicada debido a las distintas especiaciones de los elementos, que bajo condiciones de pH neutro a alcalino y Eh moderadamente oxidante, el As y Mo forman oxoaniones, los que son menos adsorbidos a la superficie de oxihidróxidos o arcillas, a diferencia de metales base (Cu y Zn) que forman cationes.

En las aguas subterráneas de Salar Elvira se reconocen anomalías de contraste para estos elementos y también se observa las diferencias antes mencionadas en cuanto a sus especiaciones, por lo que se pueden destacar a los pozos ELB-4, ELB-5, AREL-1, AREL-2 y AR-1428 como sectores cerca de los cuales podrían existir cuerpos mineralizados. De estos, AR-1428 se encuentra muy cercano a un botadero perteneciente a la mina Gaby (Figura 4.1), por lo que esta podría ser la fuente de anomalías positivas de los distintos elementos.

El modelamiento hidrogeoquímico, en al menos una muestra de los pozos ELB-4, ELB-5 y AREL-1, apoya la ocurrencia de mineralogía consistente con zonas oxidadas de un pórfido Cu con alteración supergena (Sillitoe, 2005). En AREL-1 las aguas se encuentran saturadas en malaquita y brocantita, y sobresaturadas en tenorita, mientras que en ELB-5, se encuentran saturadas en tenorita y atacamita, y finalmente en ELB-4 se encuentran saturadas solamente en tenorita. Por otro lado, las altas concentraciones de sulfato y Fe en las aguas de AREL-1, y en menor medida, ELB-4 y ELB-3 sugieren la ocurrencia de procesos de oxidación de sulfuros, en particular pirita.

La evidencia indica que cercano a los pozos AREL-1 y ELB-4 podrían encontrarse ocultos cuerpos mineralizados de tipo pórfido Cu-Mo, mientras que en otros sectores (ELB-5 y AREL-2) la evidencia no es suficiente para concluir al respecto. Los pozos más cercanos a AREL-1 se encuentran a más de 1,5 km, mientras que cerca de ELB-4 se reconoce solamente un pozo a menos de 1 km, por lo que la densidad de pozos no es suficiente para vectorizar hacia la mineralización de interés, a partir de la interpolación de las anomalías. En base a la información del flujo general del agua subterránea NE-SW en la cuenca, se puede estimar que los potenciales cuerpos de mena podrían encontrarse en dirección NE desde los pozos AREL-1 y ELB-4 (Figura 7.6). Sin embargo, las diferencias entre las aguas subterráneas en AREL-1 y los demás pozos de la cuenca, en cuanto a los sólidos totales disueltos y a los aniones dominantes, y además la gran dispersión de las muestras en el diagrama de Piper (Figura 6.21), sugieren que en AREL-1 existen mezclas de aguas subterráneas, que podrían provenir desde sectores distintos a la dirección general noreste-suroeste. Por este motivo, la información de AREL-1 no es suficiente para vectorizar hacia donde podría encontrarse un posible cuerpo mineralizado oculto bajo cobertura.

Por otro lado, nuevamente se debe tomar en cuenta que, debido a los altos límites de detección del método analítico utilizado, existe un sesgo en la información de las concentraciones de los distintos elementos menores y traza, limitando la representatividad de las muestras usadas para los distintos análisis. Esto implica que es necesario corroborar los resultados presentados en este estudio con más información geoquímica.

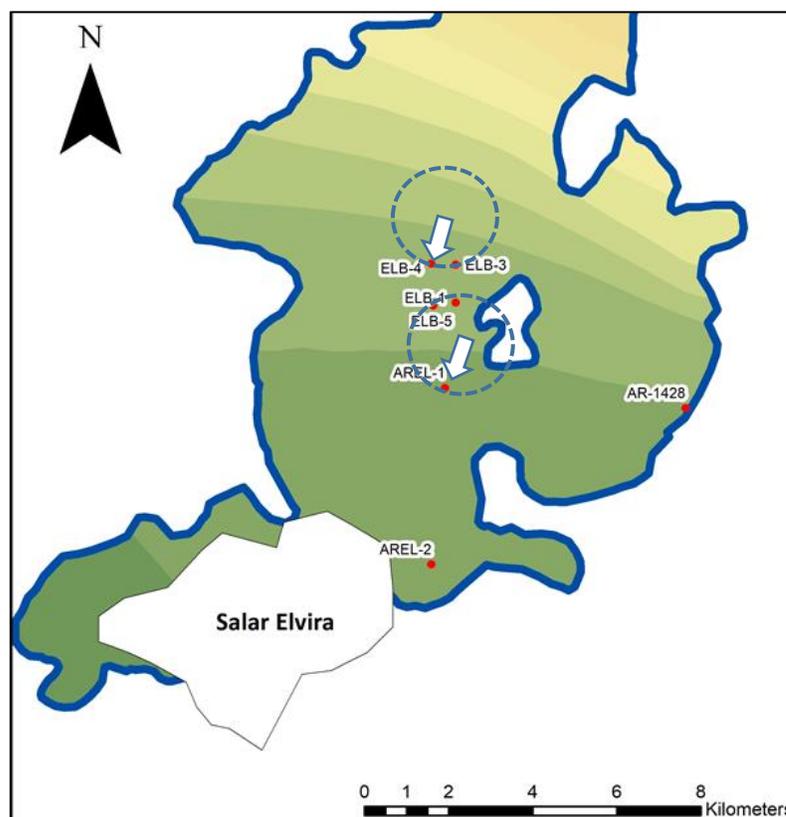


Figura 7.6 Mapa de ubicación de pozos y acuífero (marcado de color azul) del sector Salar Elvira. Las flechas blancas indican las posibles direcciones de proveniencia de las anomalías geoquímicas. Los círculos azules marcan las áreas de interés prospectivo.

## 8 CONCLUSIONES

La técnica de exploración de cuerpos mineralizados a partir del estudio geoquímico de aguas subterráneas es una herramienta útil para la detección de cuerpos mineralizados bajo cobertura post-mineral (sedimentaria y/o volcánica). En particular, esta técnica es útil en la detección de la dispersión de la mineralización asociada a pórfidos cupríferos, dado el comportamiento geoquímico de los elementos asociados a estos depósitos (As, Cu, Mo, Pb, Zn). Los elementos con mayor movilidad en aguas subterráneas permiten detectar plumas de dispersión geoquímica a varios kilómetros desde el cuerpo mineralizado y determinar vectores geoquímicos que apunten hacia la mineralización, mientras que los elementos con menor movilidad permiten determinar la ubicación de los cuerpos mineralizados de manera local. La movilidad de los distintos elementos y especies disueltas en aguas subterráneas se encuentra sujeta a las condiciones de los sistemas de aguas subterráneas, principalmente pH y redox.

Los sistemas de aguas subterráneas compuestos por un medio poroso, como lo son las cubiertas de gravas terciarias y cuaternarias que cubren gran parte la zona de estudio y otras cuencas del norte de Chile, permitirían que las condiciones de potencial de oxidación sean oxidantes, lo que se evidencia en Spence e Inca de Oro. Por otro lado, en estos depósitos las aguas subterráneas presentan generalmente pH neutros a alcalinos, al igual que en la zona de estudio, que en este trabajo se explica porque los sistemas son carbonatados, lo que implica reacciones de neutralización de pH ácidos. Se concluye que las cuencas del norte de Chile presentan en general condiciones de pH neutros a alcalino y condiciones redox suboxidantes a oxidantes, las que son ideales para el uso de los elementos As, Cu, Mo, Pb y Zn como elementos trazadores de pórfidos de cupríferos mediante hidrogeoquímica.

Los resultados del modelamiento hidrogeoquímico, según las condiciones de pH y redox de los sistemas de la zona de estudio, indican que los elementos Mo y As presentarían mayor movilidad en la mayoría de las aguas subterráneas de la zona de estudio, debido a su especiación como oxoaniones, lo que determina que sean menos afectadas por procesos de adsorción a superficies inmóviles. En cambio, la movilidad de los elementos Cu, Pb y Zn se encontraría limitada, debido a su especiación como cationes, por lo que serían ampliamente afectados por procesos de adsorción a la superficie de partículas inmóviles, como arcillas y óxidos de Fe, Al y Mn.

En las cuencas de Llano Mariposas, Salar Elvira y Salar de los Morros, las condiciones de bajas precipitaciones y alta evaporación implican una recarga muy baja para los acuíferos, lo que determinaría que las aguas subterráneas presenten un movimiento muy lento y sean aguas muy antiguas. Por este motivo se espera que las aguas subterráneas se encuentren en equilibrio termodinámico con el medio hospedante.

Los altos porcentajes de concentraciones reportadas bajo los límites de detección no permiten caracterizar las aguas subterráneas según elementos menores y trazas. Por este motivo las muestras de aguas subterráneas usadas para los modelamientos hidrogeoquímicos no son necesariamente representativas de los distintos puntos muestreados. Por otro lado, algunos parámetros usados para estos modelamientos, como las condiciones redox y la temperatura, corresponden a estimaciones. Por estos motivos se concluye que los minerales que se indican saturados y sobresaturados en las muestras de aguas subterráneas, no necesariamente se presentan

en la realidad. Se sugiere que los resultados del cálculo de los índices de saturación y especiación de elementos sean verificados con datos empíricos de las condiciones redox de los sistemas.

Los datos de los análisis geoquímicos no son suficientes para la determinación de anomalías geoquímicas mediante análisis estadístico, esto debido a los altos porcentajes de datos reportados bajo los límites de detección, en particular, de los elementos menores y trazas. Estos límites de detección son inherentes de los métodos analíticos utilizados para medir las concentraciones de los distintos elementos presentes en las muestras de agua subterránea. En el caso de la medición de los elementos menores y trazas, la técnica usada corresponde a espectrofotometría de absorción atómica con llama. Se sugiere el uso de otros métodos analíticos que permitan medir concentraciones más bajas, del orden de ppb, por ejemplo, ICP-MS.

El análisis de datos geoquímicos de los distintos muestreos de aguas subterráneas, permiten reconocer en los pozos ARMA-3 y ELE-3, pertenecientes a la cuenca de Llano Mariposas, AREL-1 y ELB-4, de la cuenca Salar Elvira, y LMB-2, de la cuenca Salar de los Morros, altas concentraciones de los elementos As, Cu, Mo, Zn, y en algunos casos Pb, en comparación con las aguas superficiales regionales y las aguas subterráneas de Spence e Inca de Oro. Estas altas concentraciones son consideradas anomalías positivas (solo de manera comparativa), y se encontrarían posiblemente relacionadas con la ocurrencia de cuerpos mineralizados de tipo pórfido cuprífero aguas arriba de estos pozos (Figura 7.2, Figura 7.4, Figura 7.6). Por otro lado, las aguas subterráneas en estos pozos presentan altas concentraciones de Fe y sulfato, lo que sugiere la ocurrencia de procesos de oxidación de sulfuros.

En base a los datos hidrogeoquímicos, es posible detectar plumas de dispersión de anomalías de los elementos de interés, sin embargo, la densidad de pozos en las zonas de estudio no es suficiente para interpolar los datos y vectorizar hacia los cuerpos mineralizados de interés. Por otro lado, a partir de la información de las direcciones de flujo, si es posible estimar la dirección en la que se encontrarían los cuerpos mineralizados.

Finalmente se concluye que la técnica de hidrogeoquímica de aguas subterráneas no demuestra la ocurrencia de cuerpos mineralizados de tipo pórfido cuprífero por si sola, sin embargo, demuestra ser una herramienta útil a escala regional en la exploración minera de primer orden para la detección de áreas de interés, para luego usar otras técnicas exploratorias a escalas menores, por ejemplo, geofísica, sondajes de reconocimiento, mapeo litológico, entre otros.

## BIBLIOGRAFÍA

Arriagada, C., Roperch, P., & Mpodozis, C. (2000). Clockwise block rotations along the eastern border of the Cordillera de Domeyko, northern Chile (22 45'–23 30' S). *Tectonophysics*, 326(1), 153-171.

Boric, R., Díaz, F., & Maksaev, V. (1990). Geología y yacimientos metalíferos de la Región de Antofagasta (No. 40). Servicio Nacional de Geología y Minería.

Beck, M. E., Rojas, C., & Cembrano, J. (1993). On the nature of buttressing in margin-parallel strike-slip fault systems. *Geology*, 21(8), 755-758.

Cameron, E. M., Hamilton, S. M., Leybourne, M. I., Hall, G. E., & McClenaghan, M. B. (2004). Finding deeply buried deposits using geochemistry. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 4(1), 7-32.

Cameron, E. M., Leybourne, M. I., & Palacios, C. (2007). Atacamite in the oxide zone of copper deposits in northern Chile: involvement of deep formation waters?. *Mineralium Deposita*, 42(3), 205-218.

Deutsch, W. J., & Siegel, R. (1997). *Groundwater geochemistry: fundamentals and applications to contamination*. CRC press.

Drever, J. I. (1997). *The Geochemistry of Natural Waters: Surface and Groundwater Environments*. Prentice Hall, Eaglewood Cliffs.

Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*, 1979. Printice-Hall, Englewood Cliffs.

Gilliom, R. J., & Helsel, D. R. (1986). Estimation of distributional parameters for censored trace level water quality data: 1. Estimation techniques. *Water Resources Research*, 22(2), 135-146.

Giblin, A. (1994). Natural waters as sample media in drainage geochemistry. *Handbook of Exploration Geochemistry*, 6, 269-303.

Hem, J. D. (1985). Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water (Vol. 2254). Department of the Interior, US Geological Survey.

Helsel, D. R., & Cohn, T. A. (1988). Estimation of descriptive statistics for multiply censored water quality data. *Water Resources Research*, 24(12), 1997-2004.

Helsel, D. R. (1990). Less than obvious-statistical treatment of data below the detection limit. *Environmental Science & Technology*, 24(12), 1766-1774.

Hugo Henríquez (1996). Hidrogeología y Paleogeomorfología del proyecto Gaby Sur. Informe técnico para Codelco.

Hugo Henríquez (1997). Hidrogeoquímica del proyecto Gaby Sur. Informe técnico para Codelco.

- Helsel, D. R., & Hirsch, R. M. (2002). *Statistical methods in water resources* (Vol. 323). Reston, VA: US Geological survey.
- Halley, S., Dilles, J. H., & Tosdal, R. M. (2015). Footprints: hydrothermal alteration and geochemical dispersion around porphyry copper deposits. *Society of Economic Geologists Newsletter*, 100, 12-17.
- Leybourne, M. I., & Cameron, E. M. (2006). Composition of groundwaters associated with porphyry-Cu deposits, Atacama Desert, Chile: elemental and isotopic constraints on water sources and water-rock reactions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(7), 1616-1635.
- Leybourne, M. I., & Cameron, E. M. (2008). Source, transport, and fate of rhenium, selenium, molybdenum, arsenic, and copper in groundwater associated with porphyry-Cu deposits, Atacama Desert, Chile. *Chemical Geology*, 247(1), 208-228.
- Leybourne, M. I., & Cameron, E. M. (2010). Groundwater in geochemical exploration. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 10(2), 99-118.
- Maksaev, V. (1990). Metallogeny, geological evolution, and thermochronology of the Chilean Andes between 21 and 26 South, and the origin of major porphyry copper deposits.
- Mpodozis, C., Marinovic, N., & Smoje, I. (1993a). Eocene left lateral strike slip faulting and clockwise block rotations in the Cordillera de Domeyko, west of Salar de Atacama, northern Chile.
- Mpodozis, C., Marinovic, N., Smoje, I., & Cuitiño, L. (1993b). Estudio Geológico-Estructural de la Cordillera de Domeyko entre Sierra Limón Verde y Sierra Mariposas, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Merkel, B. J., Planer-Friedrich, B., & Nordstrom, D. (2005). Groundwater geochemistry. *A Practical Guide to Modeling of Natural and Contaminated Aquatic Systems*, 2.
- NCH 411/11:1998 Calidad del agua – Muestreo- Parte 11: Guía para el muestreo de agua subterráneas. Instituto Nacional de Normalización.
- Ramirez, C. F. & Gardeweg, M. (1982). Hoja Toconao, Región de Antofagasta: Santiago, Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile N°58 (1:250.000), p. 1-121, Santiago.
- Romero, L., Alonso, H., Campano, P., Fanfani, L., Cidu, R., Dadea, C., & Farago, M. (2003). Arsenic enrichment in waters and sediments of the Rio Loa (Second Region, Chile). *Applied Geochemistry*, 18(9), 1399-1416.
- Sillitoe, R. H., & Perelló, J. (2005). Andean copper province: Tectonomagmatic settings, deposit types, metallogeny, exploration, and discovery. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 845-890.
- Soto Cabrera, M. (2010). Hidrogeología e Hidrogeoquímica de Aguas Subterráneas en el Distrito Inca de Oro, Región de Atacama: Procesos de Interacción Agua-Roca y Dispersión Geoquímica.

Smedley, P. L., Cooper, D. M., Ander, E. L., Milne, C. J., & Lapworth, D. J. (2014). Occurrence of molybdenum in British surface water and groundwater: Distributions, controls and implications for water supply. *Applied Geochemistry*, 40, 144-154.

Taufen, P. M. (1997). Ground waters and surface waters in exploration geochemical surveys. In *Proceedings of Exploration* (Vol. 97, pp. 271-284).

Water Management Consultants Ltda. (1997). Phase I Water resource evaluation for the Gaby Project. Informe técnico para Codelco.

## ANEXO A Ubicación puntos de muestreo

**Tabla A.1** Coordenadas de pozos de muestreo del área de estudio

<b>POZO DE MUESTREO</b>	<b>NORTE (PSAD56)</b>	<b>ESTE (PSAD56)</b>
AR-1428	7404048,7	518255,6
AREL-1	7404530,5	512526,0
AREL-2	7400314,9	512201,3
AREL-3	7415533,0	515145,0
ARMA-10	7416494,0	517188,0
ARMA-3	7420736,0	519713,0
ARMA-6	7419121,8	518337,9
ELB-1	7406569,3	512777,9
ELB-3	7407474,4	512781,2
ELB-4	7407497,5	512200,8
ELB-5	7406498,6	512249,8
ELE-3	7414488,1	514065,3
LMB-1	7386999,5	511501,1
LMB-2	7385500,2	511500,5
LMB-4	7386025,7	514280,3
LMB-5	7379763,7	509280,0
MAB-2	7420741,9	519730,9
MAB-5	7423049,0	521471,2
MAB-6	7420752,2	519730,9
MAB-7	7422093,1	520515,9
MAB-8	7422342,7	519414,4
MAE-4	7424300,0	525448,0
MAE-5	7425613,6	520468,1
PMB99-1	7385894,6	509102,0
RHE99-2	7382152,8	510009,0

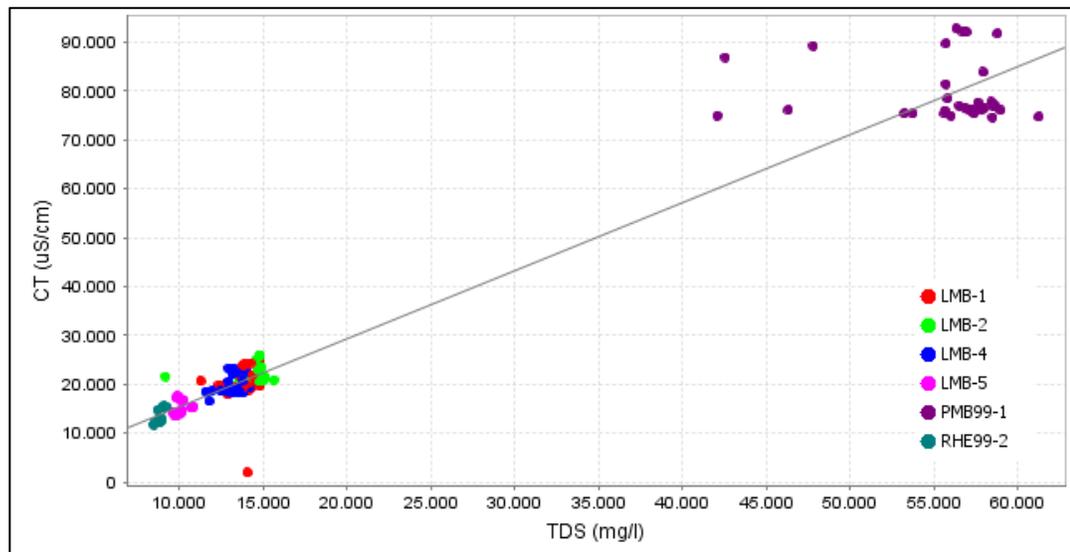
**Tabla A.2** Coordenadas puntos de muestreo del río Loa, pertenecientes a DGA

<b>NOMBRE DE POZO</b>	<b>NORTE (UTM)</b>	<b>ESTE (UTM)</b>
<b>RIO LOA ANTES JUNTA RIO SALADO</b>	7527190	536036
<b>RIO TOCONCE ANTES REPRESA SENDOS</b>	7536667	588204
<b>POZO CHIU-CHIU</b>	7529912	541478
<b>RIO LOA EN REPRESA LEQUENA</b>	7604060	535264
<b>RIO SAN PEDRO EN PARSHALL N°1</b>	7570727	565449

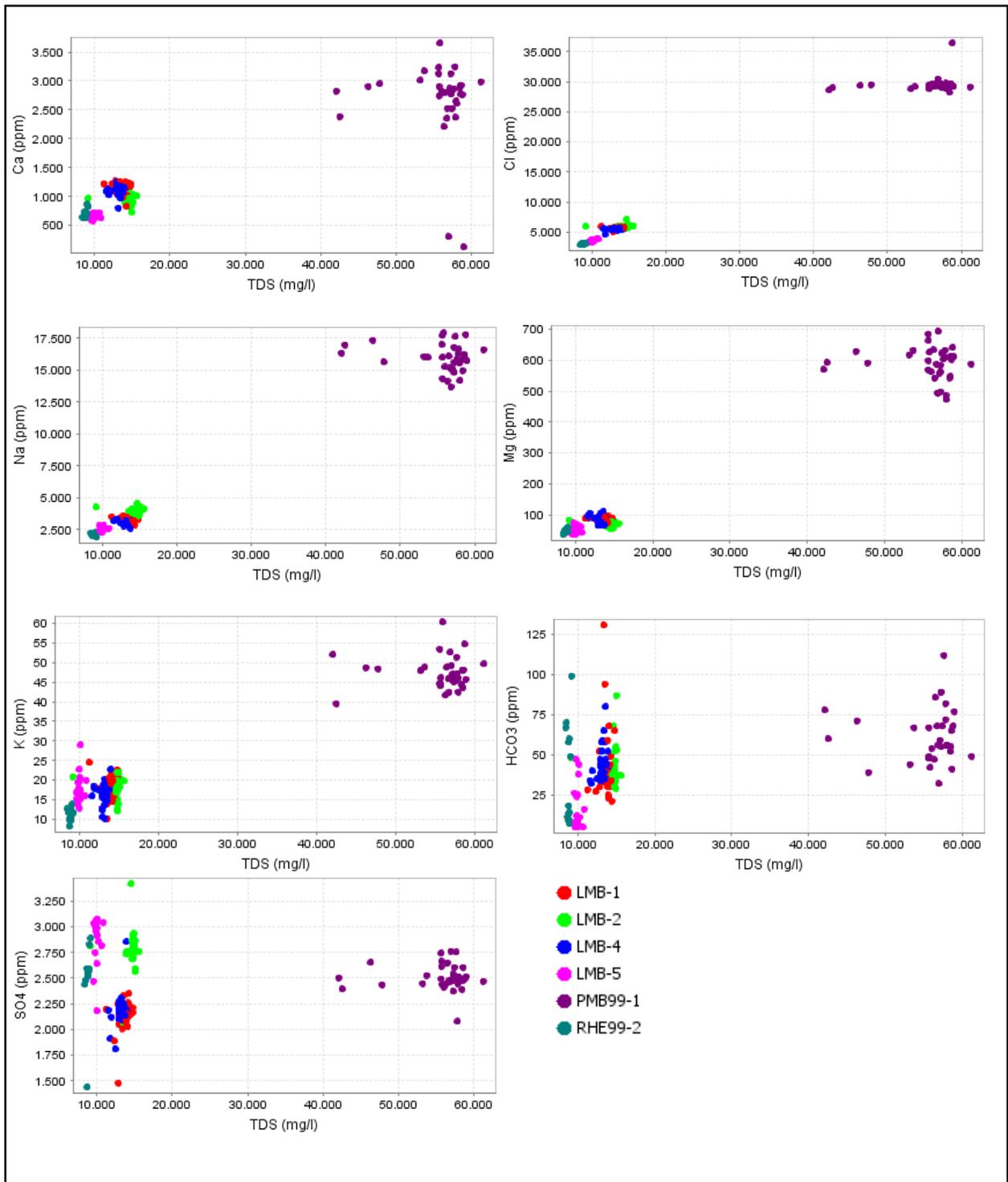
## ANEXO B Análisis geoquímico

### Anexo B.1. Salar de los Morros

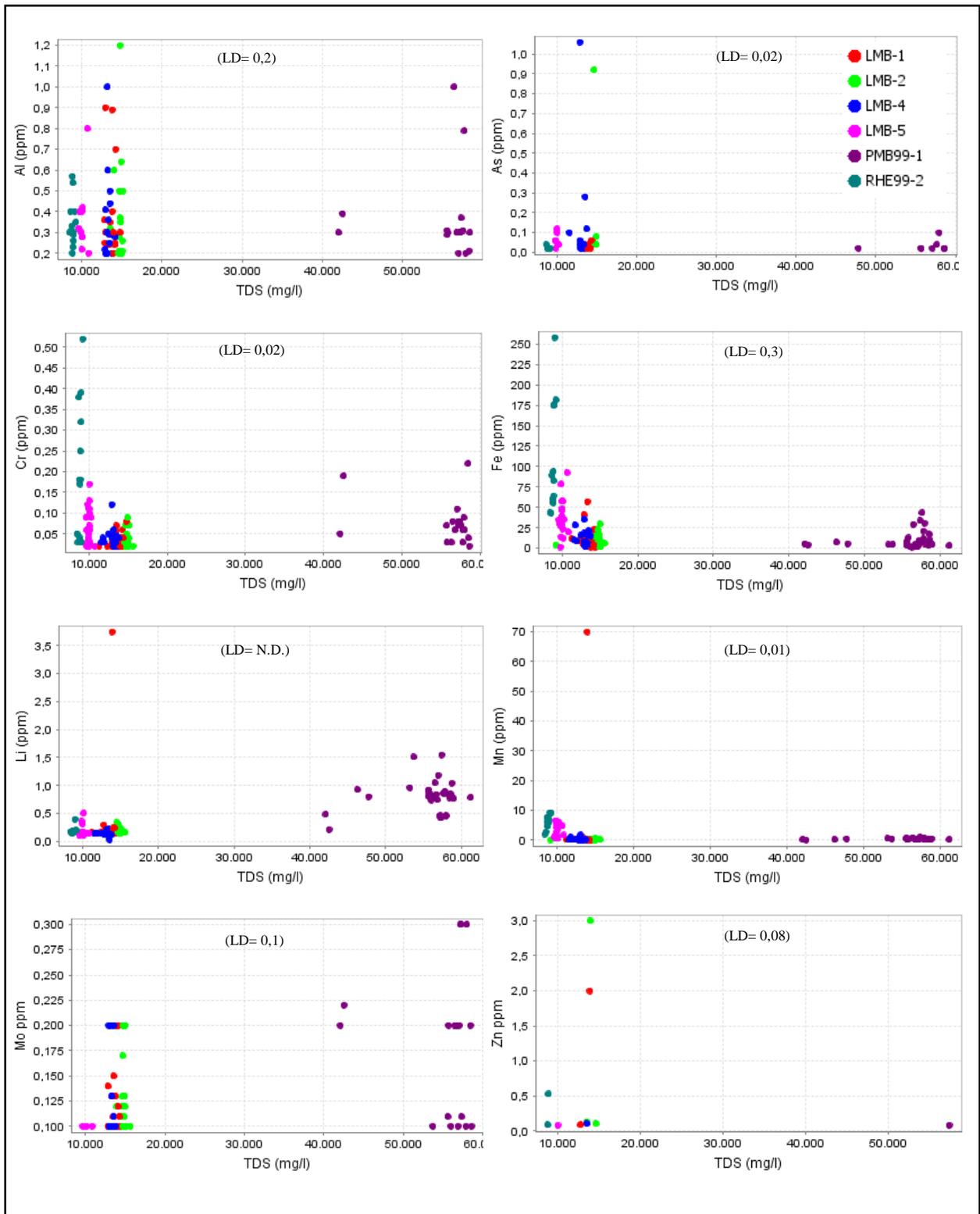
**Figura B.1.1** Conductividad eléctrica versus TDS, para las muestras de aguas subterráneas del Salar de los Morros.



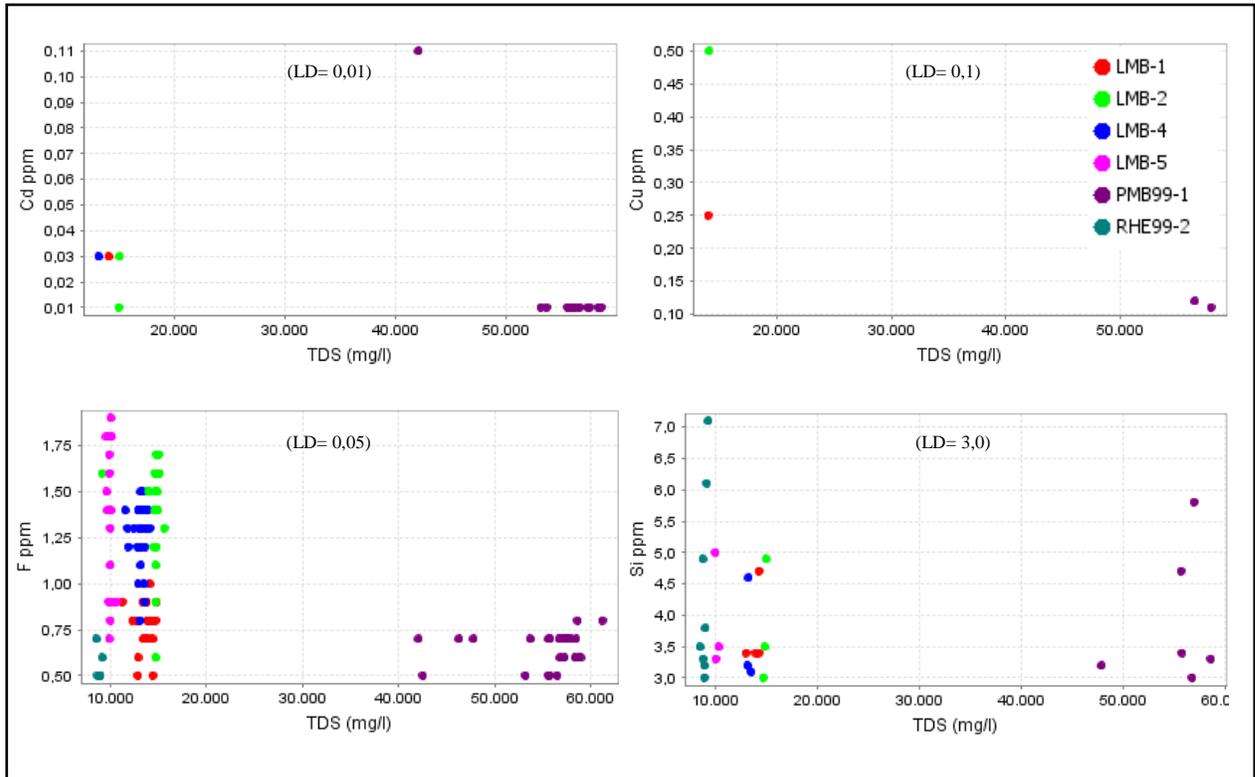
**Figura B.1.2** Concentraciones de elementos mayores relativos al TDS, de las aguas subterráneas del sector Salar de los Morros. En colores los distintos pozos muestreados.



**Figura B.1.3** Concentraciones de elementos menores y traza relativos al TDS, de las aguas subterráneas del sector Salar de los Morros. En colores los distintos pozos muestreados.

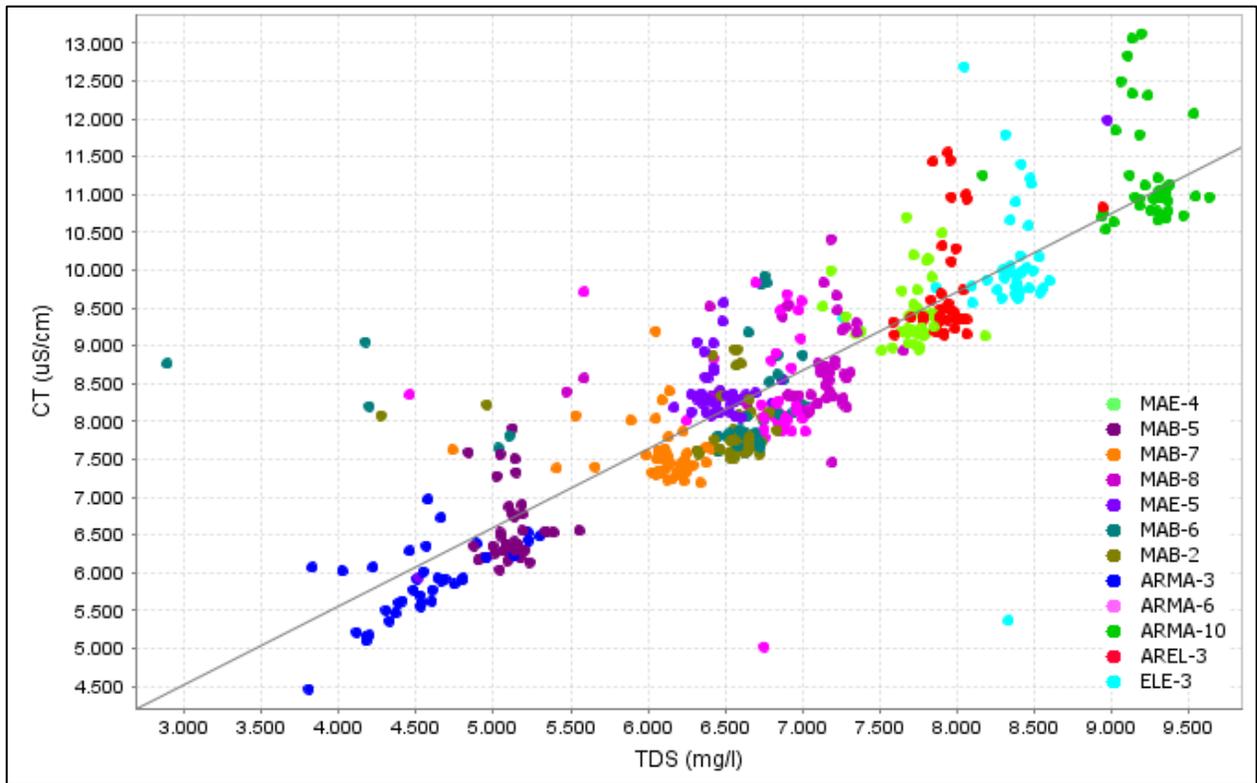


...Continuación Figura B.1.3

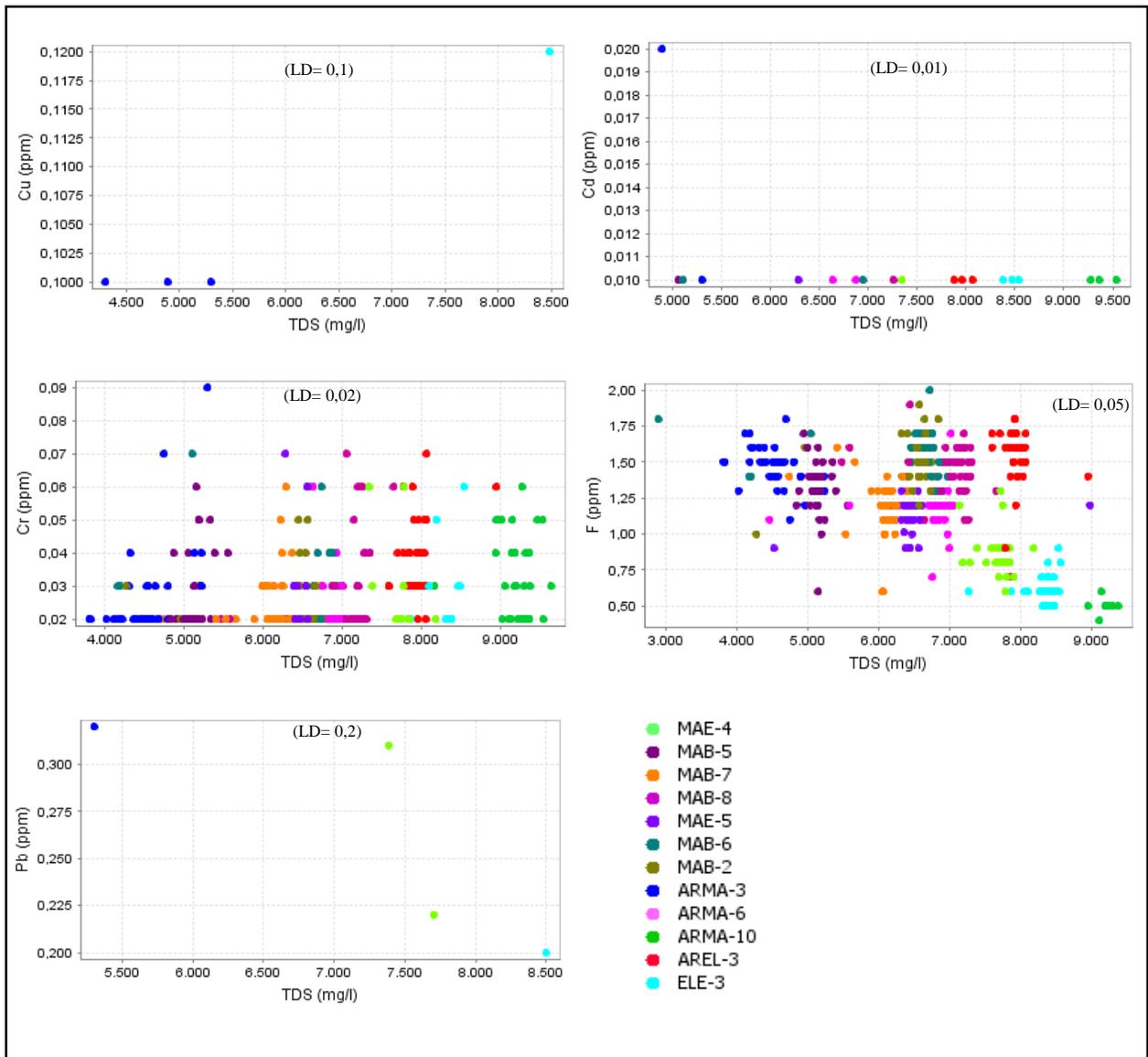


## Anexo B.2. Llano Mariposas

**Figura B.2.1** Conductividad eléctrica versus TDS, para las muestras de aguas subterráneas de Llano Mariposas.

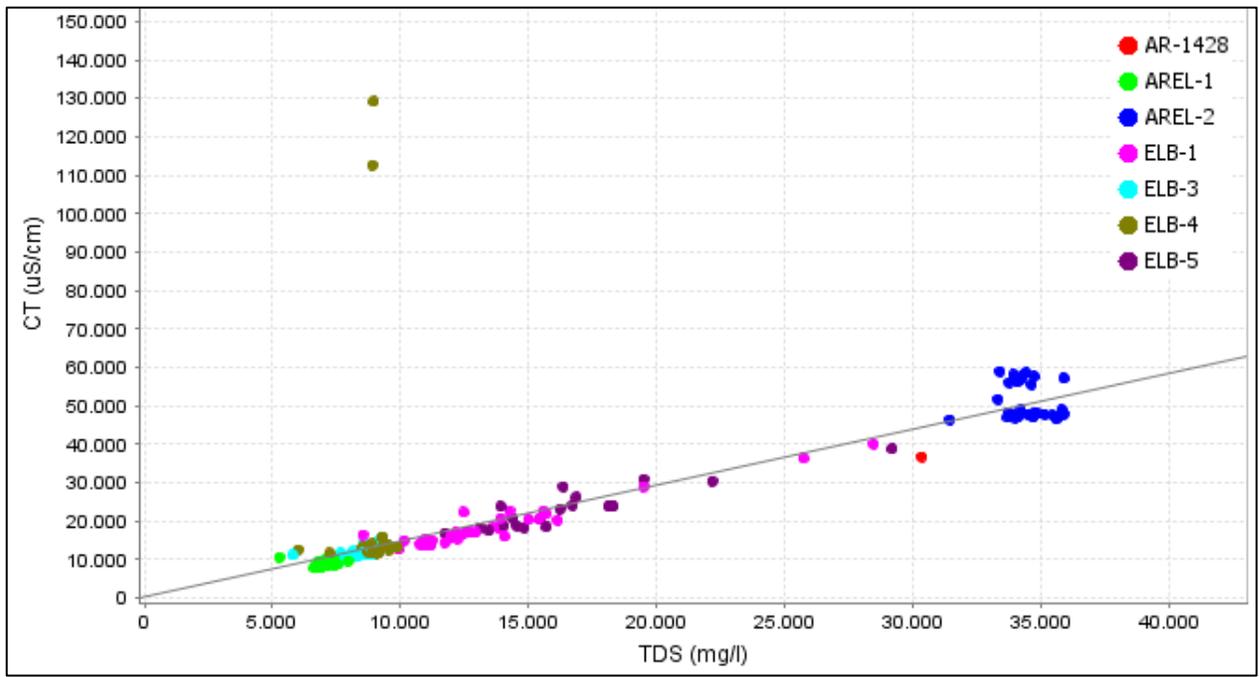


**Figura B.2.2** Concentraciones de elementos menores y traza relativos al TDS, de las aguas subterráneas del sector Llano Mariposas. En colores los distintos pozos muestreados.

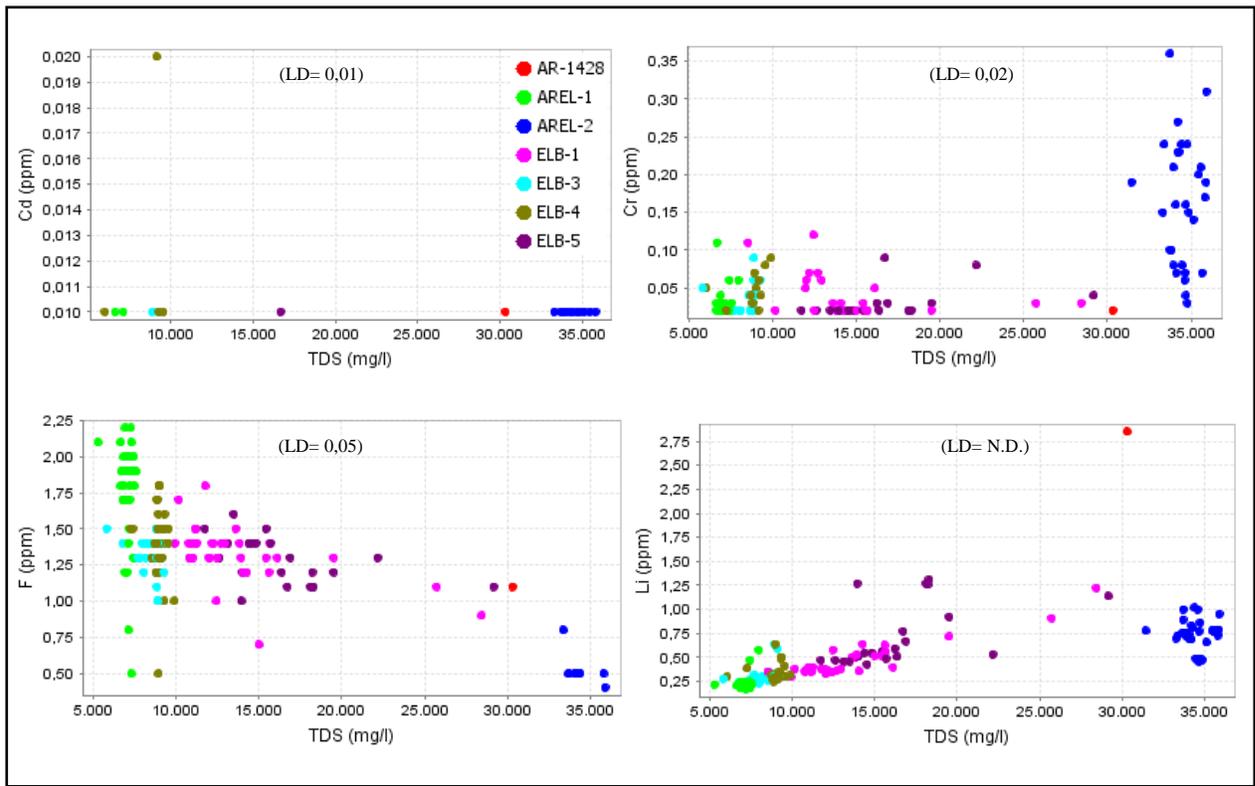


### Anexo B.3. Salar Elvira

**Figura B.3.1** Conductividad eléctrica versus TDS, para las muestras de aguas subterráneas de Salar Elvira.



**Figura B.3.2 Concentraciones de elementos menores y traza relativos al TDS, de las aguas subterráneas del sector Salar Elvira. En colores los distintos pozos muestreados.**



## **ANEXO C Resultados de análisis químicos**

La base de datos con los resultados del análisis de parámetros físico-químicos y de elementos realizado a las muestras de aguas subterráneas del área de estudio se encuentran en archivo digital adjunto.

## **ANEXO D Resultados del modelamiento hidrogeoquímico**

Los resultados del cálculo de especies iónicas disueltas e índices de saturación mineral se encuentran en archivo digital adjunto.