



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

DRENAJE ÁCIDO NATURAL: EL CASO DE CAMPOS DE AHUMADA, CHILE  
CENTRAL

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

VANESSA ALEJANDRA TRESKOW GUZMÁN

PROFESOR GUÍA:

LINDA DANIELE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

DIEGO MORATA CÉSPEDES

BENOÎT VIGUIER

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto FONDECYT N°1170569 y FONDAP  
N°15090013.

SANTIAGO DE CHILE

2019



**Resumen de la memoria para optar al título de: Geóloga**

**Por: Vanessa Alejandra Treskow Guzmán**

**Fecha: Julio 2019**

**Profesor guía: Linda Daniele**

**Drenaje ácido natural: el caso de Campos de Ahumada, Chile central.**

El drenaje ácido, sea natural o asociado a actividades mineras, se debe a la oxidación de sulfuros. Un proceso que genera pH ácidos y, elevadas concentraciones de metales en las aguas, creando un grave problema medioambiental. La presencia de sulfuros en Chile es común y, los procesos de interacción de las aguas con éstos puede ser el origen de fenómenos de drenaje ácido natural.

En el sector de Campos de Ahumada, a unos 20 km al noreste de la ciudad de Los Andes, en el marco del proyecto FONDECYT 1170569, se ha estudiado una zona con alteración hidrotermal y, aguas con pH ácidos y una química distinta a la de los sectores aledaños.

Para estudiar los procesos que afectan a las aguas de la zona, se recolectaron 12 muestras de agua y 26 muestras de roca. Las muestras de aguas fueron analizadas para aniones, cationes, elementos trazas e isótopos estables, además de medir sus parámetros fisicoquímicos *in situ*. 21 muestras de roca fueron analizadas mediante difracción de rayos X y 5 mediante disolución de muestras sólidas.

En el área de estudio, las aguas son sulfatadas cálcicas, con pH entre 3,98 y 7,3, donde 10 de las 12 muestras tienen pH ácido inferior a 7. Además, presentan grandes cantidades de hierro y manganeso, con valores de hasta 7003 ppb y 1098 ppb respectivamente. Estas aguas son utilizadas por la población local, por lo cual se calculó el riesgo potencial asociado a su consumo, calculando el coeficiente de salud (THQ) definido por la Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU.

Las rocas alteradas constan principalmente de cuarzo, moscovita, caolinita e illita, con óxidos de hierro y manganeso. Estos datos, junto con los de las aguas, se han usado para realizar simulaciones geoquímicas (Phreeqc) para reproducir la composición química medida. Los resultados indican disolución de silicatos y oxidación de pirita. La oxidación de pirita es lo que causa el pH ácido y las elevadas concentraciones de hierro y sulfato, lo que genera ácido sulfúrico, acelerando la disolución de plagioclasas.

Los resultados, resumidos en un modelo esquemático, indican que las precipitaciones (lluvia y/o nieve) se infiltran por fracturas, interactúan con las rocas frescas y alteradas por diferentes recorridos y, afloran asociadas a fracturas y a material no consolidado.

Si bien no es recomendable el consumo constante de estas aguas, se destaca que este drenaje ácido es de carácter local.

## Agradecimientos

Este trabajo se realizó gracias al proyecto FONDECYT N° 1170569, al proyecto FONDAP 15090013 y, al Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA). Agradezco enormemente a la profe Linda Daniele, mi profesora guía, por darme la oportunidad de llevar a cabo este estudio, por todo lo que aprendí, y por confiar en mí.

Le agradezco al Mati, su siempre buena disposición a ayudarme, a enseñarme y por los terrenos que compartimos. A mis amigas del colegio, Paula, Puli y Suelo con quienes he compartido desde hace mucho tiempo, hasta el día de hoy, y por un montón de años más, les agradezco el cariño, el apoyo, la confianza, y todos los buenos y malos momentos en los que hemos estado juntas. A los amigos que hice en los primeros años de U, Callpa y Javier, tanto tiempo pasando juntos los ramos de plan común, les agradezco las infinitas risas y el cariño. A los mantitos que conocí en geología, Nones, Romi, Mati, Ange, Martin, Libe, Ignana y Tomi, les doy las gracias por todos los buenos momentos fuera y dentro de la U y, los terrenos bacanes junto a ustedes, que se extrañarán. Y a otros amiguitos de geo, que conocí en diferentes instancias, al Moris, al Mario, y al Carlos, por toda la buena onda, las risas y las series.

Finalmente agradezco a mis papás, simplemente por todo, por todo el esfuerzo que siempre hacen por mí, por apoyarme en cada decisión que he tomado, por siempre animarme a ir por más y por convencerme desde que era pequeña que puedo lograr todo lo que me proponga.

## Tabla de Contenido

1. Introducción .....	1
1.1. Formulación del problema .....	1
1.2. Objetivos .....	4
1.2.1. Objetivo general.....	4
1.2.2. Objetivos específicos.....	4
1.3. Hipótesis de trabajo.....	4
1.4. Ubicación y vías de acceso .....	4
2. Metodología .....	6
2.1. Revisión de antecedentes .....	6
2.2. Preparación de material para muestreo de aguas .....	6
2.3. Terreno.....	6
2.4. Muestreo de aguas.....	6
2.5. Análisis mineralógico de rocas.....	8
2.6. Análisis químico de rocas.....	9
2.7. Análisis del riesgo potencial por consumo de agua .....	9
2.8. Interpretación hidrogeoquímica.....	10
2.9. Simulaciones geoquímicas.....	10
3. Antecedentes del área de estudio .....	11
3.1. Marco geológico regional .....	11
3.2. Rocas Estratificadas.....	12
3.2.1. Formación Abanico (Aguirre, 1960) .....	12
3.2.2. Formación Farellones (Klohn, 1960).....	14
3.3. Rocas Intrusivas.....	14
3.3.1. Intrusivo Tambillos.....	14
3.3.2. Intrusivo Portezuelo Azufre.....	14
3.4. Depósitos Cuaternarios.....	15
3.5. Estructuras .....	15
3.6. Metamorfismo, alteración y mineralización .....	16
3.7. Hidrología e hidrogeología .....	18
4. Resultados.....	21

4.1. Muestras de agua .....	21
4.1.1. Parámetros fisicoquímicos.....	25
4.1.2. Elementos mayores, menores y traza .....	29
4.1.2.1. Relaciones iónicas .....	34
4.1.3. Isótopos estables.....	42
4.1.4. Riesgo potencial para la salud.....	42
4.2. Mineralogía .....	44
4.2.1. Sky el Arpa .....	44
4.2.2. Manchón Amarillo .....	46
4.3. Simulaciones geoquímicas.....	48
4.4. Simulación de la oxidación de pirita .....	54
5. Discusiones .....	56
5.1. Procesos de interacción agua – roca .....	56
5.2. Origen de las aguas .....	59
5.3. Drenaje ácido natural .....	60
5.4. THQ.....	63
5.5. Modelización de los procesos geoquímicos.....	64
5.6. Modelos esquemáticos de circulación hídrica local.....	65
6. Conclusiones .....	69
7. Bibliografía.....	71
Anexo A.....	76
Anexo B.....	81
Anexo C .....	89
Anexo D .....	103
Anexo E.....	106

## Índice de Tablas

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos de las aguas de la zona de estudio y sus valores máximos, mínimos, mediana y promedio. *Excluyendo las aguas de lluvia. En 'Zona', SA1 corresponde a la zona de Sky el Arpa norte, SA2 al Sky el Arpa sur, SA3 al Sky el Arpa oeste, MA a Manchón Amarillo y SE a San Esteban.....	26
Tabla 2 Cantidades de los elementos mayores en ppm y sus valores máximos, mínimos, mediana y promedio. *No se consideran las muestras de lluvia para estos cálculos.....	29
Tabla 3 Balance iónico y conductividad eléctrica. ....	30
Tabla 4 Error aceptable en balance iónico según la conductividad eléctrica (Custodio & Llamas, 1976).....	30
Tabla 5 Cantidades de elementos menores y traza en ppb, sus valores máximos, mínimos, mediana y promedio, parte 1. *No se consideran las muestras de lluvia para estos cálculos.....	32
Tabla 6 Cantidades de elementos menores y traza en ppb, sus valores máximos, mínimos, mediana y promedio, parte 2. *No se consideran las muestras de lluvia para estos cálculos.....	32
Tabla 7 Cantidades de elementos menores y traza en ppb, sus valores máximos, mínimos, mediana y promedio, parte 3. *No se consideran las muestras de lluvia para estos cálculos.....	33
Tabla 8 Isótopos estables de carbono, oxígeno e hidrógeno. ....	42
Tabla 9 Dosis oral referencial (RfD). Valores extraídos de la base de datos de TOXNET y sus referencias. ....	43
Tabla 10 THQ para los elementos hierro, manganeso, cobre, zinc, níquel, cadmio, arsénico, selenio y cobalto en la población de género masculino. ....	43
Tabla 11 THQ para los elementos hierro, manganeso, cobre, zinc, níquel, cadmio, arsénico, selenio y cobalto en la población de género femenino. ....	44
Tabla 12 Elementos del Modelo Inverso 1. ....	49
Tabla 13 Resultados modelo inverso 1. Abreviaciones minerales: An = anortita, Ab = albita, Di = diópsido, Py = pirita, Mag = magnetita, = Gt = goethita, Hem = hematita, Kln = caolinita, Qtz = cuarzo, Ms = muscovita y Prl = pirolusita. En naranja dis = disolución y en celeste pre = precipitación.....	50
Tabla 14 Cantidades absolutas de moles transferidos en el modelo inverso 1. En naranja las que se disuelven y en celeste las que precipitan.....	51
Tabla 15 Elementos del Modelo Inverso 2. ....	52
Tabla 16 Resultados modelo inverso 2. Abreviaciones minerales: An = anortita, Ab = albita, Di = diópsido, Py = pirita, Mag = magnetita, = Gt = goethita, Hem = hematita, Kln = caolinita, Qtz = cuarzo, Ms = muscovita y Prl = pirolusita. En naranja dis = disolución y en celeste pre = precipitación.....	53
Tabla 17 Cantidades absolutas de moles transferidos en el modelo inverso 2. En naranja las que se disuelven y en celeste las que precipitan.....	54

Tabla 18 Ejemplos de oxidación de sulfuros modificada de Plumlee (1999). Las reacciones son idealizadas, probablemente no representan los productos apropiados para todas las condiciones químicas ambientales que pueden darse.....	62
Tabla 19 Resumen de los resultados de los modelos inversos.....	64

## Índice de Figuras

Figura 1.1 Mapa con las ubicaciones de la ciudad de Los Andes, San Esteban y Campos de Ahumada.....	3
Figura 1.2 Mapa de vías de acceso a la zona de estudio en el recuadro verde. Fuente de mapa: Ministerio de Obras Públicas, <a href="http://www.mop.cl/">http://www.mop.cl/</a> .....	5
Figura 2.1 Esquema de los recolectores. En negro la botella, en verde el embudo, en rojo la malla y en azul el tubo. A la izquierda solo con vaselina en color rosado y a la derecha luego del ingreso de agua en celeste.....	7
Figura 2.2 Recolector de agua de lluvia.....	7
Figura 2.3 Toma de muestras de agua para cationes, aniones, elementos trazas e isótopos estables.....	8
Figura 3.1 Mapa geológico zona al norte de Los Andes y en rectángulo rojo la zona de estudio. Modificado de Bustamante et al. (2012b).....	13
Figura 3.2: Mapa geológico zona al norte de Los Andes y en rectángulo rojo la zona de estudio. Modificado de Bustamante et al. (2012b).....	17
Figura 3.3: Microfotografía de una muestra en Campos de Ahumada (Bustamante et al., 2012b).....	18
Figura 3.4: Cuenca del Aconcagua y sus subcuencas. Fuente: Dirección General de Agua, <a href="https://www.dga.cl/">https://www.dga.cl/</a> .....	19
Figura 4.1 Mapa de los puntos de toma de muestras de agua, en el recuadro amarillo se encuentra la zona de estudio.....	21
Figura 4.2 Mapa zona de estudio y los puntos donde fueron tomadas las muestras de agua.....	22
Figura 4.3 Puntos donde se tomaron muestras de agua en Sky El Arpa. La imagen A corresponde a la muestra 1, la B a la muestra 2, la C y D a la muestra 3, la E a la muestra 4 y la F a la muestra 5.....	24
Figura 4.4 Punto de muestra de agua 9 en Manchón Amarillo.....	25
Figura 4.5 Gráficos de parámetros fisicoquímicos versus altura.....	28
Figura 4.6 Diagrama de Piper. Los círculos son muestras de aguas superficiales, los cuadrados los de manantiales y los triángulos son aguas de lluvia, los colores hacen referencia al sector de donde fueron tomadas.....	31
Figura 4.7 Gráficos de; (a) altura vs $\text{SO}_4^{2-}$ , (b) altura vs $\text{Ca}^{2+}$ , (c) altura vs $\text{Mg}^{2+}$ y (d) altura vs $\text{Na}^+$ .....	35
Figura 4.8 Gráficos de; (a) pH vs $\text{SO}_4^{2-}$ , (b) pH vs $\text{F}^-$ , (c) pH vs $\text{Ca}^{2+}$ , (d) pH vs $\text{Mg}^{2+}$ , (e) pH vs $\text{SiO}_2$ y (f) pH vs $\text{HCO}_2^-$ .....	36
Figura 4.9 Gráficos de; (a) Eh vs $\text{SO}_4^{2-}$ , (b) Eh vs $\text{Ca}^{2+}$ , (c) Eh vs $\text{SiO}_2$ y (d) Eh vs $\text{HCO}_3^-$ .....	37
Figura 4.10 Gráfico de temperatura vs $\text{Cl}^-$ . No se muestran los datos de las aguas de lluvia puesto que la temperatura medida no es la real, sino la temperatura en el momento en que se retiró la muestra del recolector.....	38
Figura 4.11 Gráficos de; (a) $\text{Cl}^-$ vs $\text{Ca}^{2+}$ y (b) $\text{Cl}^-$ vs $\text{SiO}_2$ .....	38

Figura 4.12 Gráficos de; (a) $\text{SO}_4^{2-}$ vs $\text{Na}^+$ , (b) $\text{SO}_4^{2-}$ vs $\text{Ca}^{2+}$ , (c) $\text{SO}_4^{2-}$ vs $\text{Mg}^{2+}$ y (d) $\text{SO}_4^{2-}$ vs $\text{SiO}_2$ .	39
Figura 4.13 Gráficos de; (a) altura vs Li y (b) altura vs Mn.	40
Figura 4.14 Gráficos de; (a) pH vs Mn, (b) pH vs Al, (c) pH vs Fe y (d) pH vs Li.	40
Figura 4.15 Gráfico $\text{Cl}^-$ vs Rb.	41
Figura 4.16 Gráficos de; (a) $\text{SO}_4^{2-}$ vs Al y (b) $\text{SO}_4^{2-}$ vs Mn.	41
Figura 4.17. Microgabro con magnetita y pirita diseminada y en vetillas, con un tamaño menor o igual a 0,5 mm de ancho.	45
Figura 4.18 Rocas en zona de Sky el Arpa. (a) y (b) en la zona norte, material rojizo masivo semi disgregado. (c) y (d) en la zona sur, en la primera: bandeamiento en tonos blancos y anaranjados y en la segunda, material rojo oscuro hojoso (o en forma de láminas) rellenando espacios entre rocas y también en las rocas como pátinas color rojizo oscuro.	46
Figura 4.19 Rocas en Manchón Amarillo. (a) Foto a lo lejos de una parte de la zona donde se aprecia la coloración anaranjada. (b, (c) y (d)) Rocas alteradas, de color blanco con zonas anaranjadas.	47
Figura 4.20 Muestra alterada totalmente a arcillas con boxwork y óxidos.	48
Figura 4.21 Gráfico de variación de pH en el tiempo, debido a la interacción de pirita y agua de lluvia.	55
Figura 4.22 Gráfico de variación de pH en el tiempo, debido a la interacción de pirita con agua del manantial 4.	55
Figura 5.1 Diagrama de Gibbs. No se muestran las aguas de lluvia.	56
Figura 5.2. (a) Gráfico $\text{SO}_4$ vs Ca y (b) Gráfico $\text{SO}_4$ vs Na. No están graficados los datos de aguas de lluvia.	57
Figura 5.3 (a) Gráfico $\text{SiO}_2$ vs Ca y (b) Gráfico $\text{SiO}_2$ vs Na. No están graficados los datos de aguas de lluvia.	57
Figura 5.4 Gráfico $\text{SO}_4$ vs Ca/ $\text{SO}_4$ . No están graficados los datos de aguas de lluvia.	58
Figura 5.5 Gráfico de isótopos D vs $^{18}\text{O}$ . A la izquierda, las muestras superficiales y de manantiales y su línea de tendencia en rojo, en verde la línea meteórica local de Santiago (Santiago-MWL), en rosado la línea meteórica de Chile (Chile-MWL) y en azul oscuro la GMWL. A la derecha los procesos naturales que afectan los valores de $\text{d}^2\text{H}$ y $\text{d}^{18}\text{O}$ , obtenido de Karolyte et al., (2017).	59
Figura 5.6 Diagrama TDIC vs $\delta^{13}\text{C}$ (TDIC). Se han representado los datos de la zona de estudio en el gráfico de Frondini et al., (2009).	60
Figura 5.7 Diagrama Eh-pH para el sistema Fe-S-K-O-H a 25°. Gt = goethita, Jt = K-jarosita, Fh = ferrihydrita, Sh = schwertmannita y Py = pirita. Obtenido de Dold (2010).	63
Figura 5.8 Mapa zona de estudio y trazo de los perfiles.	65
Figura 5.9 Modelo de circulación hídrica para la zona sur del Sky el Arpa.	66
Figura 5.10 Modelo de circulación hídrica para el Manchón Amarillo.	67
Figura 5.11 Modelo de circulación hídrica para Sky el Arpa con orientación N-S.	68

# 1. Introducción

## 1.1. Formulación del problema

Los recursos hídricos son de vital importancia para el desarrollo de la vida, desde su consumo directo hasta su uso en la agricultura y la industria. La calidad del agua es un tema actual por los efectos en la salud humana y, en relación a la sustentabilidad de ecosistemas. Debido a esto, una parte importante de las investigaciones están orientadas a determinar las características y, la evolución fisicoquímica que han llevado a su composición actual.

La química de las aguas depende de varios factores, incluyendo la naturaleza del agua de recarga inicial, las actividades antropogénicas, la interacción agua-roca. Incluso procesos como evaporación o precipitación pueden cambiar la composición del agua (Redwan, 2016).

El drenaje ácido está asociado a la oxidación de sulfuros, ya sea originado naturalmente (drenaje ácido de rocas o drenaje ácido natural) o por actividades mineras (drenaje ácido de minas). Es uno de los mayores problemas medioambientales, debido a la acidez del agua, cuyo pH varía en un rango de 2 – 6, y al elevado contenido de metales (Nordstrom & Alpers, 1999). Estas características, tienen un potencial impacto adverso sobre la flora y fauna, incluso para la salud humana, ya que pueden afectar, inhibir y/o afectar la tasa de crecimiento de especies vegetales y modificar la calidad de aguas superficiales y subterráneas, pudiendo limitar su uso para la población, e incluso puede provocar problemas de corrosión en infraestructura (Ministerio de Minería, 2002).

En el piedemonte andino, en los alrededores de la ciudad de Los Andes, en la región de Valparaíso, existen numerosos manantiales termales (16–35°C) que afloran a diferentes cotas en roca fracturada (Jara, 2016). En esta zona, la evidencia mineral exhibe un pasado con circulación de fluidos a altas temperaturas (120–250°C) (Navarro, 2014). La mayoría de las aguas son aguas dulces, moderadamente mineralizadas, de tipo bicarbonatado y sulfatados cálcico, con una baja conductividad eléctrica (Bustamante et al., 2012b).

En particular, en el marco de las investigaciones realizadas por el proyecto FONDECYT 1170569, se ha estudiado la zona de Campos de Ahumada, ubicada en la Cordillera de Los Andes, a 20 km al noreste de la ciudad de Los Andes, región de Valparaíso (Figura 1.1), como una potencial zona de recarga para los acuíferos del Valle del Aconcagua.

En esta zona afloran manantiales y aguas superficiales con pH ácidos y características químicas distintas a las de las aguas de áreas cercanas. Además, se ha descrito la presencia de una intensa alteración hidrotermal argílica o argílica avanzada (Bustamante et al., 2012a).

A lo largo de Chile la presencia de minerales sulfurados es relativamente común y muy variable en función del tipo de yacimiento y su ubicación geográfica. Por lo que, dependiendo de la presencia de recursos hídricos, la disponibilidad de oxígeno, y de bacterias presentes, puede haber numerosas zonas donde el drenaje ácido ocurra, y probablemente no todas son conocidas (Ministerio de Minería, 2002). Estos procesos no son exclusivos de Chile y, son un problema medioambiental a nivel mundial.

Estos antecedentes nos invitan a estudiar en detalle la influencia de la litología, y los procesos fisicoquímicos que pueden estar controlando el quimismo de las aguas en Campos de Ahumada.

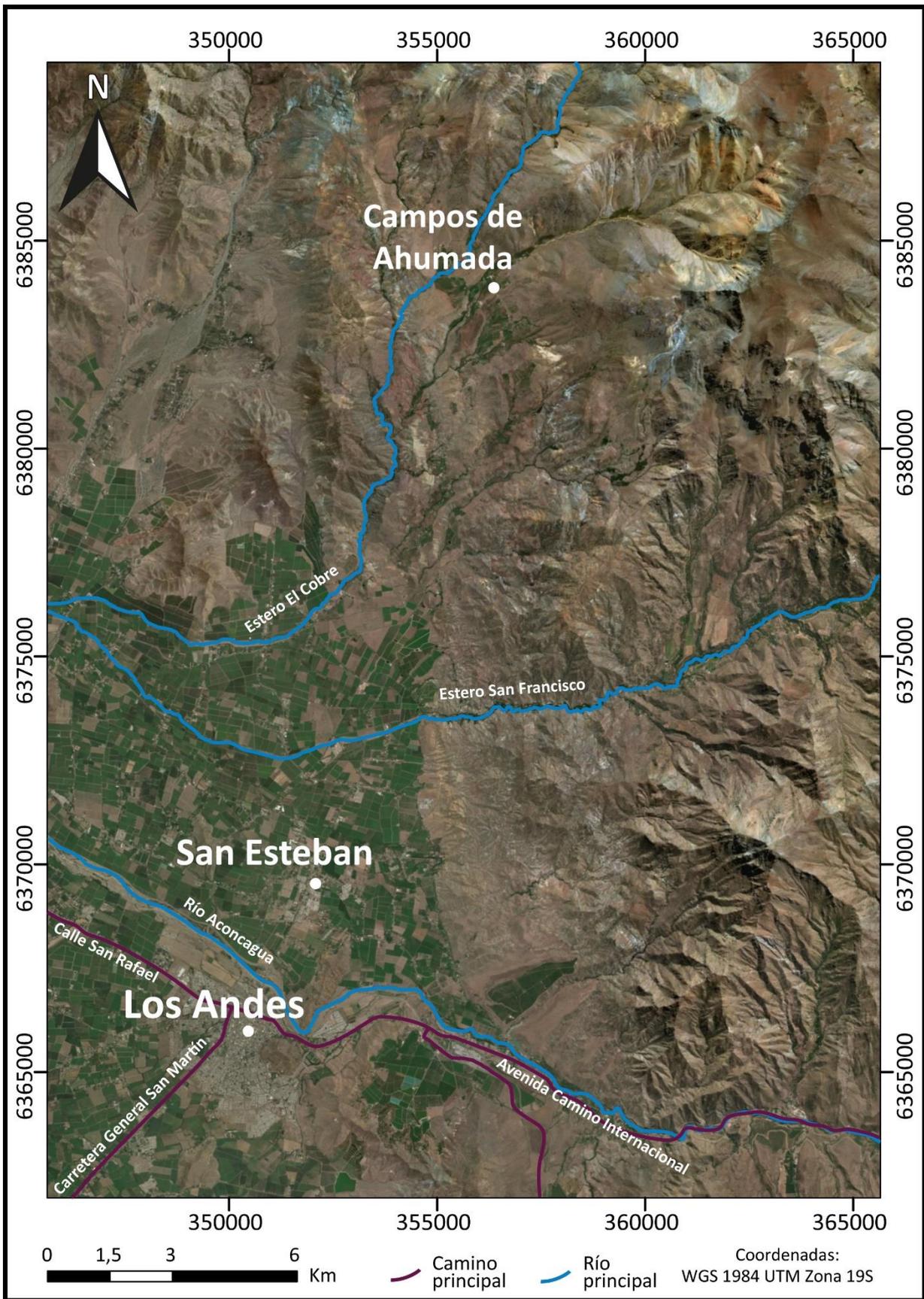


Figura 1.1 Mapa con las ubicaciones de la ciudad de Los Andes, San Esteban y Campos de Ahumada.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Identificar los procesos que contralan la química de las aguas en la zona de Campos de Ahumada.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Analizar la relación entre la mineralogía, la composición química y los parámetros fisicoquímicos de las aguas.
- Determinar los procesos hidrogeoquímicos presentes en la zona de estudio.
- Reproducir los procesos que controlan la química de las aguas mediante las simulaciones geoquímicas.
- Proponer uno o más modelos de circulación hídrica local.
- Determinar posibles riesgos para la población asociados al consumo de agua.

## **1.3. Hipótesis de trabajo**

Las hipótesis en la que se sustenta este trabajo, es que la presencia de manantiales con pH ácidos y con una composición química distinta a la mayoría de las aguas que afloran en la zona, sugiere que los minerales de alteración presentes en Campos de Ahumada podrían estar controlando la química del agua. Considerando la distribución espacial de las aguas es posible establecer un modelo de circulación hídrica local, que permita entender la conexión y/o desconexión de los sistemas cercanos.

## **1.4. Ubicación y vías de acceso**

La zona de estudio, Campos de Ahumada, se encuentra aproximadamente a 20 km al noreste de la ciudad de Los Andes, región de Valparaíso, Chile. Se sitúa, a una latitud aproximada 32° 39' 45" S y longitud aproximada 70° 29' 40" W. Para acceder a la localidad de Campos de Ahumada se debe tomar la ruta E-795, a la cual se puede llegar desde Santa María por la vía E-779, o bien desde San Esteban por la vía E-755 (Figura 1.2). Desde Campos de Ahumada se debe acceder a la zona de estudio por caminos de tierra.



## **2. Metodología**

### **2.1. Revisión de antecedentes**

La primera etapa ha sido la recopilación de información geológica e hidrogeológica del área. Especialmente datos sobre la litología de las rocas y las alteraciones presentes en la zona, e información de la química de las aguas del sector. Además, una recopilación bibliográfica sobre los procesos que afecten la composición de las aguas, como meteorización química y disolución, entre otros.

### **2.2. Preparación de material para muestreo de aguas**

Con la finalidad de tomar muestras de agua correctamente, se preparó el material necesario para ello. Para cada una de las muestras se han utilizado 4 botellas de polietileno de 125 ml tratadas según los protocolos del laboratorio de geoquímica de fluidos del Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA). Así mismo procedí a la revisión y la calibración de todos los instrumentos de medida usados en terreno.

### **2.3. Terreno**

Se llevaron a cabo 2 campañas de terreno, la primera en invierno de 2016 y la segunda en verano de 2017, durante las cuales se tomaron 12 muestras de agua y 26 muestras de rocas. El detalle de la toma de muestras de agua se detalla a continuación.

### **2.4. Muestreo de aguas**

Con el fin de analizar las aguas presentes en la zona de estudio y poder comparar con las aguas de sectores aledaños, 12 muestras en total fueron recolectadas en diferentes puntos de agua. De estas 12 muestras, 6 provienen de manantiales, 3 de ríos y 3 de lluvia.

Las aguas de lluvia fueron recolectadas en botellas de polietileno, con vaselina en su interior para evitar la evaporación, un embudo encima para aumentar el área de entrada del agua, y una malla sobre este para prevenir la entrada de elementos no deseados (Figura 2.1). Las botellas se dejaron durante meses en terreno, para su protección fueron colocadas dentro de un tubo, y afirmadas por estacas y rocas (Figura 2.2).

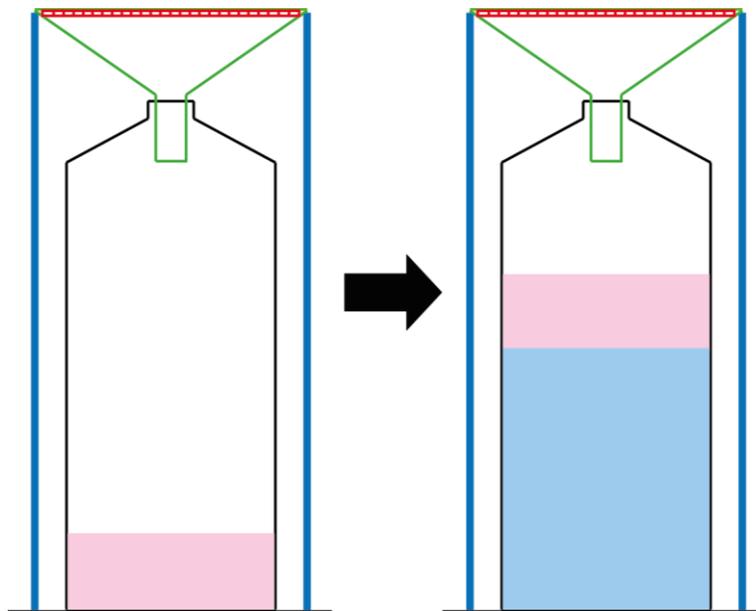


Figura 2.1 Esquema de los recolectores. En negro la botella, en verde el embudo, en rojo la malla y en azul el tubo. A la izquierda solo con vaselina en color rosado y a la derecha luego del ingreso de agua en celeste.



Figura 2.2 Recolector de agua de lluvia.

La medición de los parámetros fisicoquímicos (conductividad eléctrica, temperatura, pH y potencial de oxidación – reducción) fue hecha in situ con un multiparámetro portátil HACH HQ40D. La alcalinidad (como concentración de  $\text{HCO}_3^-$ ) fue determinada por titulación volumétrica, usando ácido clorhídrico al 10% como reactivo valorante y naranja de metilo como indicador. Para integrar el ácido clorhídrico y controlar su volumen, se utilizó una bureta clase A.

De las 4 botellas utilizadas para muestrear, 1 fue filtrada ( $0,45 \mu\text{m}$ ) para la medición de aniones, 2 fueron filtradas ( $0,45 \mu\text{m}$ ) y acidificadas con  $\text{HNO}_3$  para la medición de cationes y elementos traza, y finalmente 1 sin tratar para la determinación de isótopos estables de  $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$  y  $^{13}\text{C}$  (Figura 2.3).

Todas las muestras fueron almacenadas en cámara de frío a  $\sim 4^\circ\text{C}$  hasta su posterior análisis en el laboratorio de geoquímica de fluidos del Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA).



Figura 2.3 Toma de muestras de agua para cationes, aniones, elementos trazas e isótopos estables.

## 2.5. Análisis mineralógico de rocas

Con la finalidad de reconocer la mineralogía en la zona de estudio, especialmente la secundaria, se revisan 21 muestras de roca tomadas en terreno mediante difracción de rayos X.

De las 21 muestras para difracción de rayos X, 20 se preparan para roca total (muestra reducida a polvo) y 1 para la fracción tamaño arcilla. La preparación de estas muestras se detalla en el Anexo A.

El análisis de difracción de rayos X, se realiza en el Laboratorio de Cristalografía del Departamento de Física de la Universidad de Chile, en un difractor BRUKER D8 ADVANCE.

Posteriormente, los difractogramas obtenidos son analizados con el software X'Pert HighScore Plus y con la base de datos The Powder Diffraction File 2 (PDF2).

## 2.6. Análisis químico de rocas

Con el fin de conocer la composición química de las rocas, en 5 muestras se realiza disolución de muestras sólidas, y se determinan cationes, aniones y elementos traza.

La disolución de muestras sólidas se realiza mediante lixiviación asistida por ultrasonido y digestión ácida de bomba (Güngör & Elik, 2007), y la determinación de cationes, aniones y elementos traza, mediante cromatografía de iones, espectrofotometría de absorción atómica y espectrometría de masas de plasma de acoplamiento inductivo, respectivamente.

Lo anterior se realiza en el laboratorio de geoquímica de fluidos del Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA).

## 2.7. Análisis del riesgo potencial por consumo de agua

Para evaluar si las aguas pueden causar un daño en la población debido a su consumo directo, se utiliza el 'Targeted Hazard Quotients (THQ)'.

El THQ es un parámetro utilizado para estimar los riesgos potenciales que tiene para la salud, la exposición a distintos contaminantes a largo plazo (Gergen & Harmanescu, 2012). Fue desarrollado por la 'Environmental Protection Agency' (EPA) en Estados Unidos (EPA, 1989) y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$THQ = \frac{EF * FD * DIM}{RfD * W * T}$$

Donde EF es la frecuencia de exposición (día\*año<sup>-1</sup>), FD es la duración de la exposición (año), DIM es la ingestión diaria del contaminante (mg\*día<sup>-1</sup>), RfD es la dosis oral referencial (mg\*kg<sup>-1</sup>\*día<sup>-1</sup>), W es el peso de una persona (kg) y T es el tiempo promedio de exposición a no carcinógenos (día).

Valores superiores a 1 en el THQ, indican que probablemente se tendrá un efecto perjudicial notable en la población expuesta, mientras que valores inferiores implican un riesgo bajo.

## **2.8. Interpretación hidrogeoquímica**

La interpretación gráfica y numérica es una herramienta básica en estudios hidrogeoquímicos. Es uno de los medios más usados para resumir y presentar datos sobre la calidad de agua y, existen numerosos métodos que se pueden aplicar, dependiendo de la finalidad (clasificar, correlacionar, analizar, ilustrar, etc.) (Zaporozec, 1972).

En este trabajo, para poder establecer el tipo químico de las aguas, entender el posible origen de los iones y realizar una comparación con las aguas de sectores cercanos, se clasifican y correlacionan los datos hidrogeoquímicos, mediante diagramas binarios, razones iónicas y diagramas triangulares (Piper), usando los elementos mayores, menores y trazas.

## **2.9. Simulaciones geoquímicas**

Para las simulaciones geoquímicas se utiliza el programa Phreeqc. Para su uso y entendimiento, se utilizó el manual del programa 'Description of input and Examples for PHREEQC Version 3—A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One – Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations'.

Permite reproducir los procesos que explican el quimismo de las muestras analizadas. En este trabajo se han implementado modelos inversos para reproducir la geoquímica encontrada en el área de estudio.

Un modelo inverso intenta determinar conjuntos de transferencias de moles de fases que dan cuenta de los cambios químicos entre un agua inicial o una mezcla de aguas iniciales y un agua final. Es decir, dada una composición de agua o mezcla de aguas inicial y un agua final, el programa entrega todas las combinaciones posibles de disolución y/o precipitación de los minerales escogidos, que puedan dar las características químicas del agua final, especificando las cantidades de moles transferidos de cada mineral.

El modelo de transporte reactivo (RTM) es una herramienta esencial para analizar procesos fisicoquímicos en acuíferos. Ya que integra procesos acoplados de la física, la geoquímica e incluso de la microbiología. Por lo que pueden describir interacciones de procesos a distintas escalas de espacio y tiempo.

### **3. Antecedentes del área de estudio**

#### **3.1. Marco geológico regional**

La configuración geotectónica de Chile central está principalmente caracterizada por la subducción de la placa Nazca bajo la placa Sudamericana, la cual tiene una tasa de convergencia de 8 cm/año en el presente (DeMets et al., 1994). Entre los 28°S y los 33°S, debido a que la subducción es subhorizontal y ocurre a profundidades de 100 km aproximadamente (Cahill & Isacks, 1992; Pardo et al., 2002), se tiene ausencia de volcanismo, en cambio desde los 33° hacia el sur, dado que la subducción es de tipo chilena con un ángulo de 25–30° (Fuenzalida et al., 1992), hay presencia de volcanismo.

Entre los 32°S y los 33°S, correspondiente a la región de Valparaíso y parte norte de la región Metropolitana, se distinguen unidades geomorfológicas con orientación norte–sur, de oeste a este: las Planicies Litorales, la Cordillera de la Costa, la Mediana Montaña que en esta zona reemplaza a la Depresión intermedia y la Cordillera de Los Andes (Rivano, 1996).

Las formaciones geológicas en este sector afloran como bandas con orientación norte–sur. La Cordillera de la Costa presenta rocas paleozoicas a cretácicas, correspondiendo las más antiguas a granitoides de composición variable desde granodioritas a tonalitas gnéissicas de la Formación Cochoa con una edad del Carbonífero Superior, le siguen rocas volcano–sedimentarias de las formaciones Pichidangui (Cárnico–Nórico), La Ligua (Triásico Superior), Los Molles (Triásico Superior–Liásico) y Quebrada del Pobre (Liásico), aparecen rocas intrusivas del Jurásico principalmente dioritas cuarcíferas, luego se encuentran rocas sedimentarias y volcano–sedimentarias de las formaciones Ajjal, Cerro Calera, Horqueta, todas de edades del Jurásico y la Formación Lo Prado del Cretácico Inferior (Rivano, 1996). Sobre estas aparecen basaltos y andesitas basálticas de la Formación Veta Negra del Cretácico Inferior, y sobre esta, intercalaciones volcánicas y sedimentos clásticos de la Formación Las Chilcas de edad Cretácica (Rivano, 1996). En la Cordillera de Los Andes afloran lavas de composición básica a intermedia con rocas sedimentarias de la Formación Abanico de edad Eoceno Superior(?)–Mioceno o de la Formación Los Pelambres según Rivano (1996), rocas principalmente volcánicas de la Formación Farellones de edad Miocena (Fock, 2005) y rocas intrusivas de diversa composición. En toda la zona existe presencia de rocas intrusivas cuyas edades, en general, se hacen más jóvenes hacia el este, las cuales van desde el Jurásico hasta el Mioceno (Rivano, 1996).

En la región, el cuaternario se presenta en: la costa, conformado por sedimentos eólicos antiguos y depósitos eólicos; en valles como sedimentos aluviales y coluviales, formados principalmente por gravas, arenas y limos; y en zonas fronterizas del lado este, se encuentran depósitos glaciales y fluvoglaciales (Rivano, 1996).

## **3.2. Rocas Estratificadas**

Las rocas estratificadas que afloran en la zona de estudio (Figura 3.1) corresponden principalmente a la Formación Abanico, y en menor medida a la Formación Farellones.

### **3.2.1. Formación Abanico (Aguirre, 1960)**

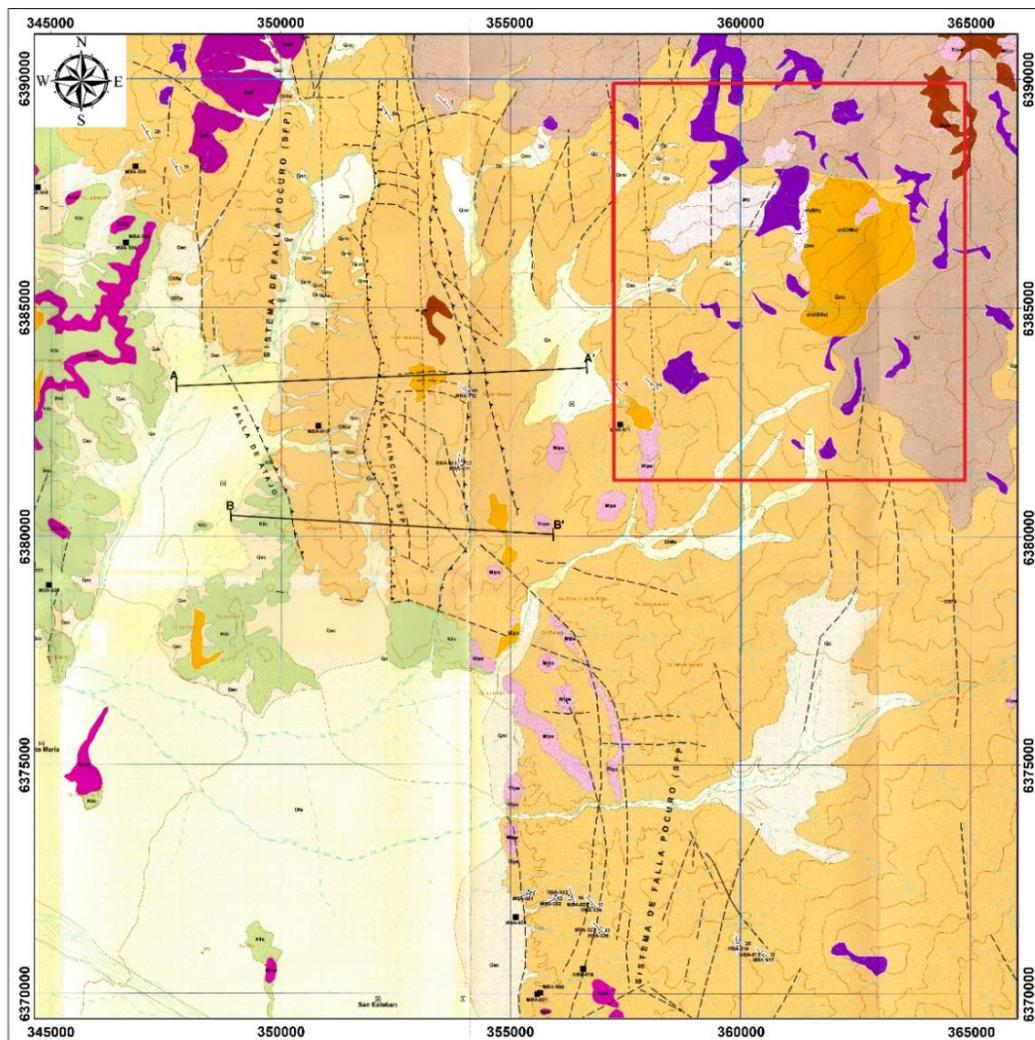
La Formación Abanico es una unidad volcano-sedimentaria, dispuesta de norte a sur con un espesor variable entre 2000 m (Charrier, 1973) y 3000 m (Aguirre, 1960; Klohn, 1960; Thiele, 1980). Se compone de lavas de composición ácida a intermedia con texturas porfídicas a afaníticas, rocas piroclásticas ácidas (tobas y brechas volcánicas) e intercalaciones sedimentarias continentales fluviales, aluviales y lacustres (brechas, conglomerados, areniscas, lutitas, limolitas y en menor medida areniscas calcáreas). Esta formación en el trabajo de Rivano (1996) se ha considerado equivalente a la Formación Los Pelambres entre los 32°S y 33°S.

Nyström et al., (2003), en su trabajo de Chile central entre los 33°15'S y 33°45'S, dividieron esta formación en dos miembros: uno inferior de más de 1900 m de espesor y uno superior de 1200 m. El miembro inferior está compuesto por lavas básicas, rocas piroclásticas e intercalaciones sedimentarias lacustres, y el miembro superior por lavas básicas.

Esta formación, en la zona entre los 32°S y 33°S, limita al oeste con las formaciones Lo Valle y Las Chilcas, y al este con la Formación Farellones, aunque hacia el sur de los 33°S esta última divide en 2 bandas con orientación norte-sur a la Formación Abanico (Fock, 2005).

Los contactos de la Formación Abanico en la parte occidental con rocas subyacentes son por discordancia erosiva, contactos concordantes y también mediante contacto tectónico de estructuras asociadas a la Zona de Falla Pucuro, y en la parte oriental son por discordancia angular (Aguirre, 1960; Charrier et al., 2002), contactos concordantes (Thiele, 1980) y contacto por fallas.

La edad de la Formación Abanico está acotada entre el Eoceno medio a tardío y el Mioceno temprano tardío (Charrier et al., 2002).



0 2,5 5 10 kilómetros

### Leyenda

Depósitos no consolidados	Rocas Intrusivas	Rocas Estratificadas
Qa <b>Depósitos aluviales</b>	MIt <b>Intrusivo Tambillos</b>	Mf <b>Formación Farellones</b>
Qfa <b>Depósitos fluviales antiguos</b>	Mipa <b>Intrusivo Portezuelo Azufre</b>	OiMa <b>Formación Abanico</b>
Qc <b>Depósitos coluviales</b>	Mhrd <b>Hipabisales rioladíticos</b>	Kilc <b>Formación Las Chilcas</b>
Qac <b>Depósitos aluviales-coluviales</b>	Ksif <b>Intrusivo Fredes</b>	
Qrm <b>Depósitos de remoción en masa</b>	Ksisl <b>Intrusivo San Lorenzo</b>	

### Simbología

--- Contacto geológico observado / inferido	A—A' Traza de perfil geológico	Alteraciones Hidrotermales
--- Falla observada / inferida	— Río	Caolinita
▲---▲ Falla inversa, inferida	— Quebrada permanente e intermitente	Fe3+
▼---▼ Falla normal invertida, inferida	— Lago o laguna	High Qz
--- Traza de plano axial anticlinal	— Curva de nivel	Illite-Muscovite
--- Traza de plano axial sinclinal	1000 Cota (m s.n.m.)	
↗ Rumbo y manto de estratos	■ Muestra de roca	

Figura 3.1 Mapa geológico zona al norte de Los Andes y en rectángulo rojo la zona de estudio. Modificado de Bustamante et al. (2012b).

### **3.2.2. Formación Farellones (Klohn, 1960)**

La Formación Farellones es una unidad volcánica continental, compuesta por dos subunidades, una inferior con un espesor de hasta 300 m y otra superior de espesor mayor a 1500 m (Vergara et al., 1988; Rivano et al., 1990). El miembro inferior está constituido por tobas e ignimbritas de composición riolítica, con intercalaciones de volcanitas, y el miembro superior, en contacto concordante con el anterior, está constituido por lavas de composición basáltica y andesítica, con intercalaciones de tobas y aglomerados de composición andesítica, y en algunos sectores hay además intercalaciones de rocas de composición dacítica (Rivano et al., 1990).

Esta formación sobreyace a la Formación Abanico en discordancia angular según Aguirre (1960), aunque otros autores lo han descrito como contacto concordante o pseudoconcordante (Charrier et al., 2002), y su techo corresponde a la actual superficie de erosión.

La edad de la Formación Farellones varía entre 19 y 8 Ma según análisis radiométricos de K-Ar, por lo que tendría una edad Miocena (Vergara et al., 1988).

### **3.3. Rocas Intrusivas**

En el área de estudio están presentes intrusivos del Mioceno, descritos por Rivano (1985; 1996).

#### **3.3.1. Intrusivo Tambillos**

Unidad que corresponde a una serie de cuerpos dacíticos de tamaño stock, la cual en la zona de estudio se encuentra afectada por una alteración hidrotermal en su contacto oriental con la Formación Abanico (Bustamante et al., 2012a).

Esta unidad tiene una edad de 6.5 y 9.8 Ma, de acuerdo con análisis radiométricos de K-Ar, por lo que su edad corresponde al Mioceno Superior (Rivano et al., 1985).

#### **3.3.2. Intrusivo Portezuelo Azufre**

Unidad que se compone de pequeños cuerpos de tipo pórfidos cuarzo-feldespáticos y pórfidos de composición diorítica hasta riodacítica de tamaño stock, que se alinean con la Zona de Falla Pocuro desde Campos de Ahumada hacia Los Barros (Bustamante et al., 2012a)

Las edades radiométricas indican una edad entre 13 y 18 Ma, pero probablemente estas mediciones correspondan a una alteración, por lo que se considera como una edad mínima (Rivano et al., 1985; 1996). Su edad correspondería al Mioceno Inferior.

### **3.4. Depósitos Cuaternarios**

Los depósitos cuaternarios en el área de estudio corresponden a sedimentos aluviales y coluviales descritos por Rivano (1996).

Estos depósitos aluviales y coluviales están relacionados a los cursos de agua actuales y tienen mayor importancia en la Hoya del río Aconcagua. Los depósitos aluviales son escombros de falda producidos por cursos fluviales que descienden desde los cerros hacia los valles, los depósitos coluviales corresponden a material detrítico grueso que conforman conos de deyección de alta pendiente en quebradas.

### **3.5. Estructuras**

En Chile central entre los 32°S y 33°S se han definido 3 dominios estructurales separados por límites geológicos y morfológicos, y se han observado 3 orientaciones de sistemas de fallas (Rivano, 1996). El Dominio Costero, que se compone de rocas del Mesozoico Inferior y Medio, y por intrusivos del Paleozoico, coincide con las Planicies Litorales y la mayor parte de la Cordillera de la Costa, el cual muestra una deformación importante. El Dominio Central, compuesto por formaciones cretácicas e intrusivos del Cretácico y Paleoceno, corresponde al borde este de la Cordillera de la Costa hasta la Mediana Montaña incluyendo la Zona de Falla Pocuro, y muestra una deformación suave con pliegues amplios de varios centenares de metros hasta kilómetros de radio de curvatura. Por último, el Dominio Cordillerano, compuesto por formaciones jurásico–cretácicas, la Formación Farellones del Mioceno y cuerpos intrusivos a hipabisales, corresponde a todo el flanco oeste de la Cordillera Principal, cuyo límite oriental traspasa el límite chileno – argentino y representa un gran apilamiento tectónico compresivo. Dentro de los sistemas de fallas el más importante corresponde al NS–NNW, el cual aparece en el Dominio Central y en el Dominio Cordillerano, siendo la estructura más importante la Zona de Falla Pocuro que marca el límite entre ambos dominios, el Sistema de fallas NWN–NW se encuentra en el norte de los dominios Costero y Central, y se evidencia por fallas normales subparalelas y de trayecto corto, por último, el Sistema de fallas NNE–NE se aprecia tanto en el sur del lado occidental como en el norte del Dominio Central y aparece como fallas conjugadas asociadas a los 2 sistemas de fallas anteriores.

Dada la cercanía a la zona de estudio, la zona de Falla Pocuro es la estructura más importante.

La Zona de Falla Pocuro, descrito como rocas cataclásticas alteradas de hasta 2 km de ancho que afloran a unos 100 km al norte del Valle Aconcagua (Aguirre, 1960;

Rivano, 1996), tiene una orientación general N–S. El tipo de falla sigue siendo discutido hasta el día de hoy, en un comienzo fue definida como una falla normal (Aguirre, 1960; Carter & Aguirre, 1965), sucesivamente Rivano (1996) le agrega un componente de rumbo mientras que Campbell (2005) la considera un sistema estructural de fallas inversas de alto ángulo con un componente de rumbo dextral.

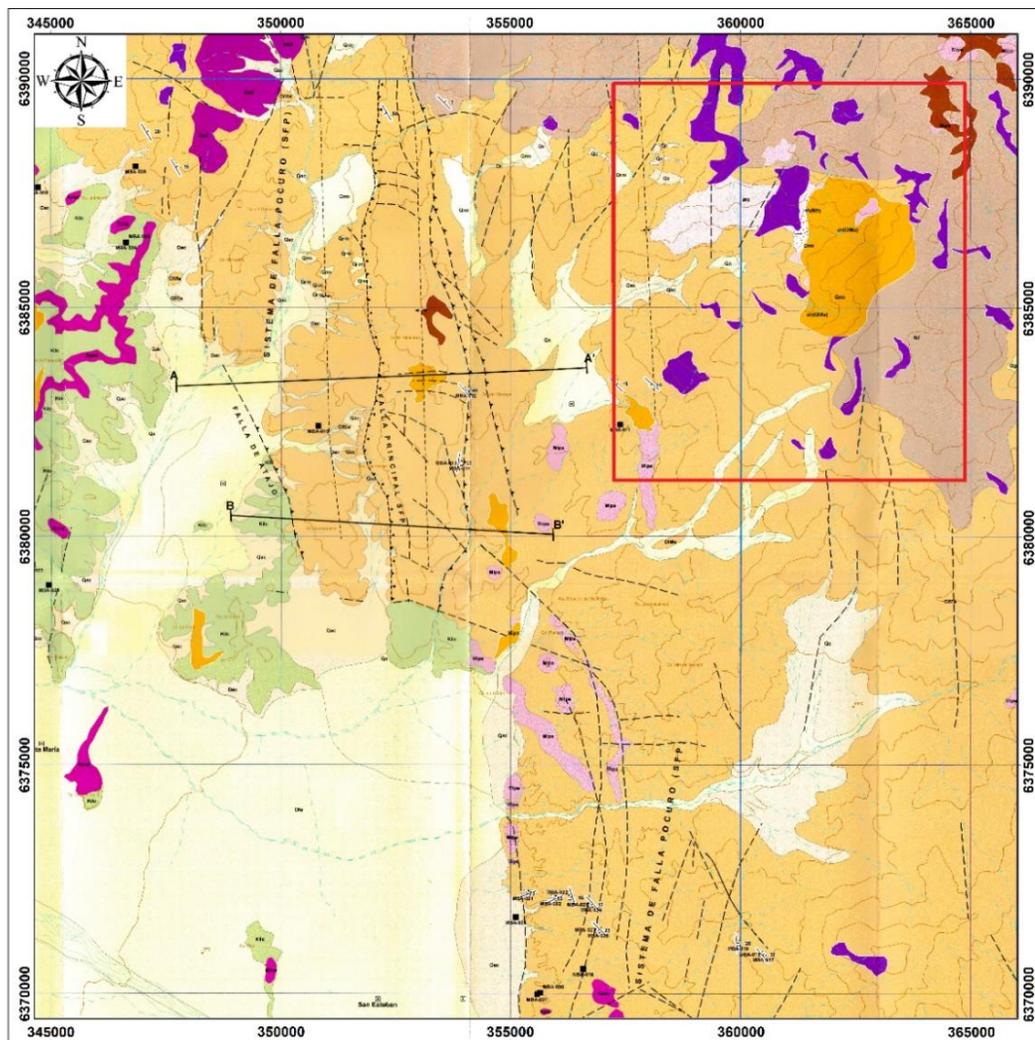
La edad mínima que presenta esta falla está acotada al Oligoceno Superior–Mioceno Inferior por dataciones  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  y K–Ar en diques emplazados en ramas de la Zona de Falla Pocuro (Gana & Wall, 1997).

### **3.6. Metamorfismo, alteración y mineralización**

El metamorfismo regional que afecta a las rocas volcánicas del Mesozoico y del Cenozoico de Chile central es no–deformativo, de bajo grado, clasificado como metamorfismo de enterramiento con facies que van de sub–esquistos verdes a esquistos verdes (Levi et al., 1989).

En Chile central, entre los  $32^{\circ}\text{S}$  y los  $33^{\circ}\text{S}$ , hay varias zonas que presentan alteración hidrotermal. En el área de Cuesta de Chacabuco y Baños el Corazón (al suroeste de la zona de estudio) Padilla y Vergara (1985) describen intrusivos subvolcánicos con una alteración de ceolitas, albita, clorita, calcita, mica blanca, sericita, minerales de arcilla y cuarzo, cuya alteración hidrotermal de temperatura menor a  $180^{\circ}$  sería similar a la de los campos geotérmicos. Rivano (1996) describe varias zonas, entre ellas el Distrito Tranquila, el cual se encuentra a lo largo de las trazas de la Zona de Falla Pocuro, caracterizada por una alteración intensa, que presenta silicificación, hematización y en algunos sectores boxworks evidenciando lixiviación de minerales sulfurados. Navarro (2014) describe la mineralogía de alteración asociado al Sistema de Fallas Pocuro–San Ramón caracterizada por tener dos episodios de alteración, uno de alta temperatura con ceolitas, clorita e illita, y otro superpuesto al anterior, de baja temperatura con calcita principalmente y esmectitas.

En el área de estudio, Campos de Ahumada (Figura 3.2), según el trabajo de Bustamante et al. (2012a), aparecen numerosas zonas de alteración hidrotermal. Al este una gran zona alterada a caolinita, en toda la zona de estudio varios sectores pequeños alterados a cuarzo, al noreste unas pequeñas zonas alteradas con óxidos de hierro y, al suroeste un sector alterado a illita – moscovita y otro a caolinita.



0 2,5 5 10 kilómetros

### Leyenda

Depósitos no consolidados	Rocas Intrusivas	Rocas Estratificadas
Qa <b>Depósitos aluviales</b>	MIt <b>Intrusivo Tambillos</b>	Mf <b>Formación Farellones</b>
Qfa <b>Depósitos fluviales antiguos</b>	Mipa <b>Intrusivo Portezuelo Azufre</b>	OiMa <b>Formación Abanico</b>
Qc <b>Depósitos coluviales</b>	Mhrd <b>Hipabisales riódacíticos</b>	Kilc <b>Formación Las Chilcas</b>
Qac <b>Depósitos aluviales-coluviales</b>	Ksif <b>Intrusivo Fredes</b>	
Qrm <b>Depósitos de remoción en masa</b>	Ksisl <b>Intrusivo San Lorenzo</b>	

### Simbología

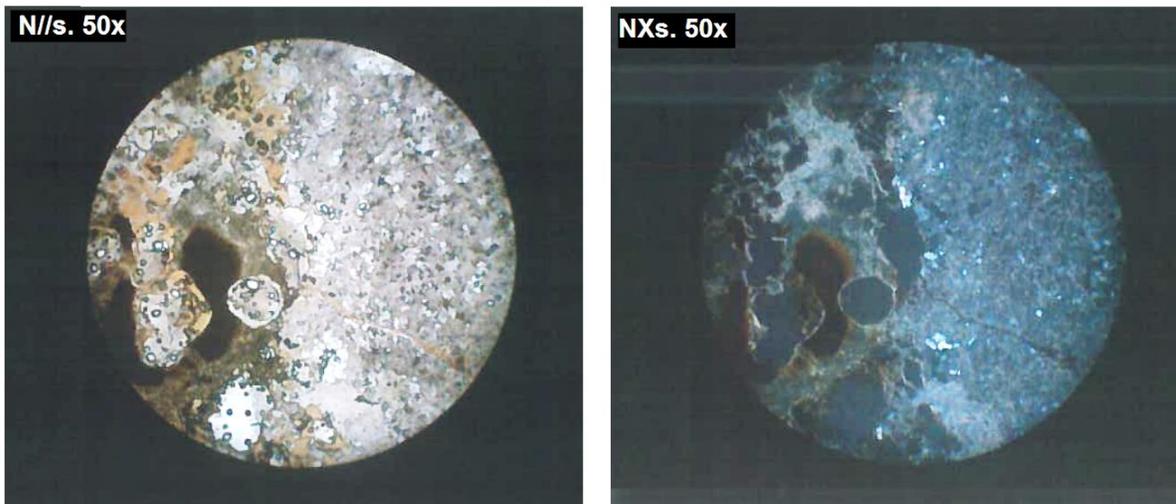
--- Contacto geológico observado / inferido	A—A' Traza de perfil geológico	Alteraciones Hidrotermales
--- Falla observada / inferida	— Río	Caolinita
▲—▲ Falla inversa, inferida	— Quebrada permanente e intermitente	Fe3+
▼—▼ Falla normal invertida, inferida	— Lago o laguna	High Qz
--- Traza de plano axial anticlinal	— Curva de nivel	Illite-Muscovite
--- Traza de plano axial sinclinal	1000 Cota (m s.n.m.)	
↙ Rumbo y manto de estratos	■ Muestra de roca	

Figura 3.2: Mapa geológico zona al norte de Los Andes y en rectángulo rojo la zona de estudio. Modificado de Bustamante et al. (2012b)

Además, en las muestras de roca que obtuvieron en la zona de estudio, describen alteraciones de cuarzo – sericita acompañados de minerales opacos y hematita (Figura 3.3).

Rivano (1996) describe la minería metálica en el área de Chile central entre los 32°S y los 33°S como mayoritariamente yacimientos de cobre y cobre–oro, y en algunos casos asociados a estos también hay presencia de plata y/o molibdeno y/o zinc y/o plomo, agrupándolos de acuerdo con las edades de los intrusivos. Estos yacimientos suelen ser vetiformes.

#### MICROFOTOGRAFIA.



Cúmulo de opacos en masa fundamental completamente arcilizada. Los opacos primarios se ven alterados a hematita y la masa fundamental que los rodea a limonita, cuarzo, arcillas y mica blanca.

*Figura 3.3: Microfotografía de una muestra en Campos de Ahumada (Bustamante et al., 2012b).*

### 3.7. Hidrología e hidrogeología

El área de estudio se encuentra a unos 80 km al norte de Santiago, en la cuenca del Aconcagua, en la subcuenca del Aconcagua Medio (Figura 3.4) y en la subsubcuenca de Estero Quilpue, cuyas áreas son 7333,8 km<sup>2</sup>, 2748,8 km<sup>2</sup> y 592 km<sup>2</sup> respectivamente.

La cuenca del Aconcagua se extiende desde el límite Chile–Argentina hasta su desembocadura en el mar en Concón, haciéndose más angosta hacia este último. El río principal, Río Aconcagua, recibe aportes del Río Blanco y Río Colorado en la zona alta, en su zona media recibe aportes del Río Putaendo, Estero Jahuel y Estero Pocuro, y en la zona baja recibe aportes del Estero Catemu, Estero de Los Loros y Estero Limache.

Los climas identificados en la cuenca del Río Aconcagua son Templado de tipo Mediterráneo con estación seca prolongada y Frío de altura en la Cordillera de Los Andes, el primero se desarrolla prácticamente en toda la cuenca, con una temperatura media anual de 15,2°C registrada en Los Andes y contrastes térmicos fuertes, presenta un

invierno bien marcado con temperaturas de hasta 0°C, mientras que en verano las máximas superan los 27°C, el Clima Frío de Altura se presenta sobre los 3000 m en la Cordillera de Los Andes, con bajas temperaturas y precipitaciones sólidas. Para ambos tipos de clima las precipitaciones son mayores en invierno durante junio, julio y agosto (CADE-IDEPE, 2004). La precipitación media anual es alrededor de 530 mm (DGA, 2002).

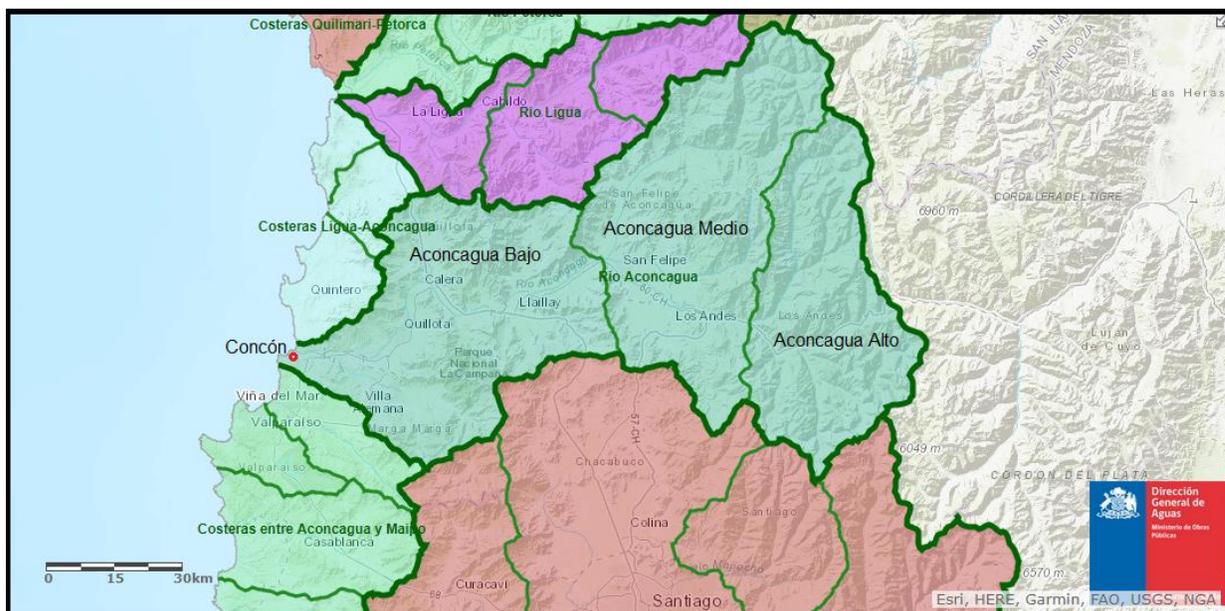


Figura 3.4: Cuenca del Aconcagua y sus subcuencas. Fuente: Dirección General de Agua, <https://www.dga.cl/>

El Río Aconcagua presenta crecidas en invierno debido a precipitaciones y en primavera debido a los deshielos, en detalle; La Subcuenca Alta del Aconcagua tiene un régimen nival, con mayores crecidas en diciembre y enero, y el período de estiaje en junio, julio y agosto; La Subcuenca Media presenta un régimen nivo-pluvial, y estiajes en los meses de marzo, abril y mayo; y la Subcuenca Baja también tiene un régimen nivo-pluvial con mayores crecidas en los meses de diciembre y enero, mientras los menores caudales ocurren en marzo, abril y mayo (CADE-IDEPE, 2004). Aunque según la DGA (2002) el régimen es pluvio-nival con mayores caudales en invierno, donde se concentra más del 90% de las precipitaciones anuales.

En las cabeceras del valle del Río Aconcagua se acumulan importantes volúmenes de sedimentos de distinta granulometría, los depósitos del tipo morrénico están presentes por sobre los 2500 m s.n.m. aguas arriba, los depósitos de corrientes de barro generados durante el periodo de glaciación están expuestos hasta la localidad de Santa María, siendo estos depósitos los que rellenan gran parte de las quebradas tributarias y los tramos superiores de los valles principales (DGA, 2002).

Los sedimentos de rellenos más recientes son producidos por la erosión que ejercen los cursos fluviales y que junto a procesos gravitacionales retrabajan los accidentes topográficos. Se reconocen las siguientes estructuras depositacionales:

conos de deyección, terrazas fluviales, llanuras aluviales, depósitos de pie de monte y taludes de detritos. El origen de los sedimentos clásticos corresponde a la erosión de rocas volcánicas e intrusivas, y en menor medida de rocas sedimentarias. Los sedimentos en el área forman una extensa capa de 1155 km<sup>2</sup> aproximadamente (DGA, 2002).

En el valle del Río Aconcagua se han reconocido 4 unidades hidrogeológicas: la Unidad A se compone de sedimentos de granulometría heterogénea con matriz de arenas finas, limos y arcillas, estas últimas dándole un carácter de permeabilidad regular, la Unidad B compuesta de sedimentos de granulometría gruesa a media, de ripios gravillentos, suele tener una matriz arenosa que en algunas zonas presenta escasos limos arcillosos, por lo que presenta una permeabilidad buena exceptuando en estas últimas zonas, la Unidad C está compuesta por una granulometría bastante heterogénea donde predominan las gravas medias hasta las arenas finas con una matriz que debe ser limosa con una cantidad media de arcillas lo que le da una baja permeabilidad, y la Unidad D que corresponde a un conjunto de sedimentos de granulometría fina del tipo arenas limosas con abundante matriz de arcilla (DGA, 2002).

Los acuíferos sólo se ubican alrededor del cauce del río Aconcagua y Putaendo, ya que el resto de la cuenca presenta permeabilidades nulas o muy bajas (CADE-IDEPE, 2004). Se divide el acuífero del Río Aconcagua en 9 sectores (DGA, 2015), siendo el Sector San Felipe Los Andes el más cercano al área de estudio.

El acuífero en el Sector San Felipe Los Andes (Unidad B) en términos generales tiene características freáticas y sus potencias varían entre 50 y 100 m, incrementándose hacia la ciudad de San Felipe donde se alcanzan entre 100 y 200 m de espesor (DGA, 2002).

## 4. Resultados

### 4.1. Muestras de agua

De las 12 muestras tomadas, 6 provienen de manantiales, 3 de aguas superficiales y 3 de aguas de lluvia. Estas fueron tomadas o recolectadas (para el caso de las aguas de lluvia) dentro del área de estudio y en la comuna de San Esteban (Figura 4.1).

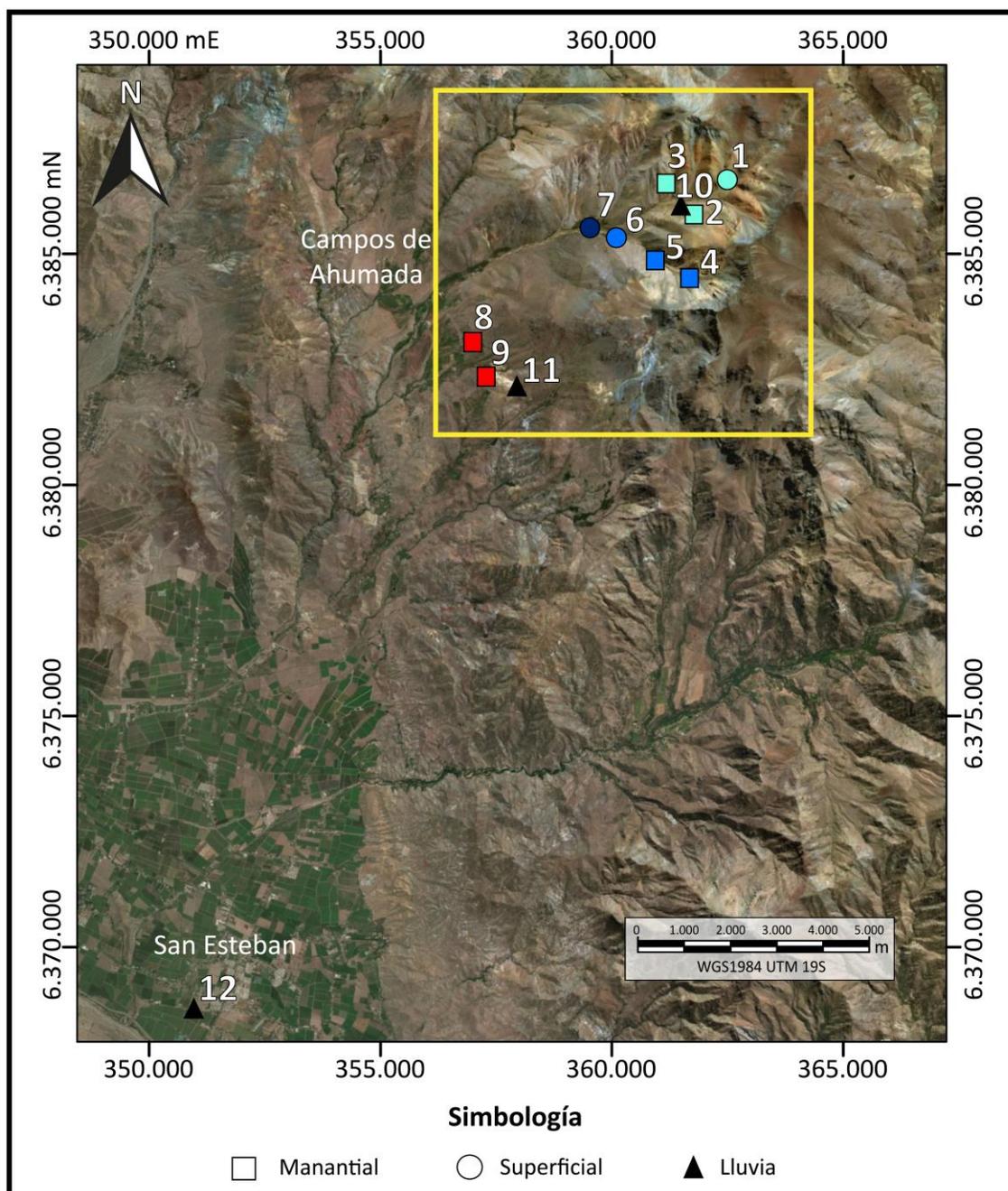


Figura 4.1 Mapa de los puntos de toma de muestras de agua, en el recuadro amarillo se encuentra la zona de estudio.

Las muestras de agua, provenientes de manantiales y aguas superficiales, fueron tomadas en dos zonas del área de estudio, donde se aprecia alteración hidrotermal (Figura 4.2). La primera, el Sky el Arpa, corresponde a la parte noreste del área de estudio, la cual se puede dividir en una zona norte y otra sur y, sus afluentes se juntan aguas abajo hacia el oeste. La segunda, el Manchón Amarillo en el suroeste del área de estudio. Las 3 muestras de agua de lluvia fueron tomadas en el Sky el Arpa, el Manchón Amarillo y en la comuna de San Esteban.

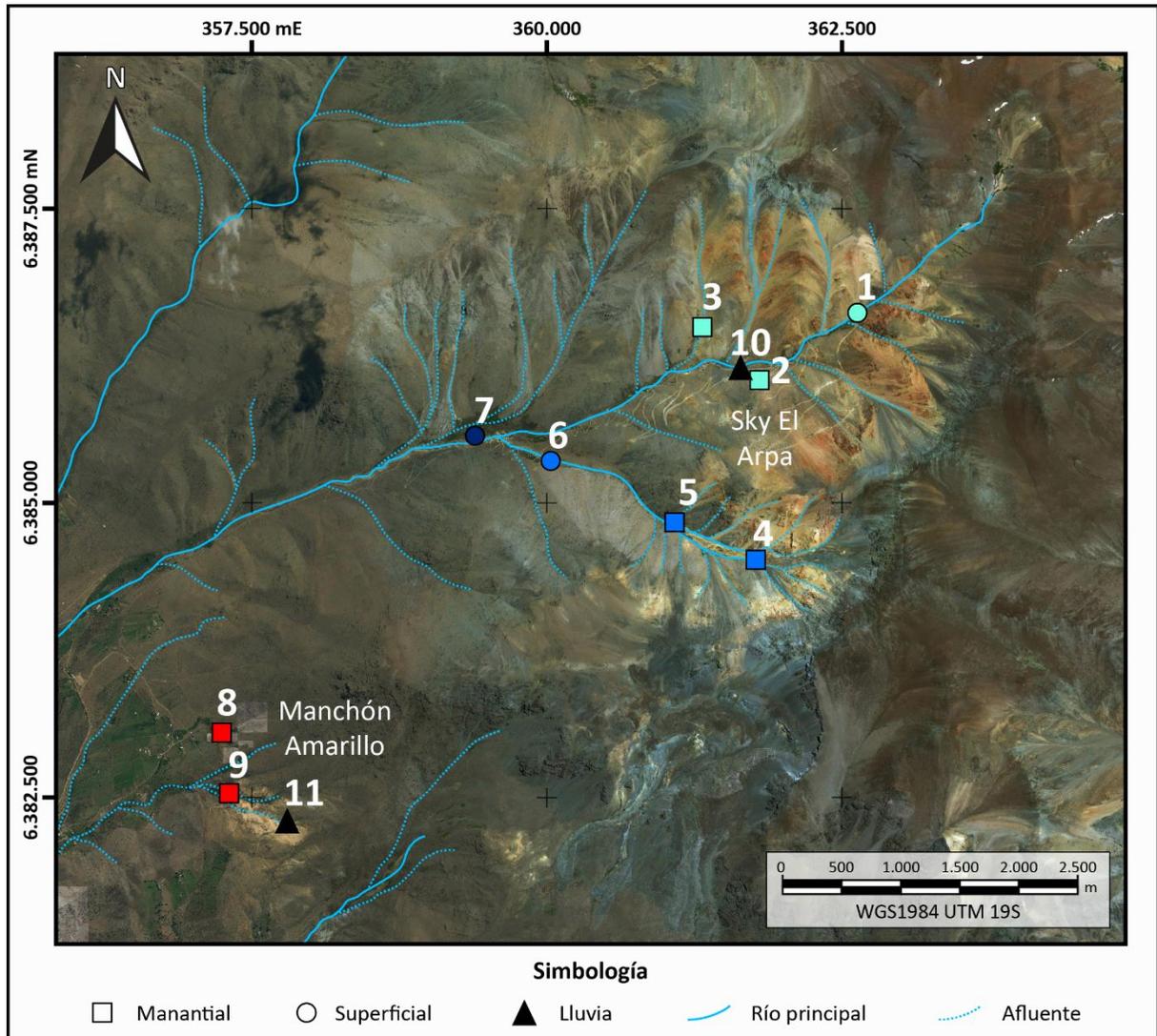


Figura 4.2 Mapa zona de estudio y los puntos donde fueron tomadas las muestras de agua.

En el Sky el Arpa, se tomaron en total 7 muestras, 4 provenientes de manantiales y 3 de aguas superficiales. En la zona norte, la muestra 1 fue tomada del río principal de este sector (Figura 4.3A), la muestra 2 de una zona donde aflora el agua y la utilizan para beber (Figura 4.3B), y la muestra 3 fue tomada de la ladera norte de esta zona donde el agua aflora a través de fracturas y genera escorrentía en algunos tramos hasta llegar al río principal (Figura 4.3C y 4.3D). En la zona sur, la muestra 4 aflora en la quebrada en

un deslizamiento de rocas y genera escorrentía (Figura 4.3E), la muestra 5 aflora en conglomerado semiconsolidado (Figura 4.3F), y la muestra 6 fue tomada en el río principal de esta zona que proviene de las vertientes anteriores. Finalmente, la muestra 7 fue tomada desde el río producto de los 2 ríos principales de las 2 subzonas anteriores.

En el Manchón Amarillo se tomaron 2 muestras de agua, la muestra 8 desde una vertiente que aflora entre material no consolidado y que es usada para regadío y para beber. Por otra parte, la muestra 9 brota en roca consolidada desde una fractura N20E/75NW, donde alrededor hay precipitados de hierro y sales (Figura 4.4).

La muestra de agua de lluvia recolectada en el Sky El Arpa es la muestra 10, en la parte norte, la muestra 11 corresponde a agua de lluvia del Manchón Amarillo y la muestra 12 a agua de lluvia recolectada en la ciudad de San Esteban.



Figura 4.3 Puntos donde se tomaron muestras de agua en Sky El Arpa. La imagen A corresponde a la muestra 1, la B a la muestra 2, la C y D a la muestra 3, la E a la muestra 4 y la F a la muestra 5.



*Figura 4.4 Punto de muestra de agua 9 en Manchón Amarillo.*

#### **4.1.1. Parámetros fisicoquímicos**

Los parámetros fisicoquímicos medidos in situ de las muestras, son conductividad eléctrica (C.E.), total de sólidos disueltos (TDS), temperatura, pH y potencial redox (Eh), la dureza y la alcalinidad fueron calculados una vez obtenidos los resultados de laboratorio. Estos parámetros se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos de las aguas de la zona de estudio y sus valores máximos, mínimos, mediana y promedio. \*Excluyendo las aguas de lluvia. En 'Zona', SA1 corresponde a la zona de Sky el Arpa norte, SA2 al Sky el Arpa sur, SA3 al Sky el Arpa oeste, MA a Manchón Amarillo y SE a San Esteban.

Id	Fuente	Zona	C.E. [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	TDS [mg/L]	T [°C]	pH	Eh [mV]	Dureza [mg/L de CaCO <sub>3</sub> ]	Alcalinidad [ppm CaCO <sub>3</sub> ]
1	Superficial	SA1	48,1	30,8	9,5	7,27	117,9	19,49	25,0
2	Manantial	SA1	161,9	103,6	17,2	6,32	177,9	59,59	22,5
3	Manantial	SA1	288,0	184,3	17,5	4,01	344,3	71,29	0,0
4	Manantial	SA2	118,2	75,6	27,0	6,54	152,5	38,79	15,0
5	Manantial	SA2	250,0	160,0	22,7	4,22	328,1	78,75	10,0
6	Superficial	SA2	470,0	300,8	18,1	3,86	434,8	165,89	0,0
7	Superficial	SA3	187,2	119,8	16,3	4,58	333,6	60,91	5,0
8	Manantial	MA	185,6	118,8	21,9	7,13	197,3	53,36	57,5
9	Manantial	MA	714,0	457,0	19,6	3,98	335,5	292,18	0,0
10	Lluvia	SA1	14,1	9,0	15,7	5,87	128,1	4,47	0,8
11	Lluvia	MA	45,4	29,1	15,6	6,17	156,5	18,10	13,8
12	Lluvia	SE	56,1	35,9	15,0	6,68	137,5	30,27	18,0
Máximo*			714,0	457,0	27,0	7,3	434,8	292,2	57,5
Mínimo*			48,1	30,8	9,5	3,9	117,9	19,5	0,0
Mediana*			187,2	119,8	18,1	4,6	328,1	60,9	10,0
Promedio*			269,2	172,3	18,9	5,3	269,1	93,4	15,0

Sin considerar las muestras de agua de lluvia, el rango de la conductividad eléctrica (C.E.) está entre 48,1 y 714  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , correspondientes a la muestra 1 y 9 respectivamente. Se tienen conductividades eléctricas débiles a moderadas. La C.E. tiene una leve relación inversa con la altura, especialmente en las muestras del Sky el Arpa (Figura 4.5a).

El total de sólidos disueltos (TDS), sin tomar en cuenta las muestras de lluvia, varía entre 30,8 y 457 mg/L, las cuales también corresponden a las muestras 1 y 9 respectivamente.

La temperatura de las muestras, excluyendo las de lluvia, va desde 9,5°C en la n°1 hasta 27°C medido en la muestra 4. Las temperaturas de las aguas de lluvia corresponden a las temperaturas en el momento en que fueron retiradas de los recolectores, y no representan la temperatura real. No se aprecia alguna relación general con la altura, pero los datos de la zona sur del Sky el Arpa muestran una relación directa entre la temperatura y la altura (Figura 4.5b).

Excluyendo las muestras de agua de lluvia, el pH medido tiene un carácter predominantemente ácido. De las muestras analizadas, 7 presentan un pH inferior a 7. La muestra más ácida es la n°6, con un pH de 3,86, y la de mayor pH (7,27), es la muestra n°1. No se aprecia alguna relación entre altura y pH, pero es posible diferenciar dos rangos de pH, el primero, ácido, entre 3 y 6 con las muestras 3, 5, 6, 7 y 9, y el otro, levemente ácido a neutro, con pH entre 6 y 8, con las muestras 1, 2, 4 y 8 (Figura 4.5c).

Este primer rango no cumple los límites permitidos de pH para aguas destinadas a consumo humano según el decreto 735 (2010) emitido por el Ministerio de Salud, ni para la norma chilena oficial de agua potable (2005) emitida por el Instituto Nacional de Normalización (INN).

En cuanto al potencial redox (Eh), sin considerar las muestras de agua de lluvia, toma valores entre 117,9 y 434,8 mV en las muestras n°1 y n°6 respectivamente. No hay relación entre la altura y el Eh, pero hay dos rangos de este último, entre 100 y 200 mV con las muestras 1, 2, 4 y 8, y el otro con valores entre 300 y 450 mV con las muestras 3, 5, 6, 7 y 9 (Figura 4.5d).

La dureza, excluyendo las aguas de lluvia, toma valores entre 19,5 y 292 mg/L de  $\text{CaCO}_3$  en las muestras 1 y 9 respectivamente, siendo en general aguas duras. Hay una relación inversa entre altura y dureza (Figura 4.5e).

Y la alcalinidad, sin considerar las muestras de lluvia, varía entre 0 y 57,5 ppm  $\text{CaCO}_3$ . En la zona de estudio las aguas tienen una alcalinidad baja. No hay relación alguna con la altura (Figura 4.5f).

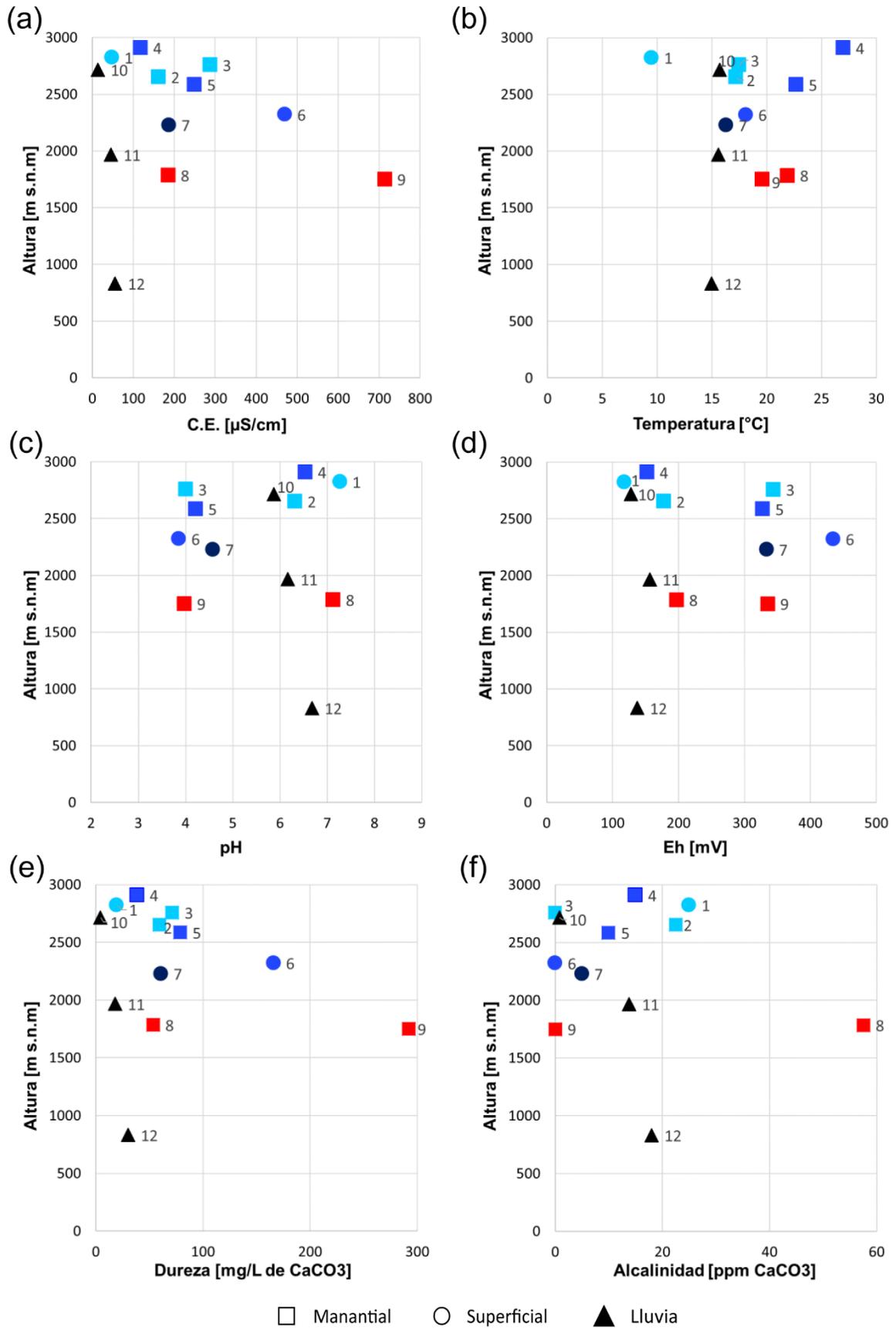


Figura 4.5 Gráficos de parámetros fisicoquímicos versus altura.

#### 4.1.2. Elementos mayores, menores y traza

Los datos de elementos mayores se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2 Cantidades de los elementos mayores en ppm y sus valores máximos, mínimos, mediana y promedio. \*No se consideran las muestras de lluvia para estos cálculos.

Id	Fuente	Zona	Cl <sup>-</sup> ppm	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ppm	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ppm	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ppm	F <sup>-</sup> ppm	Br <sup>-</sup> ppm	Na <sup>+</sup> ppm	K <sup>+</sup> ppm	Ca <sup>2+</sup> ppm	Mg <sup>2+</sup> ppm	SiO <sub>2</sub> ppm
1	Superficial	SA1	0,1	7,2	30,5	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	6,2	1,0	10,5
2	Manantial	SA1	2,2	58,7	27,5	0,8	0,1	0,0	6,0	1,5	11,0	7,8	57,4
3	Manantial	SA1	1,7	126,2	0,0	0,1	0,2	0,0	7,2	2,5	19,4	5,6	58,0
4	Manantial	SA2	3,4	38,2	18,3	2,3	0,1	0,0	2,9	2,9	12,8	1,7	22,4
5	Manantial	SA2	4,1	107,9	12,2	1,2	0,2	0,0	8,1	4,8	21,5	6,1	49,5
6	Superficial	SA2	1,1	217,5	0,0	0,1	0,4	0,0	17,7	1,9	41,0	15,4	72,7
7	Superficial	SA3	0,4	79,8	6,1	0,1	0,2	0,0	6,0	1,1	15,4	5,5	48,1
8	Manantial	MA	2,7	39,6	70,2	0,1	0,0	0,0	17,1	0,4	18,3	1,9	20,1
9	Manantial	MA	2,0	359,8	0,0	0,1	0,3	0,0	20,2	1,2	76,6	24,6	81,6
10	Lluvia	SA1	1,0	0,7	1,0	1,6	0,0	0,0	0,3	0,7	1,8	0,0	0,1
11	Lluvia	MA	0,5	2,1	16,9	0,1	0,7	0,0	0,5	1,2	6,9	0,2	0,3
12	Lluvia	SE	0,6	3,4	22,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,6	11,8	0,2	1,5
Máximo*			4,1	359,8	70,2	2,3	0,4	0,0	20,2	4,8	76,6	24,6	81,6
Mínimo*			0,1	7,2	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	6,2	1,0	10,5
Mediana*			2,0	79,8	12,2	0,1	0,2	0,0	7,2	1,5	18,3	5,6	49,5
Promedio*			2,0	115,0	18,3	0,5	0,2	0,0	9,5	1,8	24,7	7,7	46,7

En cuanto a los aniones, el contenido de Cl<sup>-</sup> en las aguas es bajo, varía entre 0,1 y 4,1 ppm en las muestras 1 y 5 respectivamente. La cantidad de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> en las muestras, exceptuando las de lluvia, toma valores desde 7,2 ppm en la muestra 1 hasta 359,8 ppm en la n°9. El HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, sin considerar las aguas de lluvia, está en un rango entre 0 ppm, en las muestras 3, 6 y 9, hasta 70,2 ppm en la muestra 8. La cantidad de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en las muestras es bajo, en las muestras 1, 3, 6, 7, 8, 9 es inferior a 0,1 ppm y alcanza un máximo de 2,3 ppm en la muestra 4. El F<sup>-</sup>, exceptuando las aguas de lluvia, se encuentra en cantidades bajas que van desde 0 ppm en las muestras 1 y 8, hasta 0,4 ppm en la muestra 6. El Br<sup>-</sup> se encuentra en cantidades inferiores al límite de detección de 0,03 ppm.

Las cantidades de Na<sup>+</sup> varían entre 0,1 y 20,2 ppm en las muestras 1 y 9 respectivamente. El contenido de K<sup>+</sup> toma valores entre 0 ppm en la muestra 1 y 4,8 ppm en la muestra 5. El Ca<sup>2+</sup> en las aguas, exceptuando las muestras de lluvia, va desde 6,2 ppm en la muestra 1 hasta 76,6 ppm en la muestra 9. El contenido de Mg<sup>2+</sup> en las muestras, sin considerar las aguas de lluvia, está en un rango de 1 a 24,6 ppm en las muestras 1 y 9 respectivamente.

El SiO<sub>2</sub>, excluyendo las muestras de lluvia, varía entre 10,5 ppm en la muestra 1 y 81,6 ppm en la muestra 9.

Con los datos de los aniones y cationes anteriores se obtuvo el balance iónico (Tabla 3).

*Tabla 3 Balance iónico y conductividad eléctrica.*

<b>Id</b>	<b>Fuente</b>	<b>Zona</b>	<b>% Error (Abs)</b>	<b>C.E. (<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>)</b>
1	Superficial	SA1	24,7	48,1
2	Manantial	SA1	8,1	161,9
3	Manantial	SA1	19,7	288,0
4	Manantial	SA2	11,6	118,2
5	Manantial	SA2	11,7	250,0
6	Superficial	SA2	5,1	470,0
7	Superficial	SA3	8,5	187,2
8	Manantial	MA	6,1	185,6
9	Manantial	MA	5,7	714,0
10	Lluvia	SA1	16,9	14,1
11	Lluvia	MA	5,1	45,4
12	Lluvia	SE	16,3	56,1

Los errores son admisibles para todas las muestras exceptuando las n°3 y n°5, según los valores de conductividad eléctrica (Tabla 4). Esto se debe a que en estas muestras hay cantidades importantes de otros elementos, como aluminio, hierro, manganeso, entre otros, que no se consideran en el cálculo del error.

*Tabla 4 Error aceptable en balance iónico según la conductividad eléctrica (Custodio & Llamas, 1976).*

<b>C.E. (<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>)</b>	<b>error admisible (%)</b>
50	30
200	10
500	8
>2000	4

En la zona de estudio, las muestras 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 9 son sulfatadas cálcicas, las muestras 1, 8, 11 y 12 son bicarbonatadas cálcicas y, la muestra 10 es clorurada cálcica (Figura 4.6).

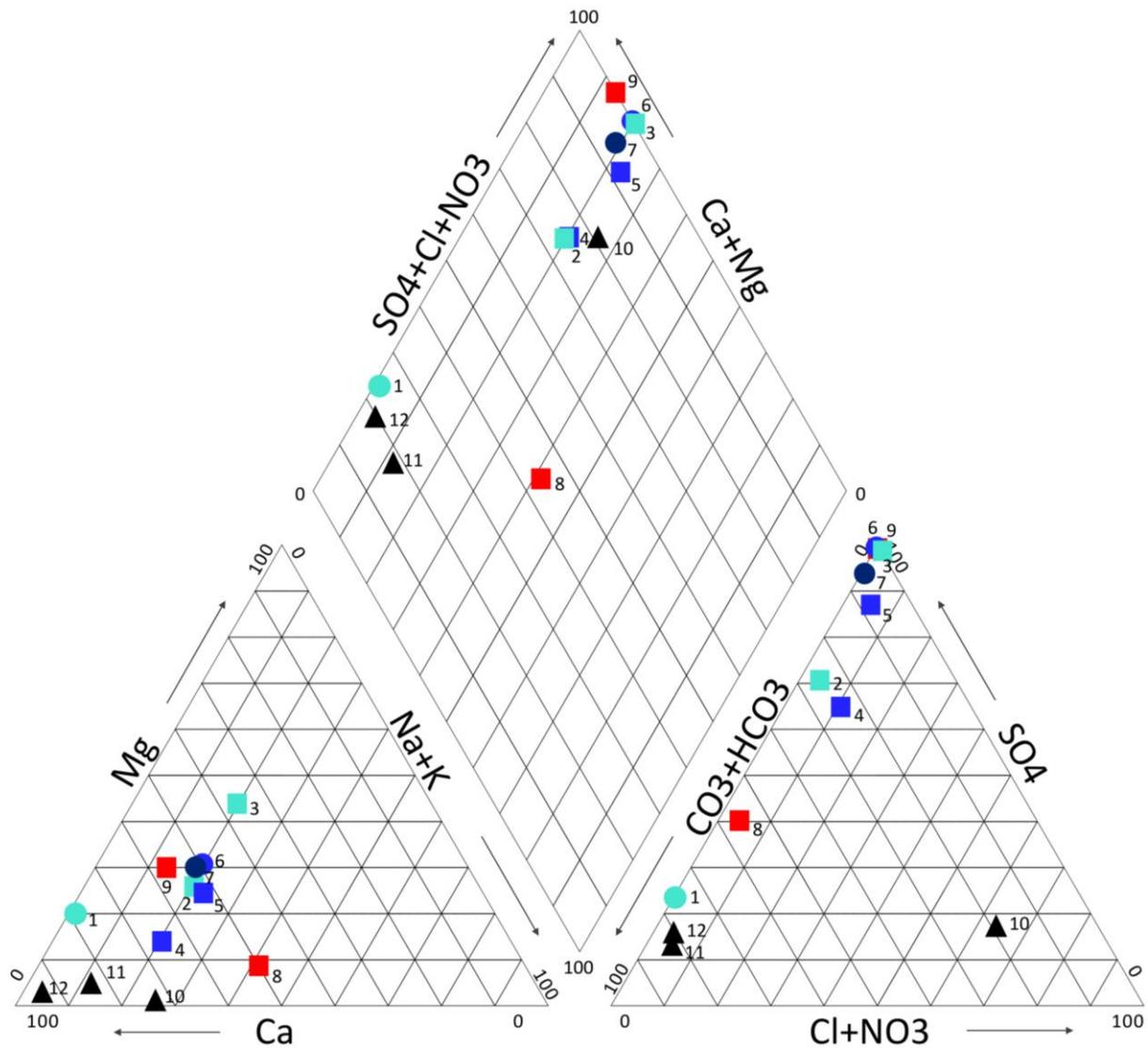


Figura 4.6 Diagrama de Piper. Los círculos son muestras de aguas superficiales, los cuadrados los de manantiales y los triángulos son aguas de lluvia, los colores hacen referencia al sector de donde fueron tomadas.

Los datos de elementos menores y trazas se presentan en las Tabla 5, Tabla 6 y Tabla 7.

Tabla 5 Cantidades de elementos menores y traza en ppb, sus valores máximos, mínimos, mediana y promedio, parte 1. \*No se consideran las muestras de lluvia para estos cálculos.

<b>Id</b>	<b>Fuente</b>	<b>Zona</b>	<b><sup>6</sup>Li ppb</b>	<b><sup>9</sup>Be ppb</b>	<b><sup>10</sup>B ppb</b>	<b><sup>27</sup>Al ppb</b>	<b><sup>51</sup>V ppb</b>	<b>Fe ppb</b>	<b><sup>55</sup>Mn ppb</b>	<b><sup>59</sup>Co ppb</b>
1	Superficial	SA1	0,0	0,0	2,2	8,0	0,2	1,0	0,0	17,0
2	Manantial	SA1	1,0	0,0	7,5	6,8	0,9	1,0	7,8	0,2
3	Manantial	SA1	14,0	0,2	20,8	4223,0	0,4	7003,2	185,5	10,9
4	Manantial	SA2	1,4	0,0	64,8	4,6	0,2	1,0	1,3	0,0
5	Manantial	SA2	6,4	0,2	33,0	2141,4	0,2	1,0	253,2	11,2
6	Superficial	SA2	13,2	0,3	29,6	3591,5	0,2	69,1	574,9	21,0
7	Superficial	SA3	9,4	0,2	14,9	1222,4	0,2	154,5	166,6	9,0
8	Manantial	MA	2,3	0,0	186,7	10,0	0,3	28,9	0,0	0,1
9	Manantial	MA	31,0	0,0	44,8	6349,3	0,9	2248,0	1098,4	0,1
10	Lluvia	SA1	0,0	0,0	0,1	42,0	0,2	1,0	13,4	0,2
11	Lluvia	MA	0,5	0,0	24,3	42,4	0,1	1,0	78,1	0,9
12	Lluvia	SE	0,0	0,0	6,7	38,7	0,4	1,0	7,8	0,1
Máximo*			31,0	0,3	186,7	6349,3	0,9	7003,2	1098,4	21,0
Mínimo*			0,0	0,0	2,2	4,6	0,2	1,0	0,0	0,0
Mediana*			6,4	0,0	29,6	1222,4	0,2	28,9	166,6	9,0
Promedio*			8,8	0,1	44,9	1950,8	0,4	1056,4	254,2	7,7

Tabla 6 Cantidades de elementos menores y traza en ppb, sus valores máximos, mínimos, mediana y promedio, parte 2. \*No se consideran las muestras de lluvia para estos cálculos.

<b>Id</b>	<b>Fuente</b>	<b>Zona</b>	<b><sup>60</sup>Ni ppb</b>	<b><sup>63</sup>Cu ppb</b>	<b><sup>66</sup>Zn ppb</b>	<b><sup>72</sup>Ge ppb</b>	<b><sup>75</sup>As ppb</b>	<b><sup>82</sup>Se ppb</b>	<b><sup>85</sup>Rb ppb</b>	<b><sup>88</sup>Sr ppb</b>
1	Superficial	SA1	16,48	13,31	85,14	0,32	0,02	0,90	5,21	149,35
2	Manantial	SA1	1,13	4,98	12,14	0,00	0,72	14,55	2,37	55,91
3	Manantial	SA1	7,70	2,57	58,09	2,12	0,57	0,08	3,75	86,23
4	Manantial	SA2	1,53	0,77	12,92	0,00	0,16	0,08	0,86	40,11
5	Manantial	SA2	13,31	8,03	78,99	0,06	0,14	1,31	2,50	97,36
6	Superficial	SA2	23,34	9,80	117,56	0,12	0,02	0,76	4,36	150,40
7	Superficial	SA3	8,79	9,67	81,59	0,08	0,02	0,08	4,47	84,98
8	Manantial	MA	1,49	0,46	9,33	0,05	3,29	0,08	0,20	118,91
9	Manantial	MA	1,43	73,93	8,36	0,00	2,61	0,08	0,56	131,51
10	Lluvia	SA1	2,49	2,76	149,92	0,00	0,21	0,08	0,77	3,66
11	Lluvia	MA	0,87	4,05	49,92	0,00	1,73	0,08	0,53	11,36
12	Lluvia	SE	0,73	17,81	38,08	0,00	1,03	0,08	0,37	19,27
Máximo*			23,34	73,93	117,56	2,12	3,29	14,55	5,21	150,40
Mínimo*			1,13	0,46	8,36	0,00	0,02	0,08	0,20	40,11
Mediana*			7,70	8,03	58,09	0,06	0,16	0,08	2,50	97,36
Promedio*			8,36	13,72	51,57	0,31	0,84	1,99	2,70	101,64

Tabla 7 Cantidades de elementos menores y traza en ppb, sus valores máximos, mínimos, mediana y promedio, parte 3. \*No se consideran las muestras de lluvia para estos cálculos.

Id	Fuente	Zona	<sup>91</sup> Zr ppb	<sup>98</sup> Mo ppb	<sup>111</sup> Cd ppb	<sup>120</sup> Sn ppb	<sup>133</sup> Cs ppb	<sup>137</sup> Ba ppb	<sup>206</sup> Pb ppb	<sup>238</sup> U ppb
1	Superficial	SA1	0,00	0,00	0,40	0,00	1,15	10,46	0,00	0,04
2	Manantial	SA1	0,05	0,25	0,00	0,00	0,28	2,07	0,20	0,00
3	Manantial	SA1	0,00	0,00	0,08	0,00	2,34	5,42	0,16	0,05
4	Manantial	SA2	0,00	0,24	0,00	0,00	0,80	0,87	0,00	0,00
5	Manantial	SA2	0,00	0,24	0,22	0,00	0,68	11,44	0,00	0,04
6	Superficial	SA2	0,00	0,00	0,40	0,00	0,64	14,57	0,00	0,10
7	Superficial	SA3	0,00	0,47	0,24	0,00	1,46	7,63	0,00	0,03
8	Manantial	MA	0,03	0,51	0,00	0,00	0,03	0,84	0,00	0,11
9	Manantial	MA	0,04	1,04	0,01	0,11	0,04	2,09	0,58	0,11
10	Lluvia	SA1	0,09	0,44	0,02	0,00	0,00	4,05	0,12	0,00
11	Lluvia	MA	0,16	0,00	0,00	0,00	0,04	2,32	0,31	0,01
12	Lluvia	SE	0,23	0,69	0,03	0,00	0,00	10,14	0,17	0,01
Máximo*			0,05	1,04	0,40	0,11	2,34	14,57	0,58	0,11
Mínimo*			0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,84	0,00	0,00
Mediana*			0,00	0,24	0,08	0,00	0,68	5,42	0,00	0,04
Promedio*			0,01	0,31	0,15	0,02	0,82	6,15	0,11	0,05

Los elementos berilio, vanadio, cromo, germanio, arsénico, zirconio, molibdeno, plata, cadmio, estaño, antimonio, wolframio, mercurio, plomo y uranio están ausentes en la mayoría de las muestras, y en las que sí se encuentran, las cantidades son muy bajas.

Los siguientes elementos se encuentran en bajas cantidades en las aguas superficiales y de manantiales: el litio varía de 0 hasta 31 ppb en la muestra 9, las cantidades de cobalto van desde 0 hasta 21 ppb en la muestra 6, el níquel varía en un rango de 1,1 a 23 ppb en las muestras 2 y 6 respectivamente, el selenio alcanza un máximo de 14,6 ppb en la muestra 2, el contenido de rubidio va desde 0,2 ppb en la muestra 8 hasta 5,2 ppb en la muestra 1, el cesio varía entre 0,03 y 2,3 ppb en las muestras 8 y 3 respectivamente, y la cantidad de bario está en un rango entre 0,8 ppb en la muestra 8 y 14,6 ppb en la n°6.

En cantidades moderadas se encuentran los siguientes elementos. Excluyendo las aguas de lluvia, el boro se encuentra entre 2,2 ppb en la muestra 1 y llega hasta los 186,7 ppb en la muestra 8, el contenido de cobre varía de 0,5 ppb en la muestra 8 a 74 ppb en la n°9, el zinc varía desde 8,4 hasta 118 ppb en las muestras 9 y 6 respectivamente, y la cantidad de estroncio está entre 40 ppb en la muestra 4 y 150 ppb en la n°6.

Los elementos que se encuentran en elevadas cantidades son el aluminio, que va desde 4,6 ppb en la muestra 4 hasta 6349 ppb en la muestra 9, el hierro que va desde 1

ppb y alcanza hasta 7003 ppb en la muestra 3, y el manganeso que se encuentra en un rango de 0 hasta 1098 ppb en la muestra 9.

Entre los elementos mayores destaca el sulfato por encontrarse en mayor cantidad que el resto, como se dijo anteriormente, con un máximo de 359,8 ppm.

Dentro de los elementos menores, el contenido de hierro es elevado en dos muestras, la 3 y la 9, con 7003 y 2248 ppb respectivamente, la cantidad de manganeso sobrepasa los 166 ppb en 5 de las muestras, teniendo una cantidad máxima de 1098 ppb en la muestra 9, y el selenio en la muestra 2 tiene un valor de 14,6 ppb. Estos tres elementos superan el límite máximo permitido para aguas de consumo humano (INN, 2005; Ministerio de Salud, 2010), los cuales son 300 ppb para el contenido de hierro, 100 ppb para la cantidad de manganeso y 10 ppb para el selenio.

#### 4.1.2.1. Relaciones iónicas

Se realizaron diagramas binarios entre los elementos mayoritarios y; cota topográfica, pH, potencial redox, temperatura, cantidad de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , los cuales se encuentran en el Anexo B. Así mismo, se realizaron los mismos diagramas para los elementos minoritarios, los cuales se pueden ver en el Anexo B.

Con respecto a los elementos mayoritarios, los datos indican una relación inversa entre altura y la cantidad de  $\text{SO}_4^{2-}$ , de  $\text{Ca}^{2+}$ , de  $\text{Mg}^{2+}$ , y levemente inversa con la cantidad de  $\text{Na}^+$  (Figura 4.7).

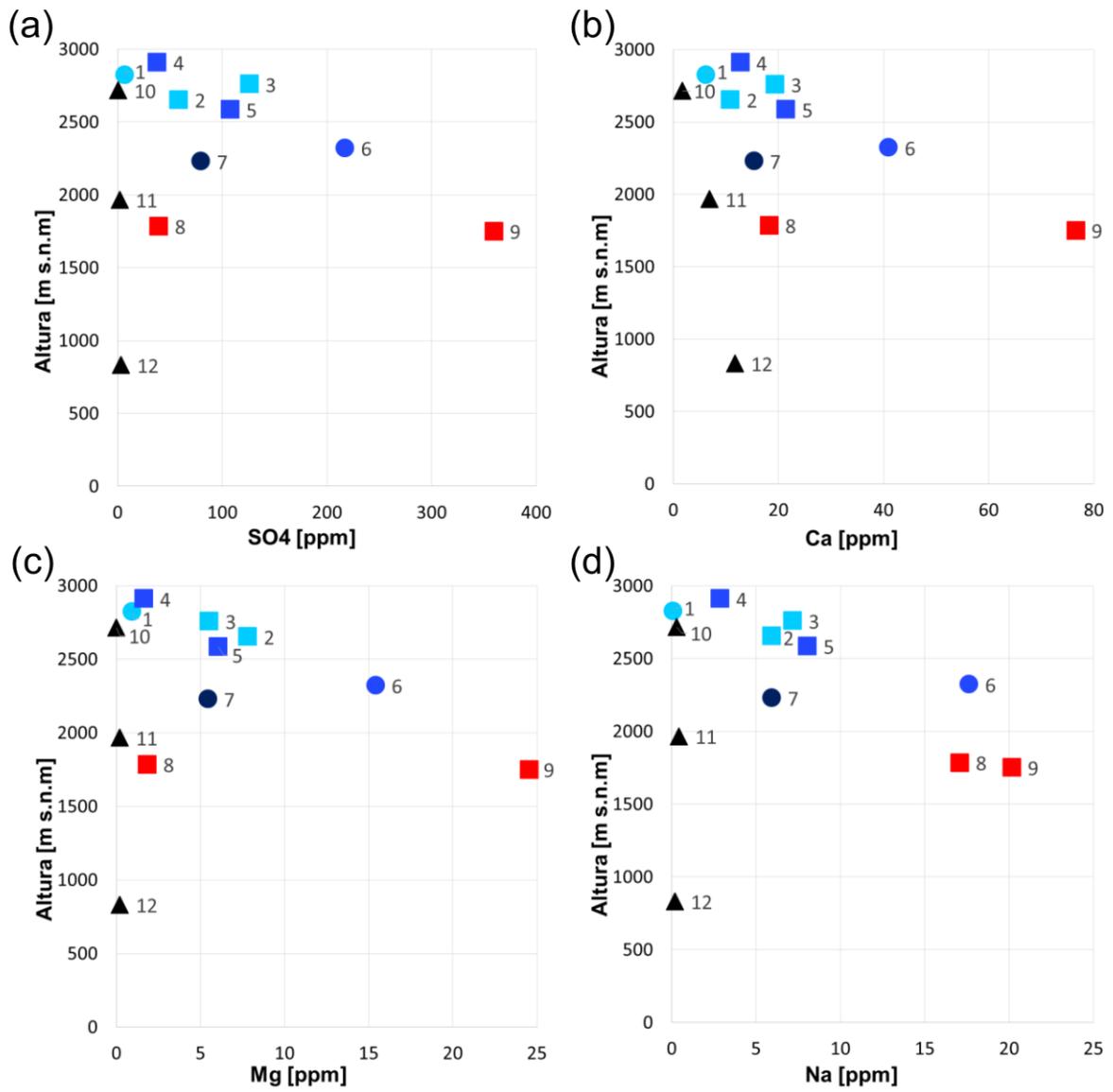


Figura 4.7 Gráficos de: (a) altura vs  $SO_4^{2-}$ , (b) altura vs  $Ca^{2+}$ , (c) altura vs  $Mg^{2+}$  y (d) altura vs  $Na^+$ .

Respecto al pH, en general, las muestras con mayores cantidades de  $SO_4^{2-}$ ,  $F^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  y  $SiO_2$  son las que tienen los pH más ácidos, al contrario, existe una correlación directa entre el pH y el  $HCO_3^-$  (Figura 4.8).

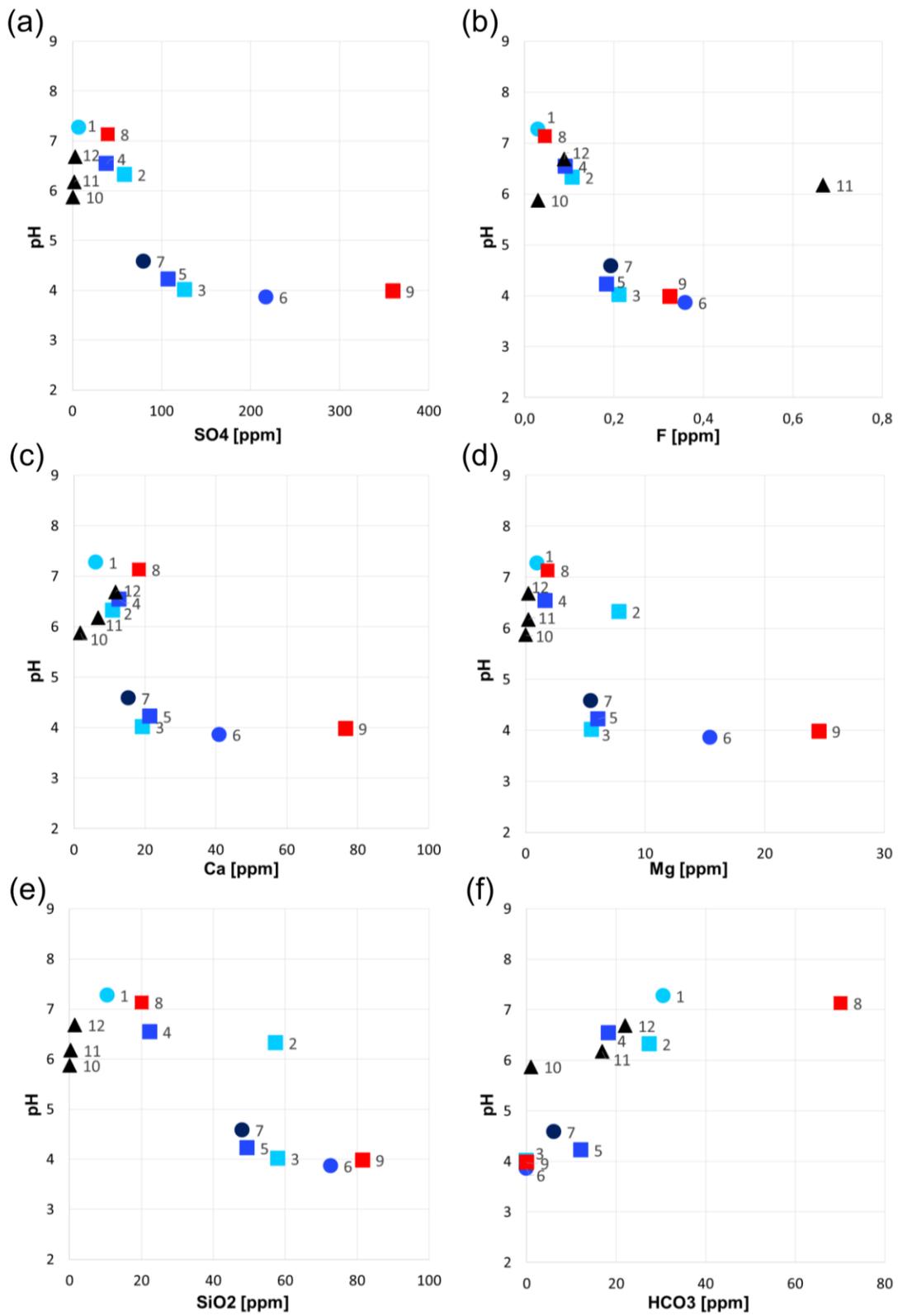


Figura 4.8 Gráficos de; (a) pH vs  $SO_4^{2-}$ , (b) pH vs F, (c) pH vs  $Ca^{2+}$ , (d) pH vs  $Mg^{2+}$ , (e) pH vs  $SiO_2$  y (f) pH vs  $HCO_3^-$

Existe una relación entre potencial redox y;  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SiO}_2$ , la cual, en general, es directa, mientras que con el  $\text{HCO}_3^-$  presenta una relación más bien inversa (Figura 4.9).

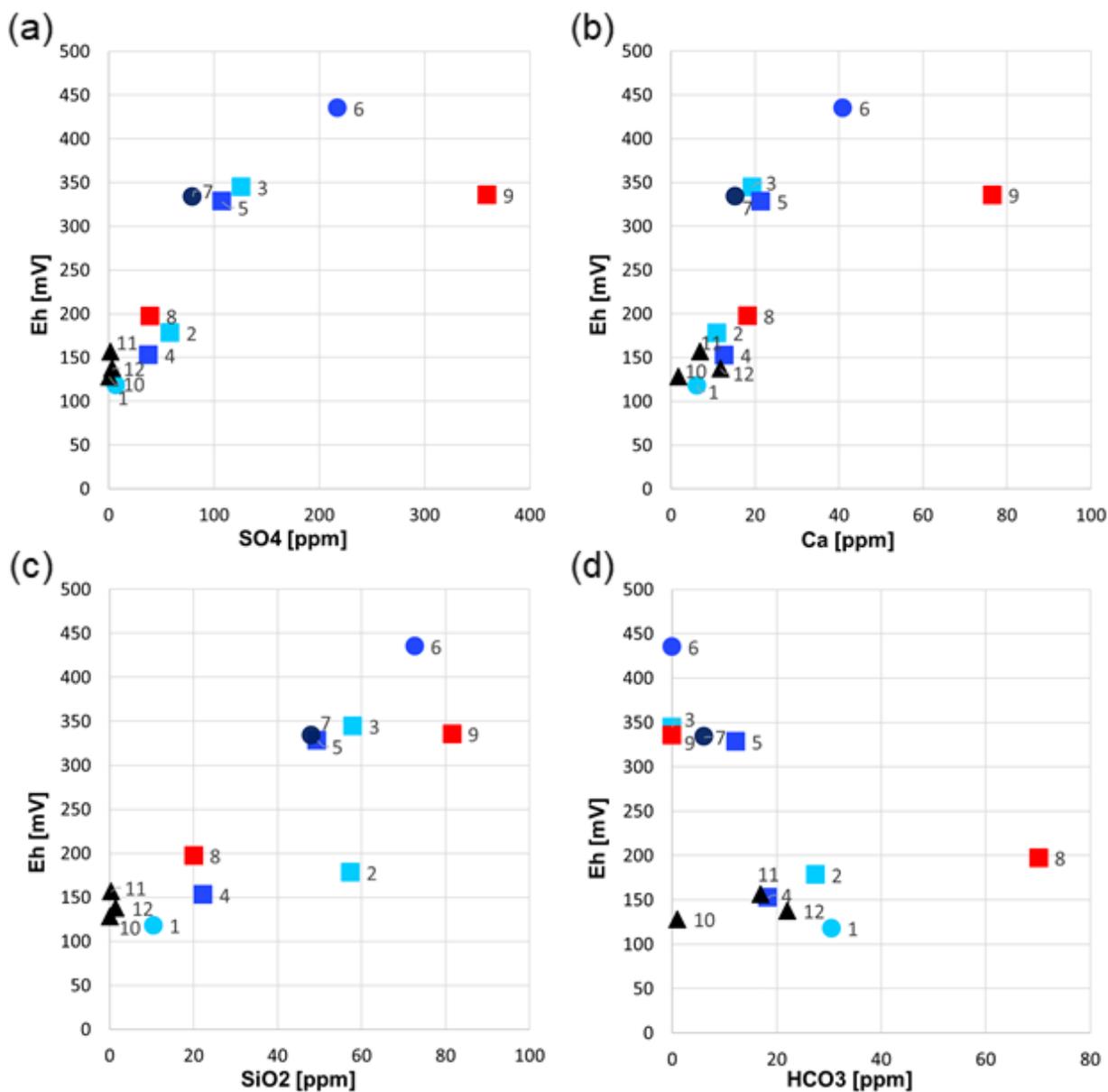


Figura 4.9 Gráficos de; (a) Eh vs  $\text{SO}_4^{2-}$ , (b) Eh vs  $\text{Ca}^{2+}$ , (c) Eh vs  $\text{SiO}_2$  y (d) Eh vs  $\text{HCO}_3^-$ .

Con respecto a la temperatura, únicamente el  $\text{Cl}^-$  está directamente relacionado (Figura 4.10), con el resto de los iones no hay relación alguna.

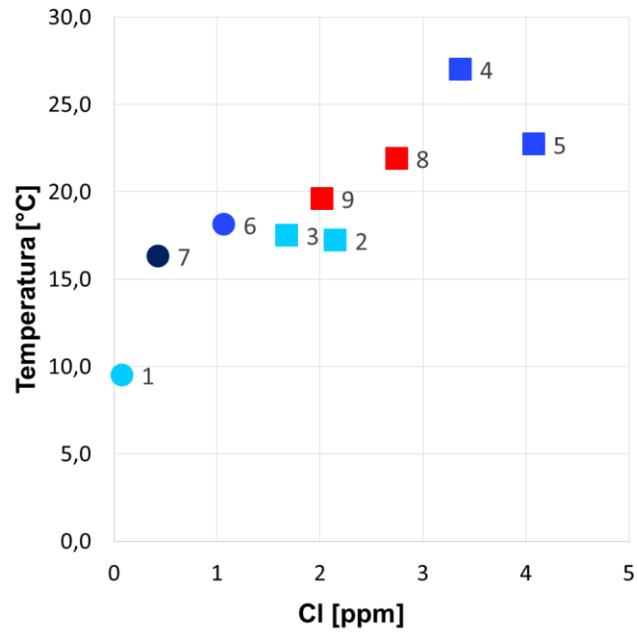


Figura 4.10 Gráfico de temperatura vs Cl. No se muestran los datos de las aguas de lluvia puesto que la temperatura medida no es la real, sino la temperatura en el momento en que se retiró la muestra del recolector.

En cuanto a la cantidad de Cl<sup>-</sup> en relación a los otros elementos mayoritarios, no se observan relaciones entre estos, por ejemplo, ni con el Ca<sup>2+</sup>, ni con el SiO<sub>2</sub> (Figura 4.11).

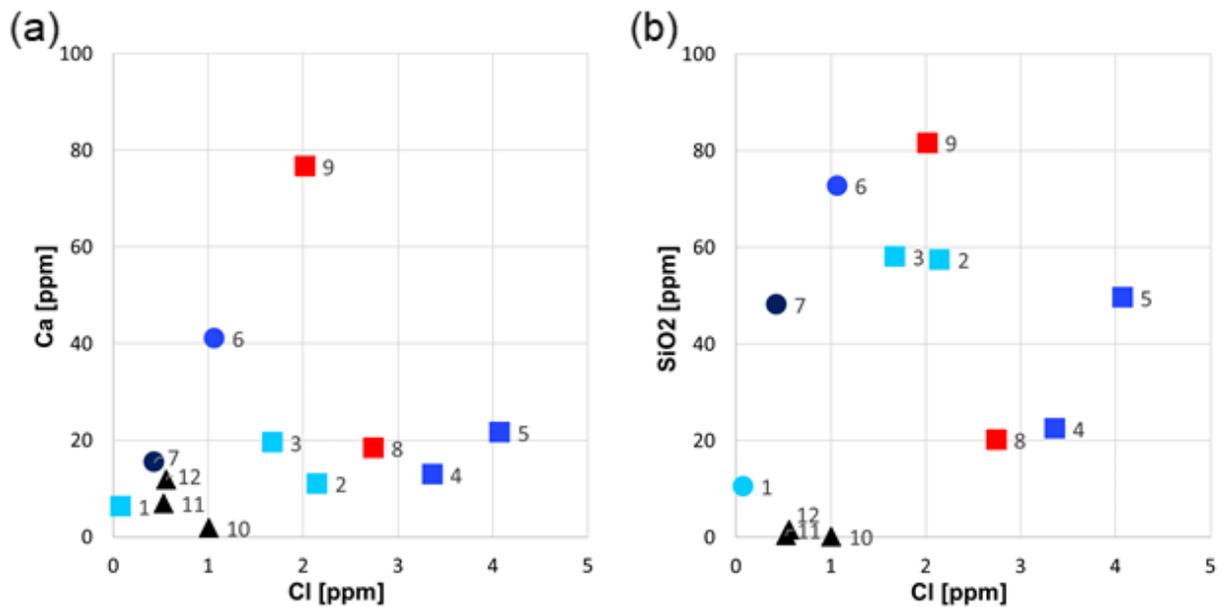


Figura 4.11 Gráficos de; (a) Cl vs Ca<sup>2+</sup> y (b) Cl vs SiO<sub>2</sub>.

En cambio, con el  $\text{SO}_4^{2-}$ , los datos indican que hay relación directa con el  $\text{Na}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{SiO}_2$  (Figura 4.12).

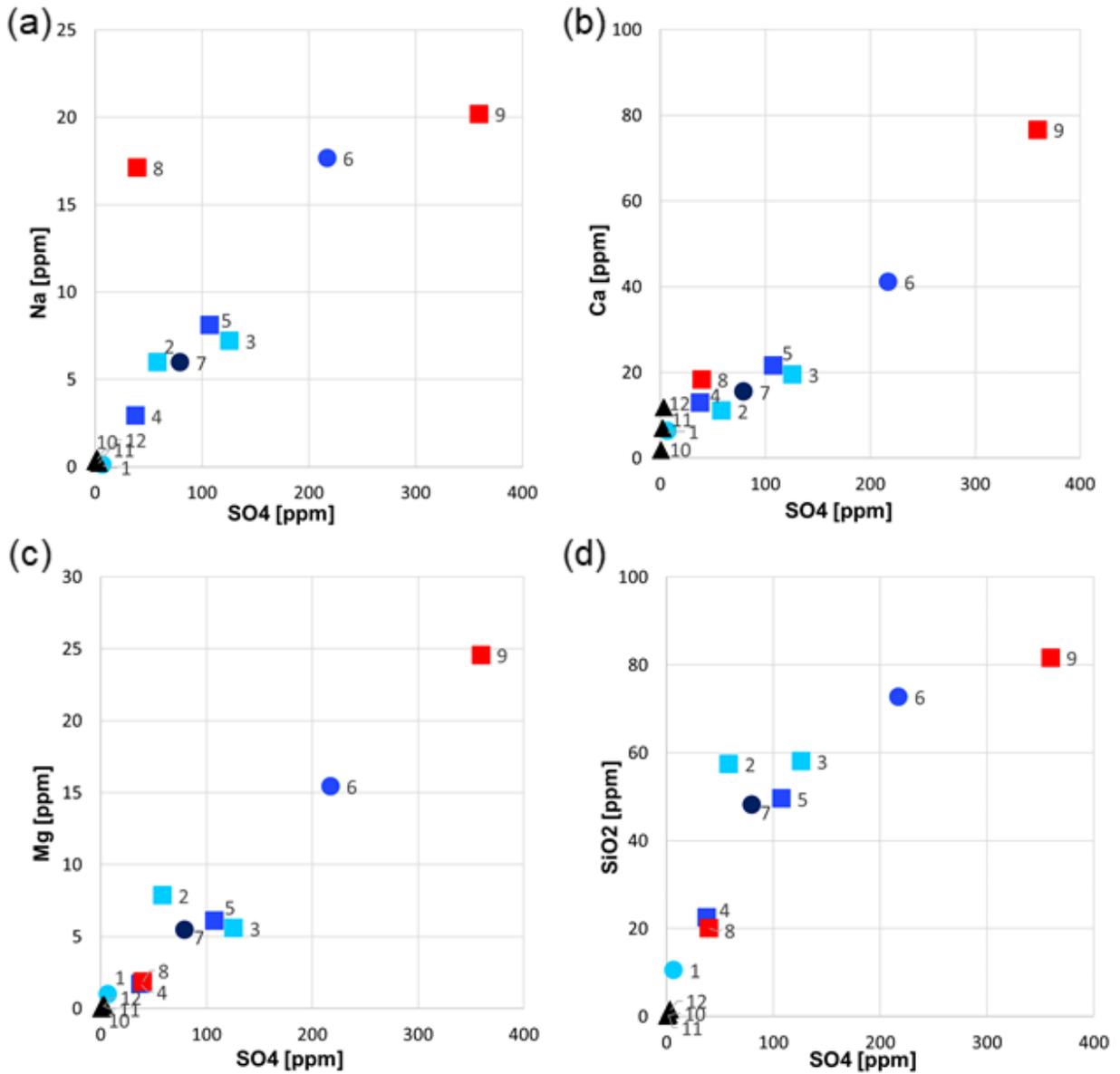


Figura 4.12 Gráficos de: (a)  $\text{SO}_4^{2-}$  vs  $\text{Na}^+$ , (b)  $\text{SO}_4^{2-}$  vs  $\text{Ca}^{2+}$ , (c)  $\text{SO}_4^{2-}$  vs  $\text{Mg}^{2+}$  y (d)  $\text{SO}_4^{2-}$  vs  $\text{SiO}_2$ .

En cuanto a los elementos minoritarios, los datos indican que sólo Li y Mn tienen una relación levemente inversa con la altura (Figura 4.13).

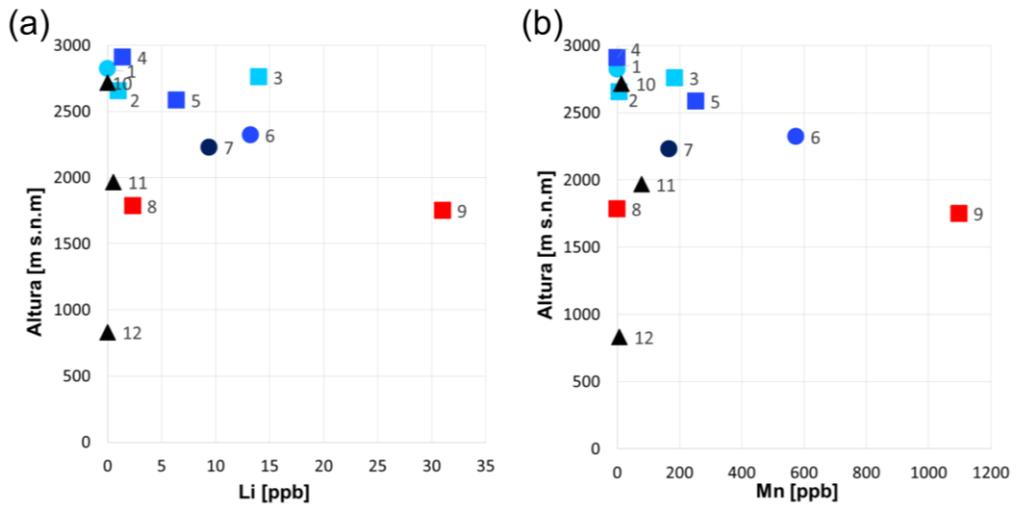


Figura 4.13 Gráficos de; (a) altura vs Li y (b) altura vs Mn.

Las muestras con los mayores contenidos de Mn, Al, Fe y Li son las que tienen los pH más bajos (Figura 4.14).

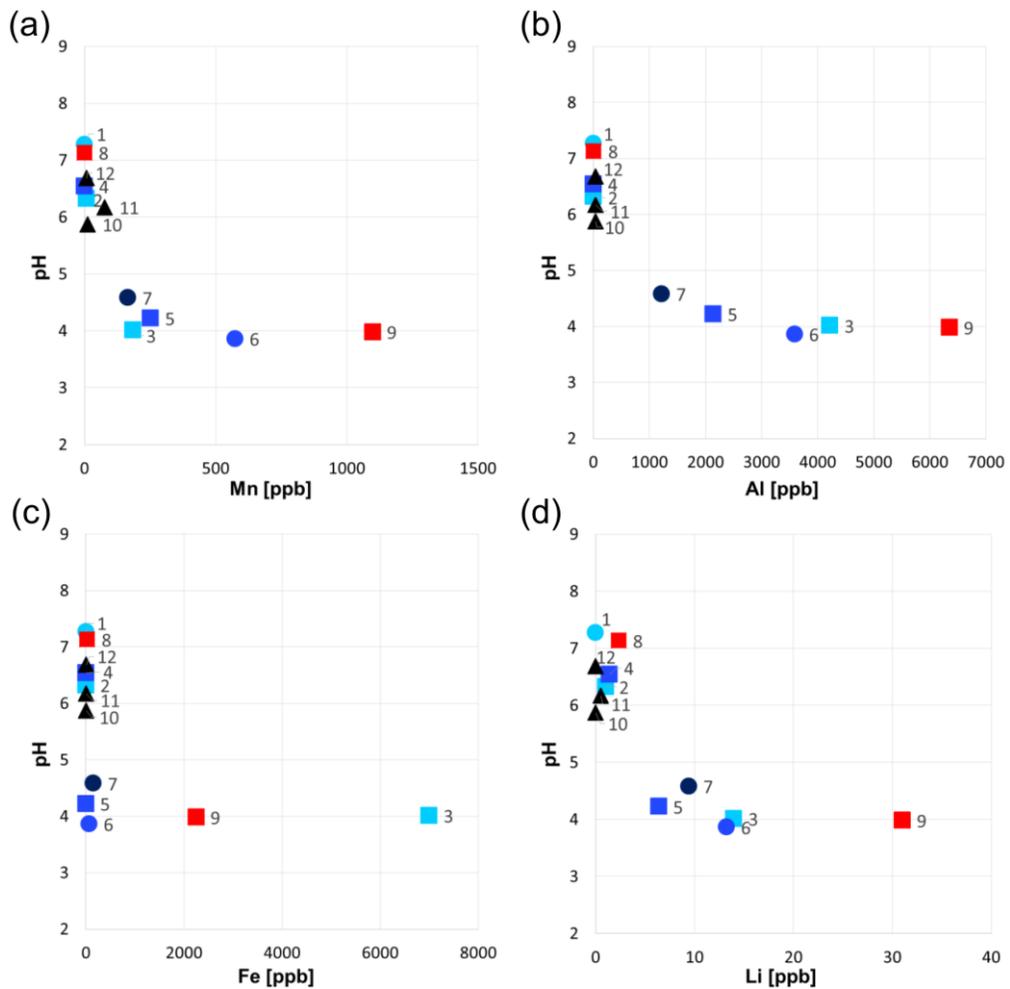


Figura 4.14 Gráficos de; (a) pH vs Mn, (b) pH vs Al, (c) pH vs Fe y (d) pH vs Li.

Los datos de temperatura y potencial redox (Eh) no muestran alguna relación clara con alguno de los elementos minoritarios.

En cuanto al Cl<sup>-</sup>, los datos indican que con el Rb tiene una leve relación inversa (Figura 4.15). Con los demás elementos menores y trazas no hay relación alguna.

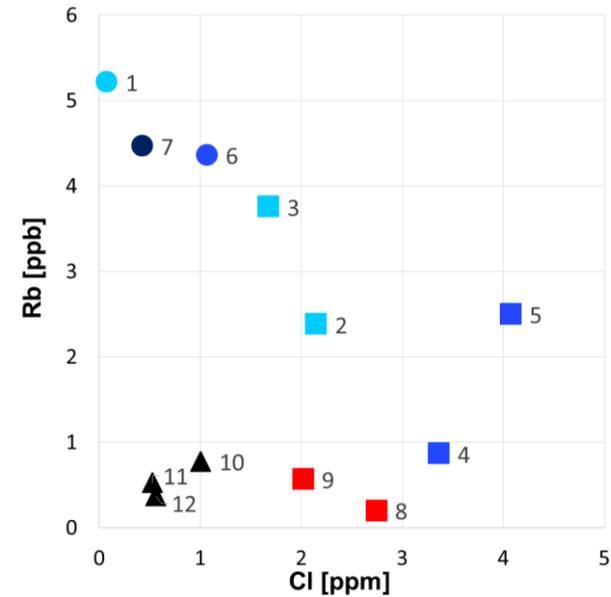


Figura 4.15 Gráfico Cl<sup>-</sup> vs Rb.

En cuanto al SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, éste tiene una relación directa con los elementos aluminio y manganeso (Figura 4.16).

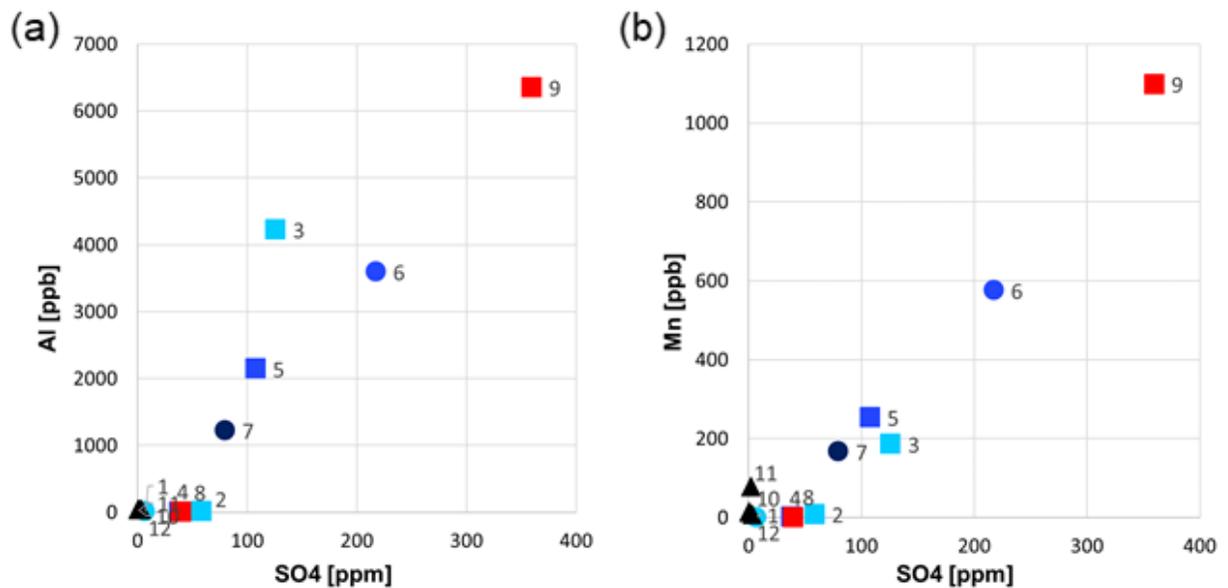


Figura 4.16 Gráficos de; (a) SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> vs Al y (b) SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> vs Mn.

### 4.1.3. Isótopos estables

Se midieron los isótopos estables del carbono, oxígeno e hidrógeno sólo para las muestras de aguas superficiales y de manantiales. El  $\delta^{13}\text{C}$  toma valores entre -13 y -5, el  $\delta^2\text{H}$  entre -98,6 y -84,6 y, el  $\delta^{18}\text{O}$  entre -12,7 y -10 (Tabla 8). Las muestras que no tienen datos del isótopo del carbono, probablemente se deba al bajo pH.

Tabla 8 Isótopos estables de carbono, oxígeno e hidrógeno.

Id	Fuente	Zona	$\delta^{13}\text{C}$ ‰(PDB)	[C] mol/Kg	$\delta\text{D}$ (VSMOW)	$\delta^{18}\text{O}$ (VSMOW)
1	Superficial	SA1	-7,969	0,00042127	-92,960	-12,479
2	Manantial	SA1	-13,084	0,00011915	-98,636	-12,537
3	Manantial	SA1	-		-96,113	-12,732
4	Manantial	SA2	-10,087	8,5853E-05	-90,198	-11,680
5	Manantial	SA2	-		-92,227	-12,448
6	Superficial	SA2	-		-93,377	-11,927
7	Superficial	SA3	-		-89,175	-12,172
8	Manantial	MA	-11,625	0,00123066	-87,479	-11,274
9	Manantial	MA	-5,048	0,00081962	-84,605	-10,075

### 4.1.4. Riesgo potencial para la salud

Según el decreto 735 (2010), emitido por el Ministerio de Salud, y la norma de agua potable (2005) del Instituto Nacional de Normalización, el pH de las muestras 2, 3, 5, 6, 7 y 9 se encuentra fuera del rango permitido para aguas destinadas a consumo humano, que es entre 6,5 y 8,5. La cantidad de hierro en las muestras 3 y 9 sobrepasan el límite máximo de 0,3 mg/l, la concentración de manganeso en las muestras 3, 5, 6, 7 y 9 sobrepasan el límite permitido de 0,1 mg/l y, el contenido de selenio en la muestra 2 es mayor al límite permitido de 0,01 mg/l.

Para el cálculo de los THQ, se consideró una frecuencia de exposición de 365 días/años, una duración de exposición de 70 años para los hombres y 76 años para las mujeres, según la esperanza de vida promedio para los nacidos entre los años 1985 y 1990 (INE, 2017), un consumo de agua de 1 litro al día, un peso promedio de 77 kg para los hombres y 67 kg para mujeres, y los valores RfD (Tabla 9) recopilados de las bases de datos de TOXNET y sus referencias.

Tabla 9 Dosis oral referencial (RfD). Valores extraídos de la base de datos de TOXNET y sus referencias.

Elemento	RfD (mg/kg * día-1)
Fe	0,7
Mn	0,14
Cu	0,04
Zn	0,3
Ni	0,02
Cd	0,001
As	0,0003
Se	0,005
Co	0,0003

Se calcularon los THQ (Tabla 10 y Tabla 11) para los elementos: hierro, manganeso, cobre, zinc, níquel, cadmio, arsénico, selenio y cobalto, para un hombre y una mujer con características físicas medias, mencionadas anteriormente, obtenidas a partir de datos estadísticos de población (Encuesta Nacional de Salud 2009 – 2010).

Tabla 10 THQ para los elementos hierro, manganeso, cobre, zinc, níquel, cadmio, arsénico, selenio y cobalto en la población de género masculino.

THQ - Hombres										
Muestra	THQ-Fe	THQ-Mn	THQ-Cu	THQ-Zn	THQ-Ni	THQ-Cd	THQ-As	THQ-Se	THQ-Co	THQ-suma
1	0,000	0,000	0,004	0,004	0,011	0,005	0,001	0,002	0,738	0,765
2	0,000	0,001	0,002	0,001	0,001	0,000	0,031	0,038	0,010	0,083
3	0,130	0,017	0,001	0,003	0,005	0,001	0,024	0,000	0,473	0,654
4	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,007	0,000	0,002	0,011
5	0,000	0,023	0,003	0,003	0,009	0,003	0,006	0,003	0,484	0,534
6	0,001	0,053	0,003	0,005	0,015	0,005	0,001	0,002	0,909	0,995
7	0,003	0,015	0,003	0,004	0,006	0,003	0,001	0,000	0,392	0,427
8	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,142	0,000	0,005	0,150
9	0,042	0,102	0,024	0,000	0,001	0,000	0,113	0,000	0,005	0,287

Tabla 11 THQ para los elementos hierro, manganeso, cobre, zinc, níquel, cadmio, arsénico, selenio y cobalto en la población de género femenino.

THQ - Mujeres										
Muestra	THQ-Fe	THQ-Mn	THQ-Cu	THQ-Zn	THQ-Ni	THQ-Cd	THQ-As	THQ-Se	THQ-Co	THQ-suma
1	0,000	0,000	0,005	0,004	0,013	0,006	0,001	0,003	0,871	0,903
2	0,000	0,001	0,002	0,001	0,001	0,000	0,037	0,045	0,012	0,097
3	0,153	0,020	0,001	0,003	0,006	0,001	0,029	0,000	0,558	0,772
4	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,008	0,000	0,002	0,013
5	0,000	0,028	0,003	0,004	0,010	0,003	0,007	0,004	0,571	0,630
6	0,002	0,063	0,004	0,006	0,018	0,006	0,001	0,002	1,072	1,174
7	0,003	0,018	0,004	0,004	0,007	0,004	0,001	0,000	0,462	0,504
8	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,168	0,000	0,006	0,177
9	0,049	0,120	0,028	0,000	0,001	0,000	0,133	0,000	0,006	0,339

Para todos los elementos analizados el THQ es inferior a 1, exceptuando el de cobalto en la muestra 6 para el caso de mujeres, con un valor de 1,07. En cuanto a la suma de los THQ, la única muestra que tiene un valor superior a 1, es la muestra 6 para el caso de mujeres, con un valor de 1,17.

Exceptuando la muestra 6, el riesgo para la salud es reducido, siendo aún menor en los hombres.

## 4.2. Mineralogía

De manera general, en el área conocida como Sky El Arpa se ha observado una mayor zona de alteración que en el área del Manchón Amarillo (Figura 4.2), como lo demuestran los colores anaranjados.

El análisis de los difractogramas se encuentra en el Anexo C y los resultados del análisis químico de las muestras en el Anexo D.

### 4.2.1. Sky el Arpa

En la zona Sky El Arpa, en el sector norte del área de estudio, se encuentran rocas, definidas como microgabro, con magnetita y pirita (Figura 4.17). La pirita corresponde aproximadamente a un 1% o menos del total de la roca, y se encuentra en forma diseminada y en vetillas de no más de 0,5 mm de ancho.

En este sector se observan más zonas de alteración rojizas que blanquecinas, masivas, sin forma. En algunas muestras presentan, grano fino (Figura 4.18a y 4.23b), en otras en bandas (Figura 4.18c), y también rellenando espacios entre rocas, con un color rojizo más oscuro y en forma de láminas, y en pátinas sobre rocas (Figura 4.18d).



Figura 4.17. Microgabro con magnetita y piritita diseminada y en vetillas, con un tamaño menor o igual a 0,5 mm de ancho.

En este sector las muestras alteradas tienen, principalmente cuarzo y muscovita y, en menor medida albita, cuprita, goethita y clinocloro. Sólo en algunas es posible encontrar caolinita e illita.

Químicamente, en las rocas de la zona, hay mayor cantidad de sulfatos y cloruros entre los aniones, mayor cantidad de hierro y calcio entre los cationes, y en los elementos traza destacan el aluminio y el manganeso.



Figura 4.18 Rocas en zona de Sky el Arpa. (a) y (b) en la zona norte, material rojizo masivo semi disgregado. (c) y (d) en la zona sur, en la primera: bandeamiento en tonos blancos y anaranjados y en la segunda, material rojo oscuro hojoso (o en forma de láminas) relleno de espacios entre rocas y también en las rocas como pátinas color rojizo oscuro.

#### 4.2.2. Manchón Amarillo

En esta zona, las rocas alteradas tienen una coloración más anaranjada (Figura 4.19a) y blanca, de forma masiva y grano fino, afectando las rocas en su totalidad. Las partes anaranjadas, parecen seguir lineamientos y/o fracturas (Figura 4.19c y 4.24d) y en otras partes tienen formas ovaladas (Figura 4.19b). Además se encuentran estructuras de boxwork (Figura 4.20).

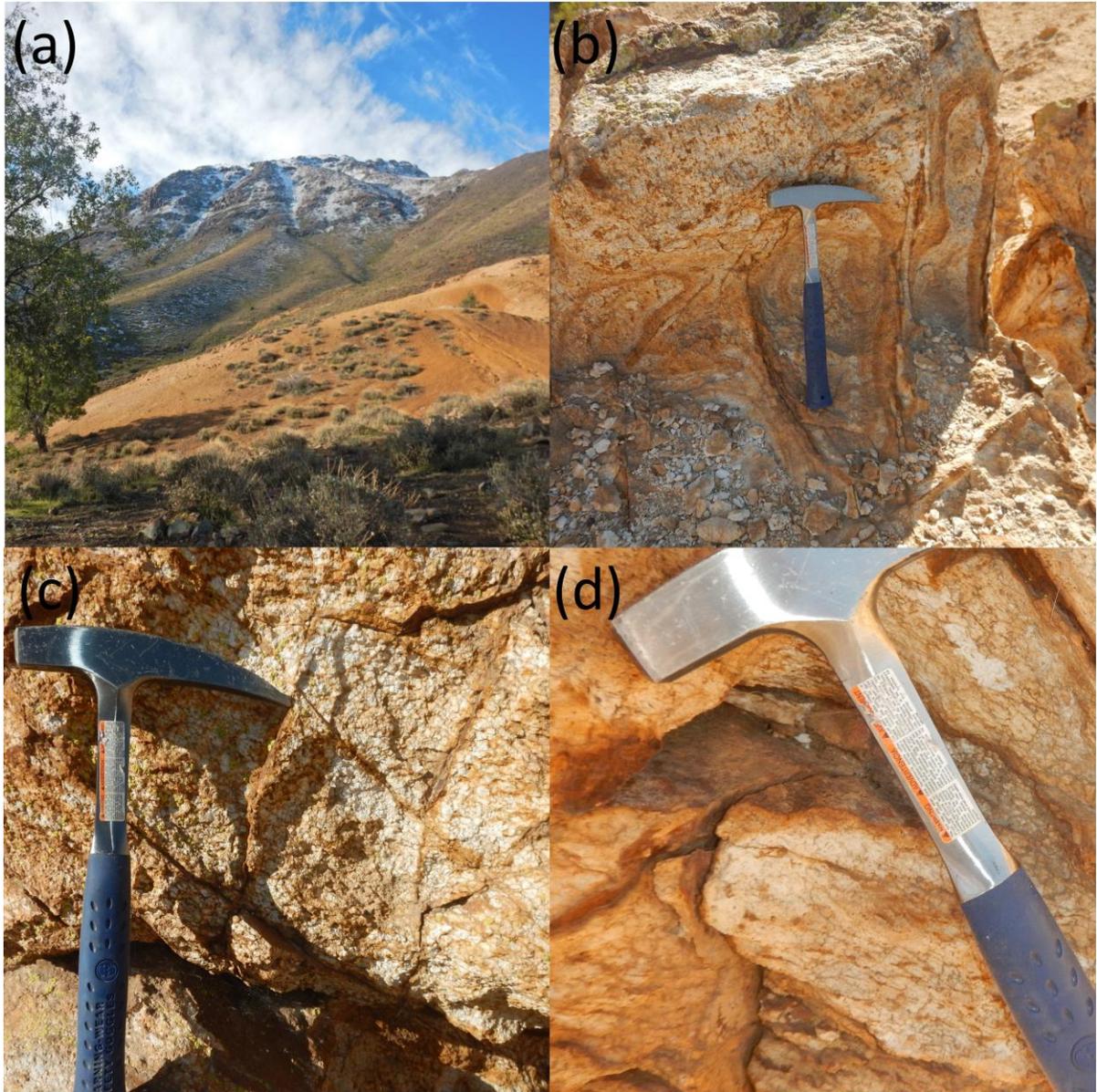


Figura 4.19 Rocas en Manchón Amarillo. (a) Foto a lo lejos de una parte de la zona donde se aprecia la coloración anaranjada. (b, (c) y (d)) Rocas alteradas, de color blanco con zonas anaranjadas.

En este estudio, boxwork se refiere a cavidades que quedan en las rocas, producto de la disolución de minerales.



*Figura 4.20 Muestra alterada totalmente a arcillas con boxwork y óxidos.*

En el sector del Manchón Amarillo las muestras presentan mayoritariamente cuarzo y albita, en menor medida muscovita y caolinita, illita, goethita, glauconita, lepidolita, halloysita, rectorita. Muy pocas presentan hematita, zinnwaldita, buergerita y birnessita.

De acuerdo a la química, las rocas alteradas tienen mayoritariamente sulfatos entre los aniones y entre los cationes principalmente hierro. En roca fresca, hay mayoritariamente cloruros, calcio y hierro. Entre los elementos traza hay principalmente manganeso y aluminio.

### **4.3. Simulaciones geoquímicas**

Se realizaron 2 modelos inversos, para reproducir las composiciones químicas de las aguas considerando la mineralogía de las rocas, que se detallan a continuación.

Para el modelo inverso 1 se utilizó como agua inicial, representativa de la recarga, la muestra de agua de lluvia del Sky el Arpa (muestra 10), para reproducir la composición química de la muestra del manantial del Manchón Amarillo (muestra 9), representativa de la interacción agua – roca, con los principales minerales identificados en las rocas. Estos han sido anortita, albita, diópsido, pirita, magnetita, goethita, hematita, caolinita, cuarzo, muscovita y pirolusita (Tabla 12). Para validar los resultados, se han considerado los datos de temperatura, pH, Eh,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , Al,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , Fe,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SiO}_2$  y Mn determinados analíticamente en las aguas.

Tabla 12 Elementos del Modelo Inverso 1.

<b>Modelo inverso 1</b>	
<b>Base de datos minteq</b>	
<b>Agua inicial</b>	Lluvia – Muestra 10 Sky el Arpa
<b>Agua final</b>	Manantial – Muestra 9 Manchón Amarillo
<b>Minerales</b>	Anortita
	Albita
	Diópsido
	Pirita
	Magnetita
	Goethita
	Hematita
	Caolinita
	Cuarzo
	Moscovita
Pirolusita	

De los minerales seleccionados, se usó anortita, albita y diópsido por ser los principales constituyentes de una lava básica promedio de la Formación Abanico (Jara, 2016), el diópsido debido a que representa un silicato de Ca y Mg, y se encuentra en la base de datos usada. Pirita, magnetita, goethita, hematita, caolinita, cuarzo y moscovita se utilizaron porque fueron encontrados en mayor cantidad en las rocas de la zona de estudio. Finalmente se consideró la pirolusita debido a que puede aportar cantidades importantes de manganeso, y es el óxido de manganeso más común (Taylor, 2011).

Como resultado, el programa arrojó 28 posibles soluciones o modelos (Anexo E). Cada uno representa posibles combinaciones de disolución y precipitación de los minerales considerados, que explican la química de la muestra 9. Estos resultados se agruparon en la Tabla 13.

Tabla 13 Resultados modelo inverso 1. Abreviaciones minerales: An = anortita, Ab = albita, Di = diópsido, Py = pirita, Mag = magnetita, Gt = goethita, Hem = hematita, Kln = caolinita, Qtz = cuarzo, Ms = muscovita y Prl = pirolusita. En naranja dis = disolución y en celeste pre = precipitación.

Modelo inverso 1											
Solución n°	Mineral										
	An	Ab	Di	Py	Mag	Gt	Hem	Kln	Qtz	Ms	Prl
1	dis	dis	dis	dis	pre	dis		pre	pre	dis	dis
2	dis	dis	dis	dis	pre	dis	pre	pre	pre	dis	dis
4	dis	dis	dis	dis	dis	pre		pre	pre		dis
7	dis	dis	dis	dis	pre			pre	pre	dis	dis
8	dis	dis	dis	dis		dis	pre	pre	pre	dis	dis
11	dis	dis	dis	dis	pre	pre	dis	pre	pre		dis
15	dis	dis	dis	dis	dis	pre			pre	pre	
16	dis	dis	dis	dis	pre	dis		pre	pre	dis	dis
17	dis	dis	dis	dis	pre		dis	pre	pre	dis	dis
19	dis	dis	dis	dis		pre	dis	pre	pre		dis
21	dis	dis	dis	dis		pre		pre	pre	dis	dis
22	dis	dis	dis	dis			pre	pre	pre	dis	dis
26	dis	dis	dis	dis	pre	pre	dis		pre	pre	
28	dis	dis	dis	dis		pre	dis		pre	pre	
3		dis	dis	dis	dis	pre		dis	pre	pre	
6		dis	dis	dis	dis	pre			pre	pre	dis
10		dis	dis	dis	pre	pre	dis	dis	pre	pre	
14		dis	dis	dis	pre	pre	dis		pre	pre	dis
18		dis	dis	dis		pre	dis	dis	pre	pre	
20		dis	dis	dis		pre	dis		pre	pre	dis
5	pre	pre	dis		dis	pre		dis		pre	pre
9	pre		dis	dis	dis	pre		dis	pre	pre	
12	pre	pre	dis			pre	dis	dis		pre	pre
13	pre	pre	dis	dis	dis	pre		dis		pre	
23	pre		dis	dis	pre	pre	dis	dis	pre	pre	
24	pre		dis	dis		pre	dis	dis	pre	pre	
25	pre	pre	dis	dis	pre	pre	dis	dis		pre	
27	pre	pre	dis	dis		pre	dis	dis		pre	

Dentro de estas soluciones o modelos, en 14 hay mayoritariamente disolución de los minerales anortita, albita, diópsido, pirita, pirolusita y muscovita, y precipitación de cuarzo, caolinita, goethita y magnetita. En 6 hay principalmente disolución de albita, diópsido, pirita, hematita, caolinita y pirolusita, y precipitación de goethita, cuarzo y muscovita. Finalmente, en 8 hay mayormente disolución de diópsido, pirita, hematita y caolinita, junto a precipitación de anortita, albita, goethita y muscovita.

En cuanto a las cantidades de moles transferidos, las mayores cantidades que se disuelven o precipitan son las de goethita, hematita y magnetita, mientras que las menores siempre son de pirolusita y muscovita (Tabla 14).

Tabla 14 Cantidades absolutas de moles transferidos en el modelo inverso 1. En naranja las que se disuelven y en celeste las que precipitan.

Modelo inverso 1											
Solución n°	Moles transferidos										
	An	Ab	Di	Py	Mag	Gt	Hem	Kln	Qtz	Ms	Prl
1	9,E-04	9,E-04	1,E-03	2,E-03	4,E+01	1,E+02		1,E-03	3,E-03	3,E-05	2,E-05
2	9,E-04	9,E-04	1,E-03	2,E-03	3,E-02	1,E+02	6,E+01	1,E-03	3,E-03	3,E-05	2,E-05
4	9,E-04	9,E-04	1,E-03	2,E-03	8,E+01	2,E+02		1,E-03	3,E-03		2,E-05
7	9,E-04	9,E-04	1,E-03	2,E-03	6,E-04			1,E-03	3,E-03	2,E-05	2,E-05
8	9,E-04	9,E-04	1,E-03	2,E-03		1,E+02	6,E+01	1,E-03	3,E-03	3,E-05	2,E-05
11	9,E-04	9,E-04	1,E-03	2,E-03	3,E-02	2,E+01	1,E+02	1,E-03	3,E-03		2,E-05
15	2,E-04	7,E-04	1,E-03	2,E-03	2,E+03	5,E+03			2,E-03	3,E-04	
16	9,E-04	9,E-04	1,E-03	2,E-03	3,E-02	8,E-02		1,E-03	3,E-03	2,E-05	2,E-05
17	9,E-04	9,E-04	1,E-03	2,E-03	3,E-02		4,E-02	1,E-03	3,E-03	2,E-05	2,E-05
19	8,E-04	9,E-04	1,E-03	2,E-03		2,E+02	1,E+02	1,E-03	3,E-03		2,E-05
21	9,E-04	9,E-04	1,E-03	2,E-03		2,E-03		1,E-03	3,E-03	2,E-05	2,E-05
22	9,E-04	9,E-04	1,E-03	2,E-03			9,E-04	1,E-03	3,E-03	2,E-05	2,E-05
26	2,E-04	7,E-04	1,E-03	2,E-03	2,E-02	5,E+03	2,E+03		2,E-03	3,E-04	
28	2,E-04	7,E-04	1,E-03	2,E-03		5,E+03	2,E+03		2,E-03	3,E-04	
3		7,E-04	1,E-03	2,E-03	2,E+03	5,E+03		2,E-04	2,E-03	3,E-04	
6		7,E-04	1,E-03	2,E-03	1,E+03	3,E+03			3,E-03	2,E-04	1,E-05
10		7,E-04	1,E-03	2,E-03	2,E-02	5,E+03	2,E+03	2,E-04	2,E-03	3,E-04	
14		7,E-04	1,E-03	2,E-03	3,E-02	3,E+03	2,E+03		3,E-03	2,E-04	1,E-05
18		7,E-04	1,E-03	2,E-03		5,E+03	2,E+03	2,E-04	2,E-03	3,E-04	
20		7,E-04	1,E-03	2,E-03		3,E+03	2,E-03		3,E-03	2,E-04	1,E-05
5	4,E-03	5,E-04	9,E-04		1,E+04	3,E+04		8,E-03		2,E-03	6,E-05
9	1,E-03		1,E-03	1,E-03	4,E+03	1,E+04		2,E-03	1,E-03	8,E-04	
12	4,E-03	5,E-04	9,E-04			4,E+04	2,E+04	8,E-03		2,E-03	2,E-05
13	2,E-03	3,E-04	9,E-04	9,E-04	6,E+03	2,E+04		4,E-03		1,E-03	
23	1,E-03		1,E-03	1,E-03	2,E-02	1,E+04	7,E+03	2,E-03	1,E-03	8,E-04	
24	1,E-03		1,E-03	1,E-03		1,E+04	7,E+03	2,E-03	1,E-03	8,E-04	
25	2,E-03	3,E-04	9,E-04	9,E-04	1,E-02	2,E+04	9,E+03	4,E-03		1,E-03	
27	2,E-03	3,E-04	9,E-04	9,E-04		2,E+04	9,E+03	4,E-03		1,E-03	
Máximo	4,E-03	9,E-04	1,E-03	2,E-03	1,E+04	4,E+04	2,E+04	8,E-03	3,E-03	2,E-03	6,E-05
Mínimo	2,E-04	3,E-04	9,E-04	9,E-04	6,E-04	2,E-03	9,E-04	2,E-04	1,E-03	2,E-05	1,E-05
Mediana	9,E-04	7,E-04	1,E-03	2,E-03	3,E-02	5,E+03	2,E+03	1,E-03	3,E-03	3,E-04	2,E-05

Para el modelo inverso 2 se utilizó como agua inicial, representativa de la recarga, una muestra de manantial del Sky el Arpa (muestra 4), para reproducir la composición química de la muestra del manantial del Manchón Amarillo (muestra 9), que representa la interacción agua – roca, y los mismos minerales; anortita, albita, diópsido, pirita, magnetita, goethita, hematita, caolinita, cuarzo, moscovita y pirolusita (Tabla 15). Para validar los resultados, se han considerado temperatura, pH, Eh, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Al, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Fe, K<sup>+</sup>, SiO<sub>2</sub> y Mn, determinados analíticamente en las aguas.

Tabla 15 Elementos del Modelo Inverso 2.

<b>Modelo inverso 2</b>	
<b>Base de datos minteq</b>	
<b>Aqua inicial</b>	Manantial – Muestra 4 Sky el Arpa
<b>Aqua final</b>	Manantial – Muestra 9 Manchón Amarillo
<b>Minerales</b>	Anortita
	Albita
	Diópsido
	Pirita
	Magnetita
	Goethita
	Hematita
	Caolinita
	Cuarzo
	Moscovita
Pirolusita	

Como resultado, el programa arrojó 28 posibles soluciones o modelos (Anexo E). Estos resultados se agruparon en la Tabla 16.

Tabla 16 Resultados modelo inverso 2. Abreviaciones minerales: An = anortita, Ab = albita, Di = diópsido, Py = pirita, Mag = magnetita, Gt = goethita, Hem = hematita, Kln = caolinita, Qtz = cuarzo, Ms = muscovita y Prl = pirolusita. En naranja dis = disolución y en celeste pre = precipitación.

Modelo inverso 2											
Solución n°	Mineral										
	An	Ab	Di	Py	Mag	Gt	Hem	Kln	Qtz	Ms	Prl
1	dis	dis	dis	dis	pre	dis		pre	pre	dis	dis
2	dis	dis	dis	dis	pre	dis	pre	pre	pre	dis	dis
4	dis	dis	dis	dis	pre	dis		pre	pre		dis
6	dis	dis	dis	dis	pre			pre	pre	pre	dis
7	dis	dis	dis	dis		dis	pre	pre	pre	dis	dis
11	dis	dis	dis	dis	pre	dis	pre	pre	pre		dis
13	dis	dis	dis	dis	pre	dis		pre	pre	pre	dis
14	dis	dis	dis	dis	pre		dis	pre	pre	pre	dis
17	dis	dis	dis	dis		dis	pre	pre	pre	pre	dis
19	dis	dis	dis	dis		pre		pre	pre	pre	dis
20	dis	dis	dis	dis			pre	pre	pre		dis
5		dis	dis	dis	dis	pre			pre	pre	dis
12	dis		dis	dis	pre	pre	dis		pre	pre	dis
18		dis	dis	dis		pre	dis		pre	pre	dis
25			dis	dis	dis	pre		dis	pre	pre	dis
27			dis	dis	pre	pre	dis	dis	pre	pre	dis
28			dis	dis		pre	dis	dis	pre	pre	dis
3	pre	pre	pre	pre	dis	pre		dis		pre	
8	pre		dis		dis	pre		dis	pre	pre	dis
9	pre	pre			dis	pre		dis	pre	pre	dis
10	pre	pre	pre	pre	dis	pre	dis	dis		pre	
15	pre		dis	dis		pre	dis	dis	pre	pre	dis
16	pre	pre	pre	pre		pre	dis	dis		pre	
21	pre		dis		dis	pre	dis	dis	pre	pre	dis
22	pre		dis			pre	dis	dis	pre	pre	dis
23	pre	pre			dis	pre	dis	dis	pre	pre	dis
24	pre	pre				pre	dis	dis	pre	pre	dis
26	pre	pre		dis		pre	dis	dis	pre	pre	dis

Dentro de estas soluciones o modelos, en 17 hay principalmente disolución de diópsido, pirita, pirolusita, anortita y albita, junto a precipitación de cuarzo, muscovita, caolinita y magnetita. En las 11 soluciones restantes hay mayormente disolución de caolinita, pirolusita, hematita y magnetita, y precipitación de anortita, goethita, muscovita, cuarzo y albita.

En cuanto a las cantidades de moles transferidos, las mayores cantidades que se disuelven o precipitan son de goethita, hematita y magnetita, mientras que las menores cantidades son de pirolusita y muscovita (Tabla 17).

Tabla 17 Cantidades absolutas de moles transferidos en el modelo inverso 2. En naranja las que se disuelven y en celeste las que precipitan.

Modelo inverso 2											
Solución n°	Moles transferidos										
	An	Ab	Di	Py	Mag	Gt	Hem	Kln	Qtz	Ms	Prl
1	9,E-04	9,E-04	1,E-03	2,E-03	4,E+01	1,E+02		1,E-03	3,E-03	3,E-05	2,E-05
2	9,E-04	9,E-04	1,E-03	2,E-03	3,E-02	1,E+02	6,E+01	1,E-03	3,E-03	3,E-05	2,E-05
4	8,E-04	8,E-04	1,E-03	2,E-03	2,E+01	7,E+01		1,E-03	3,E-03		2,E-05
6	6,E-04	8,E-04	9,E-04	2,E-03	6,E-04			8,E-04	3,E-03	5,E-05	2,E-05
7	9,E-04	9,E-04	1,E-03	2,E-03		1,E+02	6,E+01	1,E-03	3,E-03	3,E-05	2,E-05
11	8,E-04	8,E-04	1,E-03	2,E-03	3,E-02	7,E+01	3,E+01	1,E-03	3,E-03		2,E-05
13	6,E-04	8,E-04	9,E-04	2,E-03	3,E-02	8,E+02		8,E-04	3,E-03	4,E-05	2,E-05
14	6,E-04	8,E-04	9,E-04	2,E-03	3,E-02		4,E-02	8,E-04	3,E-03	5,E-05	2,E-05
17	8,E-04	8,E-04	1,E-03	2,E-03		7,E+01	3,E+01	1,E-03	3,E-03		2,E-05
19	6,E-04	8,E-04	9,E-04	2,E-03		2,E-03		8,E-04	3,E-03	5,E-05	2,E-05
20	6,E-04	8,E-04	9,E-04	2,E-03			9,E-04	8,E-04	3,E-03	5,E-05	2,E-05
5		6,E-04	1,E-03	1,E-03	4,E+01	1,E+02			3,E-03	1,E-04	2,E-05
12	6,E-04		1,E-03	1,E-03	2,E-02	1,E+02	6,E+01		3,E-03	1,E-04	2,E-05
18		6,E-04	1,E-03	1,E-03		1,E+02	6,E+01		3,E-03	1,E-04	2,E-05
25			5,E-04	1,E-03	2,E+02	5,E+02		7,E-04	2,E-03	4,E-04	2,E-05
27			5,E-04	1,E-03	2,E-02	5,E+02	2,E+02	7,E-04	2,E-03	4,E-04	2,E-05
28			5,E-04	1,E-03		5,E+02	2,E+02	7,E-04	2,E-03	4,E-04	2,E-05
3	2,E-01	9,E-02	5,E-02	1,E-01	3,E+04	8,E+04		3,E-01		6,E-02	
8	2,E-03		3,E-04		3,E+02	9,E+02		3,E-03	3,E-03	6,E-04	2,E-05
9	2,E-03	6,E-04			4,E+02	1,E+03		3,E-03	2,E-03	8,E-04	2,E-05
10	2,E-01	9,E-02	5,E-02	1,E-01	2,E+00	8,E+04	4,E+04	3,E-01		6,E-02	
15	2,E-03		3,E-04	5,E-06		9,E+02	4,E+02	3,E-03	3,E-03	6,E-04	2,E-05
16	2,E-01	9,E-02	5,E-02	1,E-01		8,E+04	4,E+04	3,E-01		6,E-02	
21	2,E-03		3,E-04		8,E-05	9,E+02	4,E+02	3,E-03	3,E-03	6,E-04	2,E-05
22	2,E-03		3,E-04			9,E+02	4,E+02	3,E-03	3,E-03	6,E-04	2,E-05
23	2,E-03	6,E-04			8,E-05	1,E+03	6,E+02	3,E-03	2,E-03	8,E-04	2,E-05
24	2,E-03	6,E-04				1,E+03	6,E+02	3,E-03	2,E-03	8,E-04	2,E-05
26	1,E-03	6,E-04		5,E-06		1,E+03	6,E+02	3,E-03	2,E-03	8,E-04	2,E-05
Máximo	2,E-01	9,E-02	5,E-02	1,E-01	3,E+04	8,E+04	4,E+04	3,E-01	3,E-03	6,E-02	2,E-05
Mínimo	6,E-04	6,E-04	3,E-04	5,E-06	8,E-05	2,E-03	9,E-04	7,E-04	2,E-03	3,E-05	2,E-05
Mediana	9,E-04	8,E-04	9,E-04	2,E-03	3,E-02	5,E+02	2,E+02	1,E-03	3,E-03	4,E-04	2,E-05

#### 4.4. Simulación de la oxidación de pirita

Se llevaron a cabo 2 simulaciones de la oxidación de pirita, para las mismas aguas iniciales de los modelos inversos.

Para el primero se utilizó el agua de lluvia (muestra 10) y que sólo interactuara con pirita, obteniendo un rápido descenso del pH (Figura 4.21), y para el segundo se modeló la interacción entre el agua del manantial 4 y pirita solamente, también mostrando un rápido descenso en el pH (Figura 4.22).

En ambos casos, toma menos de 1 día que el pH disminuya hasta los observados en los manantiales 3, 5 y 9.

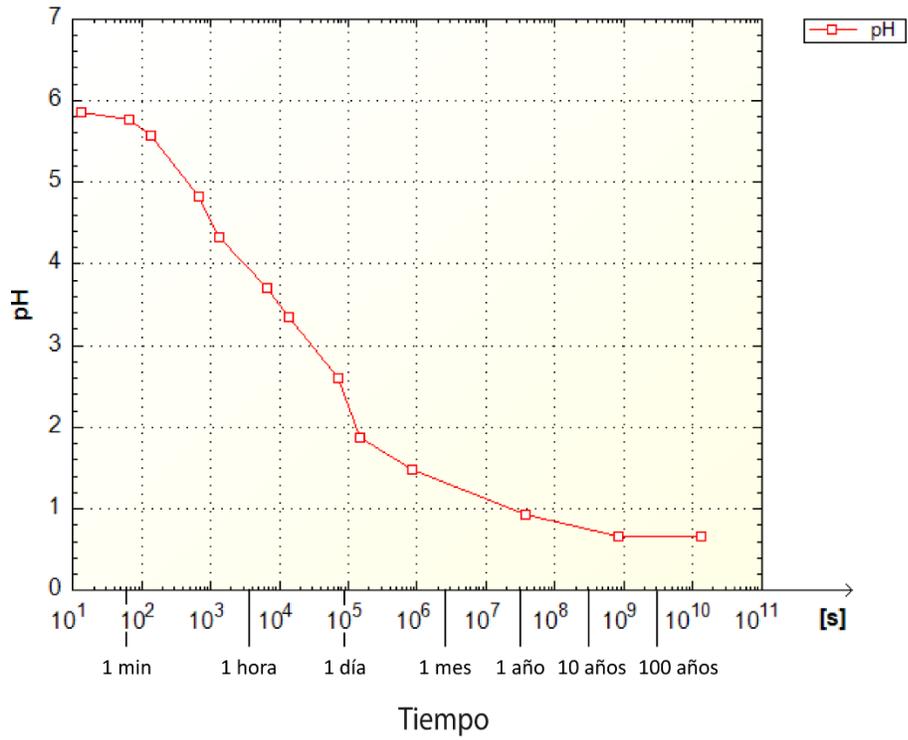


Figura 4.21 Gráfico de variación de pH en el tiempo, debido a la interacción de pirita y agua de lluvia.

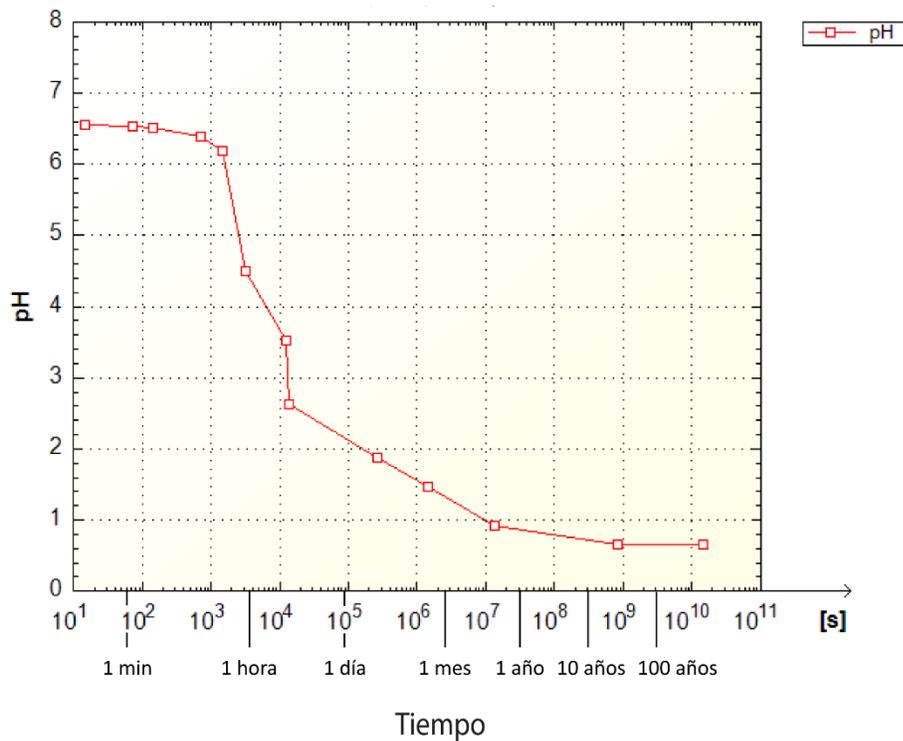


Figura 4.22 Gráfico de variación de pH en el tiempo, debido a la interacción de pirita con agua del manantial 4.

## 5. Discusiones

### 5.1. Procesos de interacción agua – roca

Los datos de conductividad eléctrica (sección 4.1.1),  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  (sección 4.1.2), muestran que las aguas se vuelven más mineralizadas aguas abajo. Además, comparadas con aguas de sectores aledaños hacia el sur, estudiadas por Taucare et al., (2018), las aguas de Campos de Ahumada, tienen conductividades eléctricas similares, pero a mayores alturas, por lo que éstas podrían tener un mayor tiempo de residencia que el resto o bien estar interactuando con rocas que tengan minerales con mayores tasas de disolución.

Usando el diagrama de Gibbs (Figura 5.1), se puede deducir que en la zona de estudio el proceso que predomina es la interacción agua – roca, es decir meteorización, hidrólisis e intercambio catiónico. La muestra 1, que es un agua superficial recolectada a gran altura, que puede estar muy influenciada por precipitaciones, se posiciona próxima al predominio de las precipitaciones.

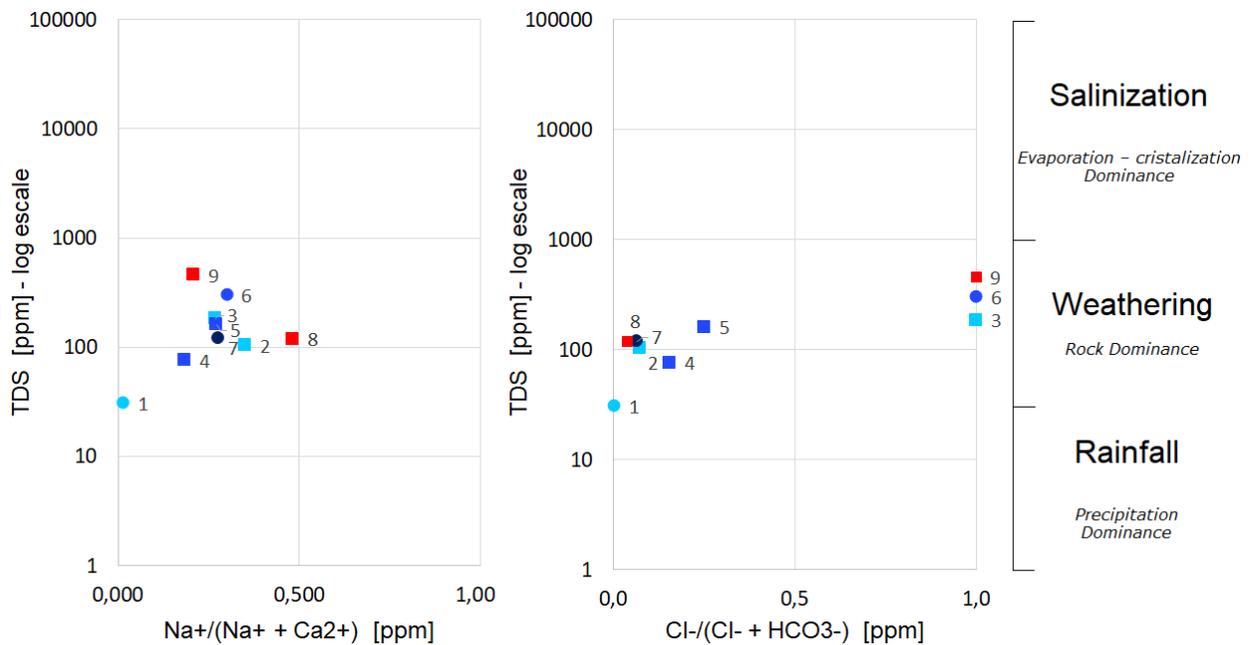


Figura 5.1 Diagrama de Gibbs. No se muestran las aguas de lluvia.

Se ha determinado que en las aguas analizadas existe una relación directa entre Ca y  $\text{SO}_4$ , prácticamente de 1:2 (Figura 5.2a), y también hay una relación directa entre Na y  $\text{SO}_4$ , con una razón más cercana a 1:4 (Figura 5.2b). En cuanto a la relación entre Ca y  $\text{SiO}_2$ , esta se acerca a 1:2, exceptuando la muestra 9 (Figura 5.3a), y entre Na y  $\text{SiO}_2$  la razón no es muy clara para todas las muestras (Figura 5.3b).

Respecto a los datos de Ca y  $\text{SO}_4$ , estos podrían indicar una disolución de yeso y/o anhidrita, pero estos minerales no se encuentran en la zona de estudio. Sin embargo, es posible que exista disolución de silicatos, ya que en la zona se encuentran principalmente rocas volcánicas. En particular, la disolución de plagioclasas, principalmente de las que tienen mayor contenido de Ca, cuya reacción, así como la hidrólisis de silicatos, se ve favorecida en un medio ácido (Mediavilla, 2014).

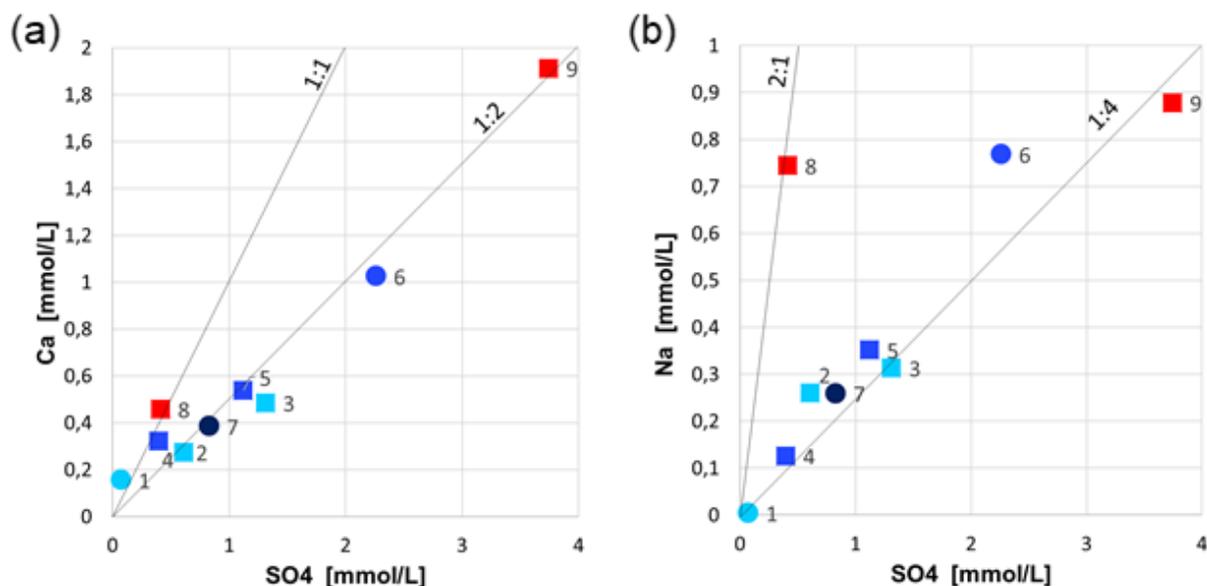


Figura 5.2. (a) Gráfico  $\text{SO}_4$  vs Ca y (b) Gráfico  $\text{SO}_4$  vs Na. No están graficados los datos de aguas de lluvia.

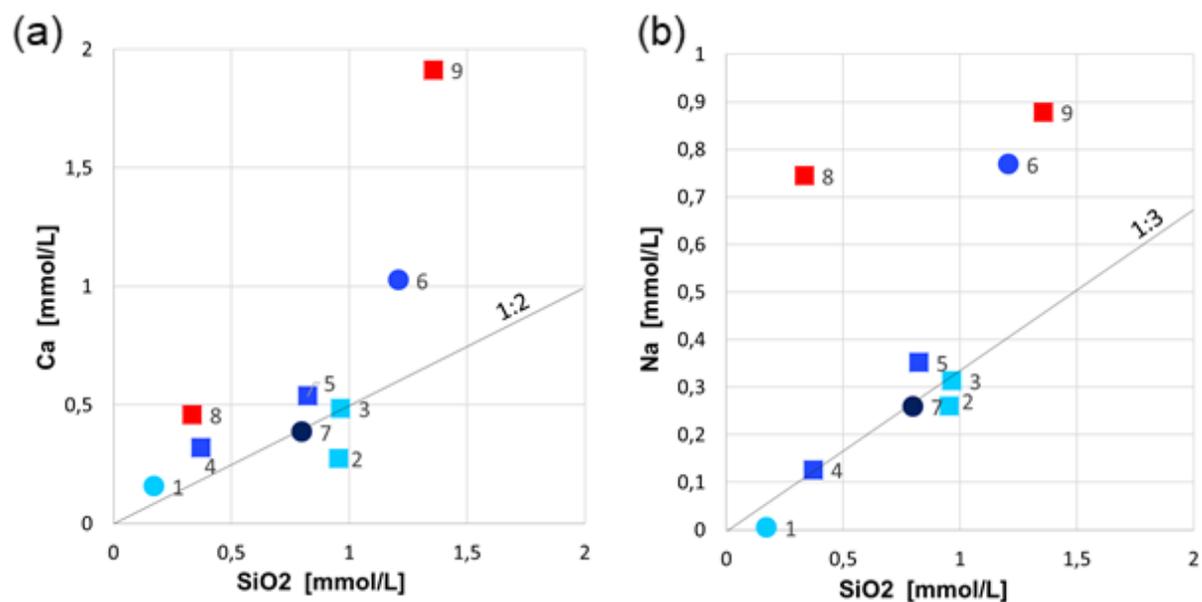
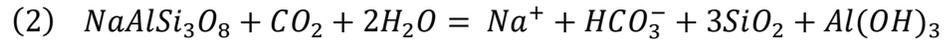
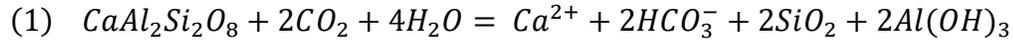
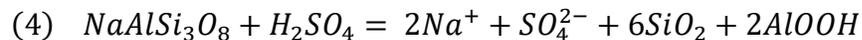


Figura 5.3 (a) Gráfico  $\text{SiO}_2$  vs Ca y (b) Gráfico  $\text{SiO}_2$  vs Na. No están graficados los datos de aguas de lluvia.

La meteorización de las plagioclasas, anortita y albita, están dadas por las fórmulas (1) y (2) respectivamente, donde se observa una relación de 1:2 entre Ca y  $\text{HCO}_3^-$  y una de 1:1 entre Na y  $\text{HCO}_3^-$ , pero estas relaciones no se cumplen en las muestras de Campos de Ahumada. Sin embargo, en general sí cumplen las relaciones de 1:2 para Ca y  $\text{SiO}_2$ , y 1:3 para Na y  $\text{SiO}_2$ .



La presencia de alteraciones mineralógicas en el área de estudio sugiere que pueda existir disolución de plagioclasas. En presencia de ácido sulfúrico, las reacciones químicas, en este caso, están dadas por las ecuaciones (3) y (4). Estas tienen una relación de 1:1 entre Ca y  $\text{SO}_4$  y una de 2:1 entre Na y  $\text{SO}_4$ , lo cual se acerca a lo mostrado en los gráficos anteriormente, mucho más para el caso de la anortita que de la albita, aunque hay un exceso de sulfato. Este exceso de sulfato puede deberse a la presencia de minerales sulfurados. Y se siguen cumpliendo las razones para Ca y  $\text{SiO}_2$  de 1:2, y de Na y  $\text{SiO}_2$  de 1:3.



Las muestras 1, 4 y 8 tienen una razón de Ca/ $\text{SO}_4$  mayor que la del resto que tiende a 1:2, por lo que se podría deducir que los primeros han tenido una menor interacción agua – roca que el resto (Figura 5.4).

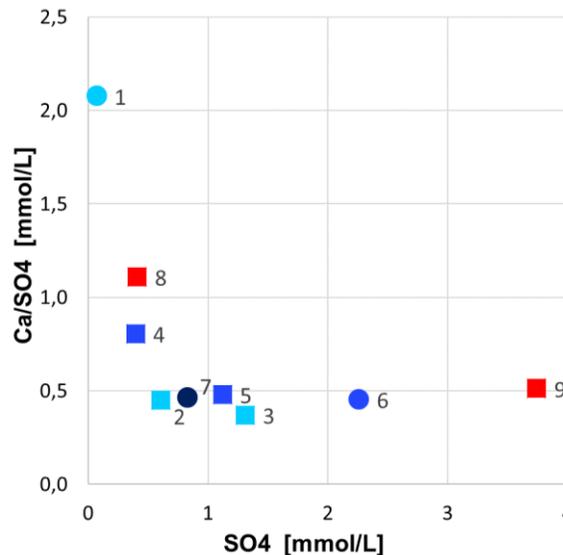


Figura 5.4 Gráfico  $\text{SO}_4$  vs  $\text{Ca}/\text{SO}_4$ . No están graficados los datos de aguas de lluvia.

## 5.2. Origen de las aguas

Las muestras del área de estudio se graficaron junto a la línea de aguas meteóricas global o GMWL, la línea de aguas meteóricas local de Chile y junto a la línea de aguas meteóricas local de Santiago, en la Figura 5.5. La GMWL se calculó como  $\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 10$  (Craig, 1961), la Chile-MWL se calculó como  $\delta D = 7,47 \cdot \delta^{18}O + 3,42$  (Sánchez-Murillo et al., 2018) y los datos para la línea de aguas meteóricas local de Santiago se obtuvieron de la Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP) del International Atomic Energy Agency (IAEA).

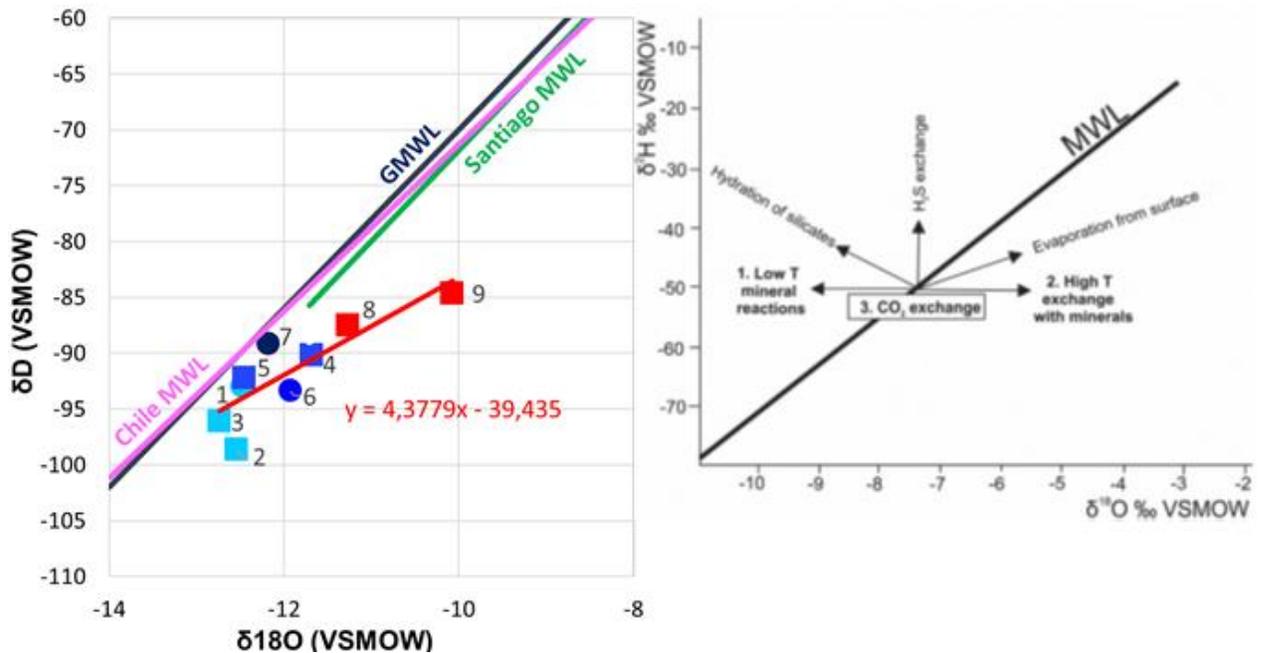


Figura 5.5 Gráfico de isótopos D vs  $^{18}O$ . A la izquierda, las muestras superficiales y de manantiales y su línea de tendencia en rojo, en verde la línea meteórica local de Santiago (Santiago-MWL), en rosado la línea meteórica de Chile (Chile-MWL) y en azul oscuro la GMWL. A la derecha los procesos naturales que afectan los valores de  $\delta^{17}O$  y  $\delta^{18}O$ , obtenido de Karolyte et al., (2017).

Las muestras de agua superficiales y de manantiales, en general se vuelven más pesadas aguas abajo. Con respecto a las líneas meteóricas global, meteórica de Chile y meteórica local de Santiago, las aguas del área de estudio se encuentran hacia la derecha. Esta tendencia se podría interpretar como una evaporación libre, aunque también podría haber otros procesos, como un intercambio de isótopos de oxígeno entre las aguas y los minerales de las rocas, en los cuales las aguas están enriquecidas en  $^{18}O$  respecto a la GMWL (Karolyte et al., 2017). Este último proceso podría ser un intercambio con sulfatos y oxihidróxidos de hierro producidos por oxidación de pirita (Spangenberg et al., 2007).

Por otra parte, los isótopos del carbono pueden provenir de 3 fuentes: CO<sub>2</sub> atmosférico, dióxido de carbono del suelo y disolución de carbonatos (Martínez et al., 2006).

Se graficaron los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  versus el carbono inorgánico total disuelto (TDIC) en la Figura 5.6, donde se comparan con curvas teóricas que representan la evolución del TDIC –  $\delta^{13}\text{C}(\text{TDIC})$  de aguas infiltrantes según 3 distintos modelos, (a) disolución del  $\text{CO}_2$  del suelo, (b) disolución del  $\text{CO}_2$  del suelo y equilibrio con calcita, y (c) influencia de  $\text{CO}_2$  y equilibrio con calcita (Fronidini et al., 2009). Las muestras analizadas muestran una señal superficial del  $^{13}\text{C}$ , principalmente vinculado a la materia orgánica y/o vegetación del suelo.

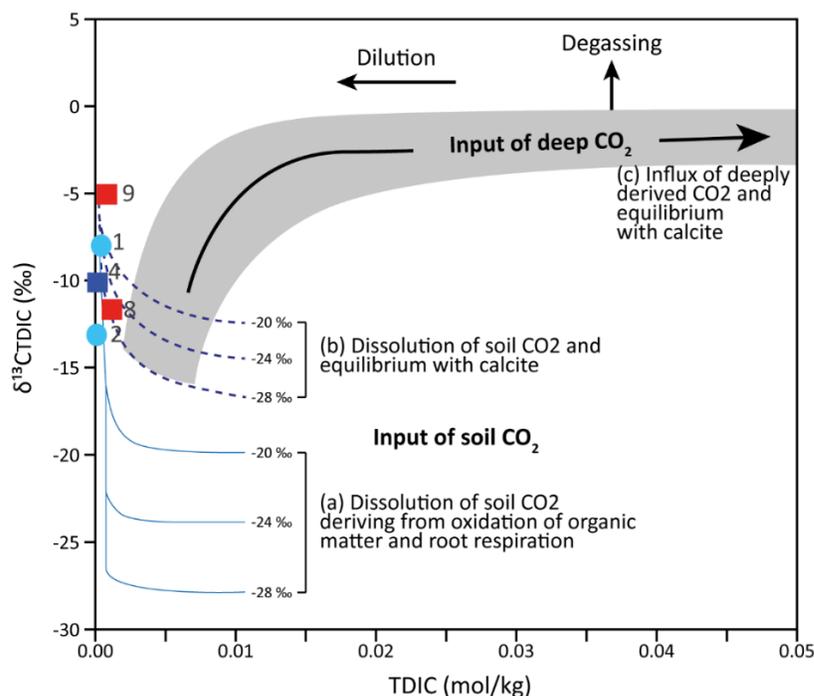


Figura 5.6 Diagrama TDIC vs  $\delta^{13}\text{C}(\text{TDIC})$ . Se han representado los datos de la zona de estudio en el gráfico de Fronidini et al., (2009).

### 5.3. Drenaje ácido natural

En el área de estudio, hay zonas con material fino en colores rojizos, más oscuros o más claros, lo que aparentemente podría ser limonita. En los resultados de difracción de rayos X se reconoce goethita y hematita, hidróxidos/óxidos de hierro y óxidos de manganeso (birnessita). Los primeros dos minerales pueden provenir de la oxidación de sulfuros de hierro, como pirita o pirrotita, así como también estar relacionados a minerales ferromagnesianos o carbonatos de hierro, tales como anfíboles, piroxenos, biotita, siderita, entre otros. Los óxidos de manganeso pueden ser producto de la alteración de minerales ricos en manganeso (Taylor, 2011). Pero en la zona de estudio no se encuentran carbonatos, ni tampoco abundantes ferromagnesianos, por lo que la oxidación de sulfuros podría ser lo que produce limonita en la zona, además de que sí se observó pirita y boxwork en el área.

Además, se encuentra una alteración de color blanco a amarillento, de material fino, y junto a los resultados de DRX, donde se reconoce cuarzo, moscovita, caolinita e illita, se interpretarían como una alteración fílica y argílica moderada y/o avanzada.

Las aguas en la zona de estudio son sulfatadas. El sulfato en las aguas se puede atribuir a distintas fuentes: actividades industriales, urbanas y agrícolas; disolución de yeso y anhidrita; oxidación de sulfuros o incluso lluvia. En la zona de estudio no hay actividades industriales ni urbanas, y las actividades agrícolas se encuentran más abajo hacia el oeste, tampoco se han encontrado yeso y/o anhidrita en la zona, por lo que su fuente podría ser oxidación de sulfuros y/o lluvia.

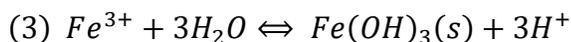
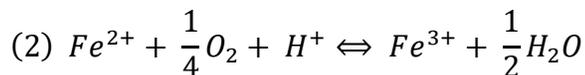
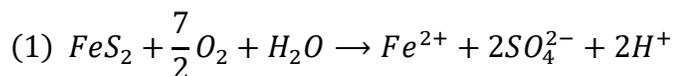
En las aguas del área de estudio, el pH va desde 3,9 a 7,3, siendo la mayoría ácidos con un pH menor a 7. Los pH ácidos suelen asociarse a la oxidación de sulfuros, ya sea en presencia de oxígeno o de hierro férrico (Plumlee, 1999), principalmente a pirita ya que es la más abundante, sin embargo, la oxidación de los sulfuros y del azufre es primordialmente biológica, por medio de bacterias y hongos (Mediavilla, 2014).

Ejemplos de reacciones de oxidación de sulfuros se encuentran en la Tabla 18. La calcopirita junto a la molibdenita son los sulfuros más resistentes a la oxidación (Dold, 2010), por lo que no deberían ser el principal motivo del pH ácido. La enargita, la arsenopirita y el rejalgar son capaces de generar grandes cantidades de ácido, pero estos minerales también aportarían cobre y arsénico a las aguas, elementos que no están presentes en grandes concentraciones en las aguas de la zona de estudio (máximo 73,9 ppb para el cobre y 3,3 ppb para el arsénico). Además, ciertas muestras de agua contienen grandes cantidades de hierro (hasta 7003 ppb), por lo que el sulfuro que provoque las aguas ácidas podría ser un sulfuro de hierro, como pirita, que sí se observó en el área de estudio, pirrotita o arsenopirita, aunque esta última, además de que aportaría arsénico, tiene una tasa de oxidación algo menor que el de la pirita (Dold, 2010).

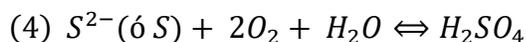
Tabla 18 Ejemplos de oxidación de sulfuros modificada de Plumlee (1999). Las reacciones son idealizadas, probablemente no representan los productos apropiados para todas las condiciones químicas ambientales que pueden darse.

Mineral	Fórmula	Generación de ácido/reacción de consumo	Moles de ácido
Pyrite	FeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub> + 3.5 O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O = Fe <sup>2+</sup> + 2 SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> + 2 H <sup>+</sup>	2
		FeS <sub>2</sub> + 3.75 O <sub>2</sub> + 0.5 H <sub>2</sub> O = Fe <sup>3+</sup> + H <sup>+</sup> + 2 SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	1
		FeS <sub>2</sub> + 3.75 O <sub>2</sub> + 3.5 H <sub>2</sub> O = 2 SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> + 4 H <sup>+</sup> + Fe(OH) <sub>3</sub> (s)	4
		FeS <sub>2</sub> + 14 Fe <sup>3+</sup> + 8 H <sub>2</sub> O = 15 Fe <sup>2+</sup> + 2 SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> + 16 H <sup>+</sup>	16
Pyrrhotite	Fe <sub>1-x</sub> S	x = 0.1: Fe <sub>0.9</sub> S + 1.95 O <sub>2</sub> + 0.1 H <sub>2</sub> O = 0.9 Fe <sup>2+</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> + 0.2 H <sup>+</sup>	0.2
		x = 0.1: Fe <sub>0.9</sub> S + 2.175 O <sub>2</sub> + 0.7 H <sup>+</sup> = 0.9 Fe <sup>3+</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> + 0.35 H <sub>2</sub> O	-0.7
		x = 0.1: Fe <sub>0.9</sub> S + 2.175 O <sub>2</sub> + 2.35 H <sub>2</sub> O = SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> + 2 H <sup>+</sup> + 0.9 Fe(OH) <sub>3</sub> (s)	2
		x = 0.1: Fe <sub>0.9</sub> S + 7.8 Fe <sup>3+</sup> + 4 H <sub>2</sub> O = 8.7 Fe <sup>2+</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> + 8 H <sup>+</sup>	8
Sphalerite, Covellite, Galena	ZnS, CuS, PbS	MS + 2 O <sub>2</sub> = M <sup>2+</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> (M = Zn, Cu, Pb)	0
		MS + 8 Fe <sup>3+</sup> + 4 H <sub>2</sub> O = M <sup>2+</sup> + 8 Fe <sup>2+</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> + 8 H <sup>+</sup>	8
Galena	PbS	PbS + 2 O <sub>2</sub> = PbSO <sub>4</sub> (anglesite)	0
		PbS + 0.5 O <sub>2</sub> + 2 H <sup>+</sup> = Pb <sup>2+</sup> + H <sub>2</sub> O + S <sup>o</sup> (native sulfur)	-2
Chalcopyrite	CuFeS <sub>2</sub>	CuFeS <sub>2</sub> + 4 O <sub>2</sub> = Cu <sup>2+</sup> + Fe <sup>2+</sup> + 2 SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	0
		CuFeS <sub>2</sub> + 16 Fe <sup>3+</sup> + 8 H <sub>2</sub> O = Cu <sup>2+</sup> + 17 Fe <sup>2+</sup> + 2 SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> + 16 H <sup>+</sup>	16
Enargite	Cu <sub>3</sub> AsS <sub>4</sub>	Cu <sub>3</sub> AsS <sub>4</sub> + 8.75 O <sub>2</sub> + 2.5 H <sub>2</sub> O = 3 Cu <sup>2+</sup> + HAsO <sub>4</sub> <sup>=</sup> + 4 SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> + 4 H <sup>+</sup>	4
		Cu <sub>3</sub> AsS <sub>4</sub> + 35 Fe <sup>3+</sup> + 20 H <sub>2</sub> O = 3 Cu <sup>2+</sup> + 35 Fe <sup>2+</sup> + HAsO <sub>4</sub> <sup>=</sup> + 4 SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> + 39 H <sup>+</sup>	39
Arsenopyrite	FeAsS	FeAsS + 3.25 O <sub>2</sub> + 1.5 H <sub>2</sub> O = Fe <sup>2+</sup> + HAsO <sub>4</sub> <sup>=</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> + 2 H <sup>+</sup>	2
		FeAsS + 3.5 O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O = Fe <sup>3+</sup> + HAsO <sub>4</sub> <sup>=</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> + H <sup>+</sup>	1
		FeAsS + 13 Fe <sup>3+</sup> + 8 H <sub>2</sub> O = 14 Fe <sup>2+</sup> + HAsO <sub>4</sub> <sup>=</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> + 15 H <sup>+</sup>	15
		FeAsS + 3.5 O <sub>2</sub> + 3 H <sub>2</sub> O = SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> + 2 H <sup>+</sup> + FeAsO <sub>4</sub> •2H <sub>2</sub> O (scorodite)	2
Native sulfur	S <sup>o</sup>	S <sup>o</sup> + H <sub>2</sub> O + 1.5 O <sub>2</sub> = 2 H <sup>+</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	2
Realgar	AsS	AsS + 2.75 O <sub>2</sub> + 2.5 H <sub>2</sub> O = HAsO <sub>4</sub> <sup>=</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> + 4 H <sup>+</sup>	4
		AsS + 11 Fe <sup>3+</sup> + 8 H <sub>2</sub> O = 11 Fe <sup>2+</sup> + HAsO <sub>4</sub> <sup>=</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> + 15 H <sup>+</sup>	15

La oxidación de la pirita es un proceso que incluye numerosas reacciones de tipo oxidación-reducción, hidrólisis, y formación de iones complejos (Nordstrom D. , 1982), pero se pueden considerar 3 pasos esenciales: (1) oxidación del sulfuro, (2) oxidación de hierro ferroso, y (3) hidrólisis y precipitación de complejos férricos y minerales (Dold, 2010).



También, en zonas de sulfuros, además de oxidarse el hierro lo hace el sulfuro, generando ácido sulfúrico (4) (Mediavilla, 2014).



Los minerales que precipiten producto de la oxidación de pirita dependerán de las condiciones pH-Eh (Figura 5.7), y la disponibilidad de ciertos elementos como potasio y/o azufre. Estos pueden ser ferrihidrita, schwertmanita, jarosita o goethita, siendo los 2 primeros metaestables respecto a la goethita (Bigham & Nordstrom, 2000). De estos, se encuentra goethita en la zona de estudio, por lo que las condiciones de pH deben ser entre 3 y 8, y las de pe entre -2 y 10.

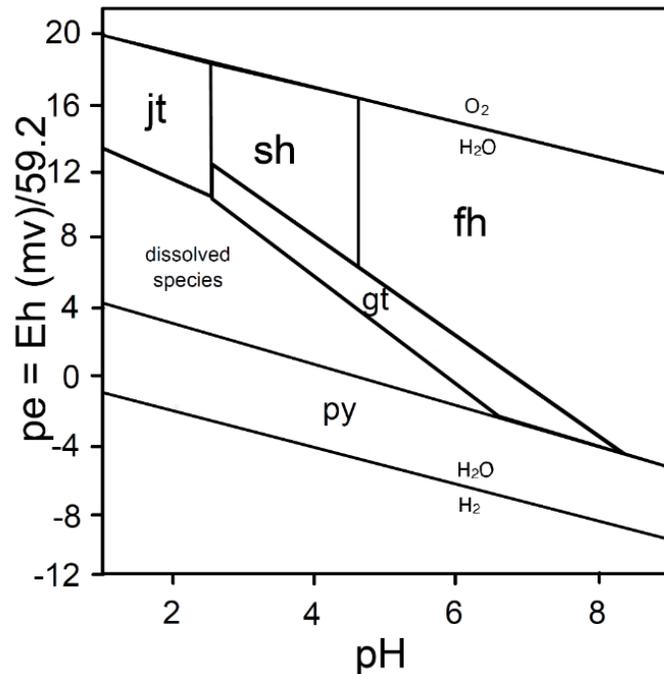


Figura 5.7 Diagrama Eh-pH para el sistema Fe-S-K-O-H a 25°. Gt = goethita, Jt = K-jarosita, Fh = ferrihidrita, Sh = schwertmannita y Py = pirita. Obtenido de Dold (2010).

#### 5.4. THQ

Dados los valores de THQ obtenidos, el consumo de las aguas de la zona de estudio no representa un riesgo que a largo plazo dañe notablemente la salud de las personas, a excepción de la muestra 6. De acuerdo únicamente a su contenido en elementos, ya que este parámetro no considera el pH de las aguas.

Los THQ fueron calculados para adultos con una esperanza de vida de 70-80 años, con una exposición diaria a estas aguas (prácticamente toda su vida), considerando un consumo de 1 litro diario, por lo que, si además se utiliza agua para cocinar y cultivar, se debe considerar un incremento en el riesgo. Además, los THQ dependen de las características de cada individuo, para la población infantil, que tienen un peso corporal menor, el riesgo será mayor.

## 5.5. Modelización de los procesos geoquímicos

En ambos escenarios simulados, los resultados indican que hay gran probabilidad de que haya simultáneamente una disolución de diópsido, de pirita, de pirolusita, de albita y de anortita (Tabla 19). Además, las mayores cantidades que precipitan o se disuelven corresponden a magnetita, goethita y hematita, lo que responde a la gran variación de hierro que hay en las muestras de agua.

Tabla 19 Resumen de los resultados de los modelos inversos.

Resultados	Escenario 1	Escenario 2
Combinaciones totales	28	28
Combinaciones donde hay: disolución de diópsido, pirita y pirolusita.	14	17
Combinaciones donde hay: disolución de diópsido, pirita, albita y anortita.	14	11
Combinaciones donde hay: Disolución de diópsido, pirita, albita, anortita y pirolusita.	11	11

A pesar de esto, igualmente hay resultados en los que hay precipitación de algunos o todos los minerales anteriormente mencionados. Esto se debe a que los modelos inversos en Phreeqc, buscan llegar a la composición del agua final tomando en cuenta las cantidades de iones que pueden aportar o sustraer los minerales debido a su disolución o precipitación, por lo que hay muchas combinaciones que pueden ser incorrectas.

Estos modelos solamente son una aproximación de los minerales que pueden estar interactuando con el agua, ya que hay otros minerales que no fueron tomados en cuenta para hacer más simples los modelos, y se escogieron los que se encuentran en mayor cantidad. Los minerales se eligieron basados en las variaciones de ciertos iones, en la mineralogía observada en la zona, y en la mineralogía de la Formación Abanico. Para el caso de los elementos como el calcio, sulfato, hierro, aluminio y manganeso, que son los más importantes y/o que presentan las mayores variaciones, se utilizaron anortita, diópsido, pirita, magnetita, goethita, hematita y pirolusita. Los 2 primeros junto a la albita corresponden a minerales mayoritarios de la Formación Abanico, el resto son minerales que se encontraron en el área de estudio, y la pirolusita se escogió por ser el óxido de manganeso más común, aunque no se haya encontrado.

Se podrían haber incluido más minerales en los modelos inversos, como otros óxidos de manganeso, hornblenda y otros clinopiroxenos, pero esto podría haber aumentado el número de resultados posibles, haciendo muy difícil su interpretación.

En cuanto a los 2 modelos generados para la oxidación de pirita, ambos muestran un descenso bastante rápido en el pH, en menos de 1 día se pueden alcanzar valores de hasta 2,5. Esto no refleja lo que ocurre en la zona de estudio, donde hay más minerales que también estarán reaccionando, y probablemente utilizando  $H^+$ , lo que haría que el pH no baje de manera tan rápida. Además, el porcentaje de pirita observado en la zona de estudio es inferior a un 2%, por lo que el tiempo para que las aguas alcancen los pH medidos podría ser del orden de años.

La diferencia en la forma de las curvas de ambos modelos puede deberse a simplificaciones necesarias para la implementación de las simulaciones.

## 5.6. Modelos esquemáticos de circulación hídrica local

Finalmente, para ordenar y resumir todos los resultados, se presentan 3 modelos de circulación hídrica local, el primero para la zona del Sky el Arpa sector sur en el trazo A – A', el segundo para la zona del Manchón Amarillo en el trazo B – B' y, el tercero para la zona de Sky el Arpa con orientación N-S en el trazo C – C' (Figura 5.8).

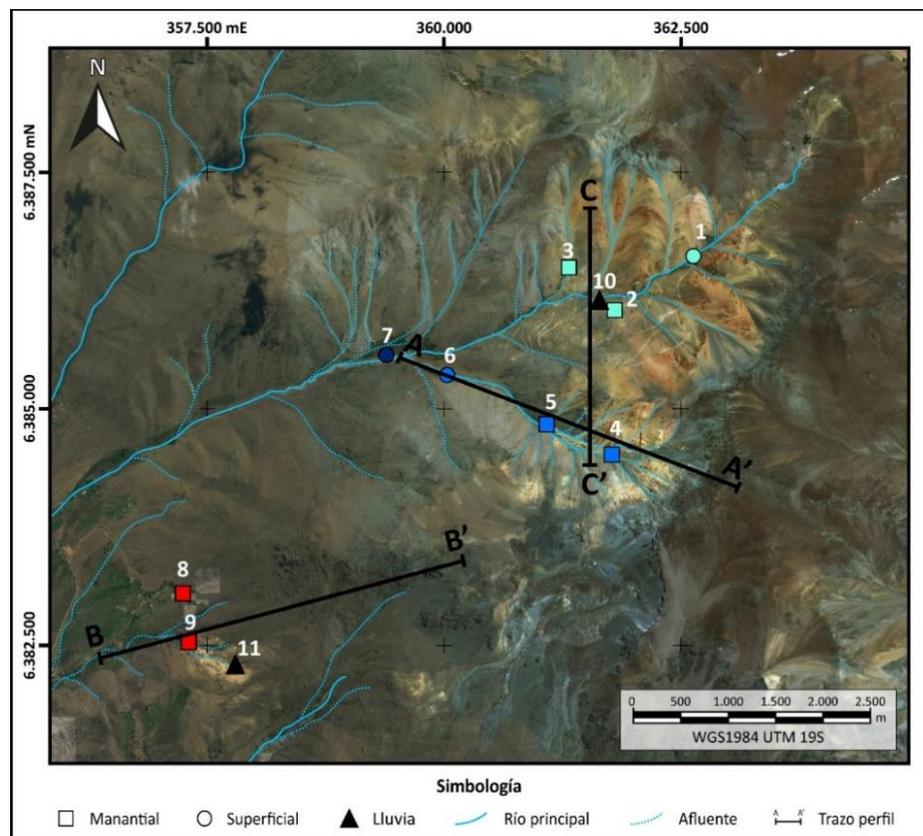


Figura 5.8 Mapa zona de estudio y trazo de los perfiles.

En el modelo del sector sur del Sky el Arpa (Figura 5.9), las aguas provenientes de precipitaciones se infiltran a través de fracturas, luego interactúan tanto con las rocas alteradas como con rocas frescas, afloran a través del material no consolidado de un deslizamiento de rocas, se infiltran por medio de fracturas y finalmente afloran generando escorrentía en sedimentos fluviales.

### Modelo de circulación hídrica en Sky el Arpa sector sur

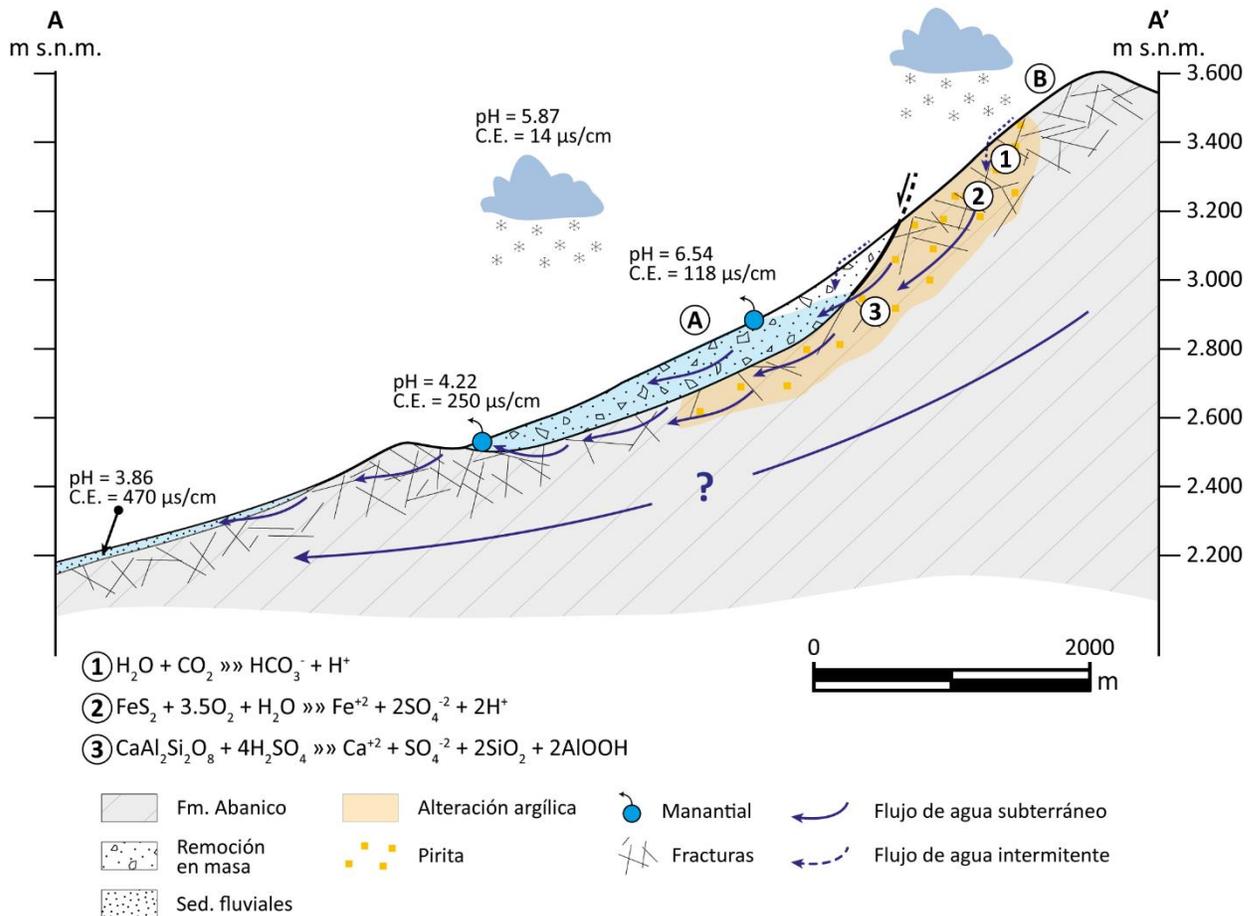


Figura 5.9 Modelo de circulación hídrica para la zona sur del Sky el Arpa.

En el modelo del Manchón Amarillo (Figura 5.10), las aguas de precipitaciones se infiltran también a través de fracturas, fluyen por medio fracturado donde interactúan con rocas frescas y luego con la zona alterada, aflora a través de una fractura y genera escorrentía.

### Modelo de circulación hídrica en Manchón Amarillo

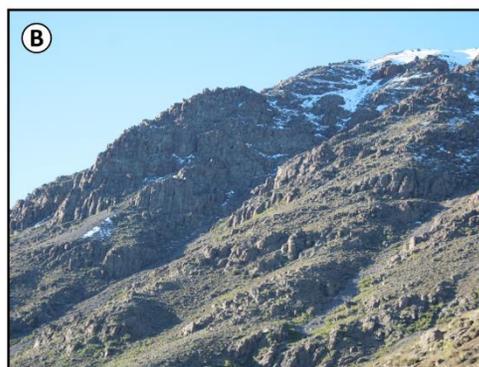
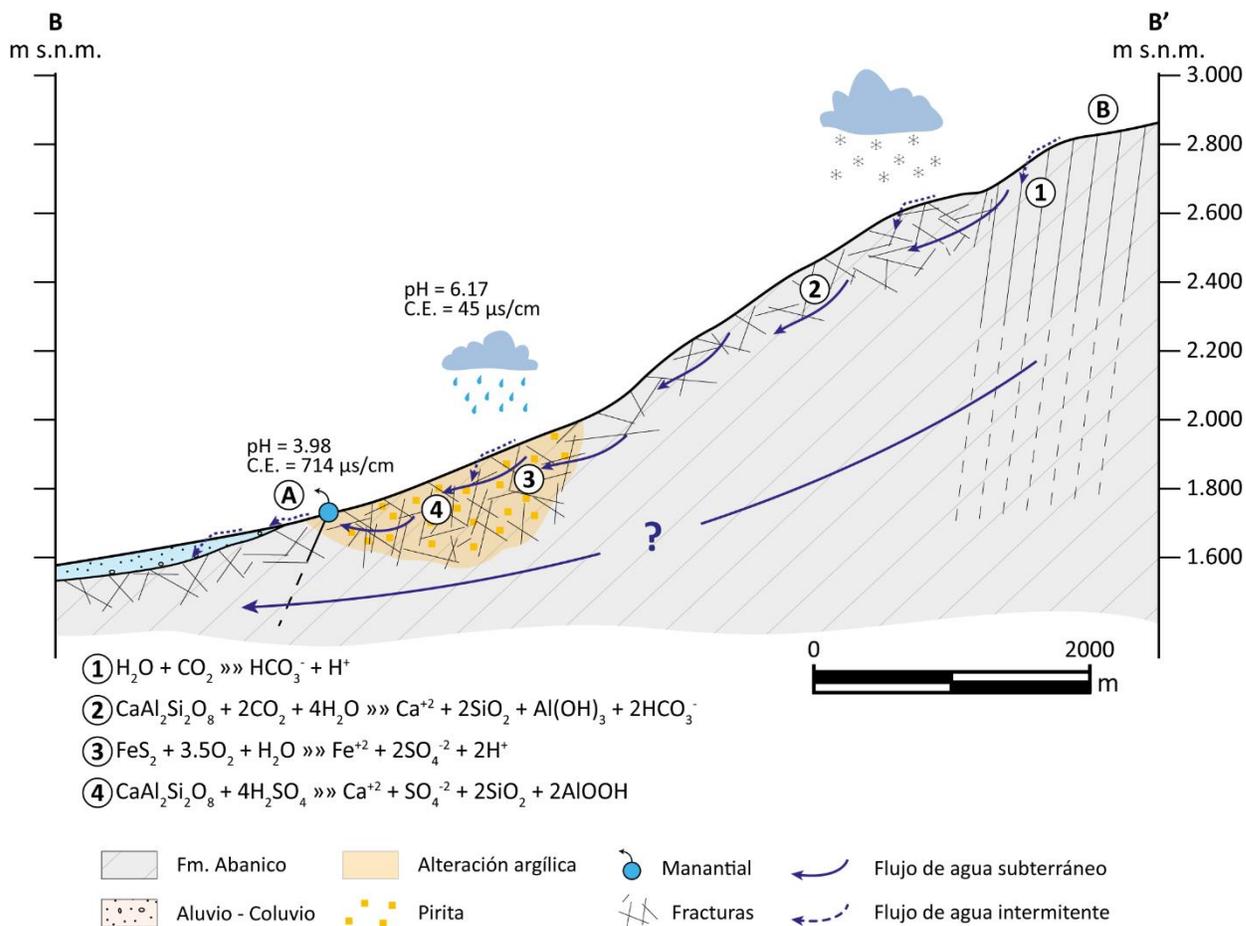


Figura 5.10 Modelo de circulación hídrica para el Manchón Amarillo.

En el modelo del Sky el Arpa con orientación N-S (Figura 5.11), las aguas provenientes de precipitaciones, principalmente nieve, generan escorrentía y también se infiltran a través de fracturas, luego interactúan tanto con las rocas alteradas como con rocas frescas y, afloran a través de fracturas y material no consolidado de un deslizamiento de rocas.

### Modelo de circulación hídrica en Sky el Arpa orientación N-S

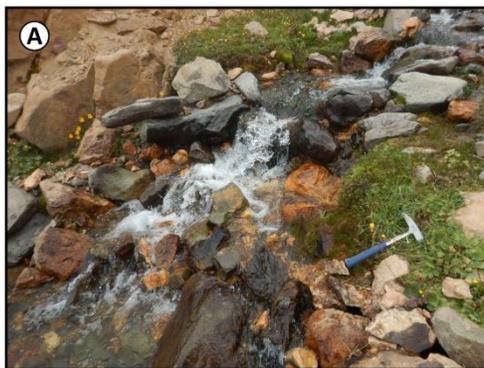
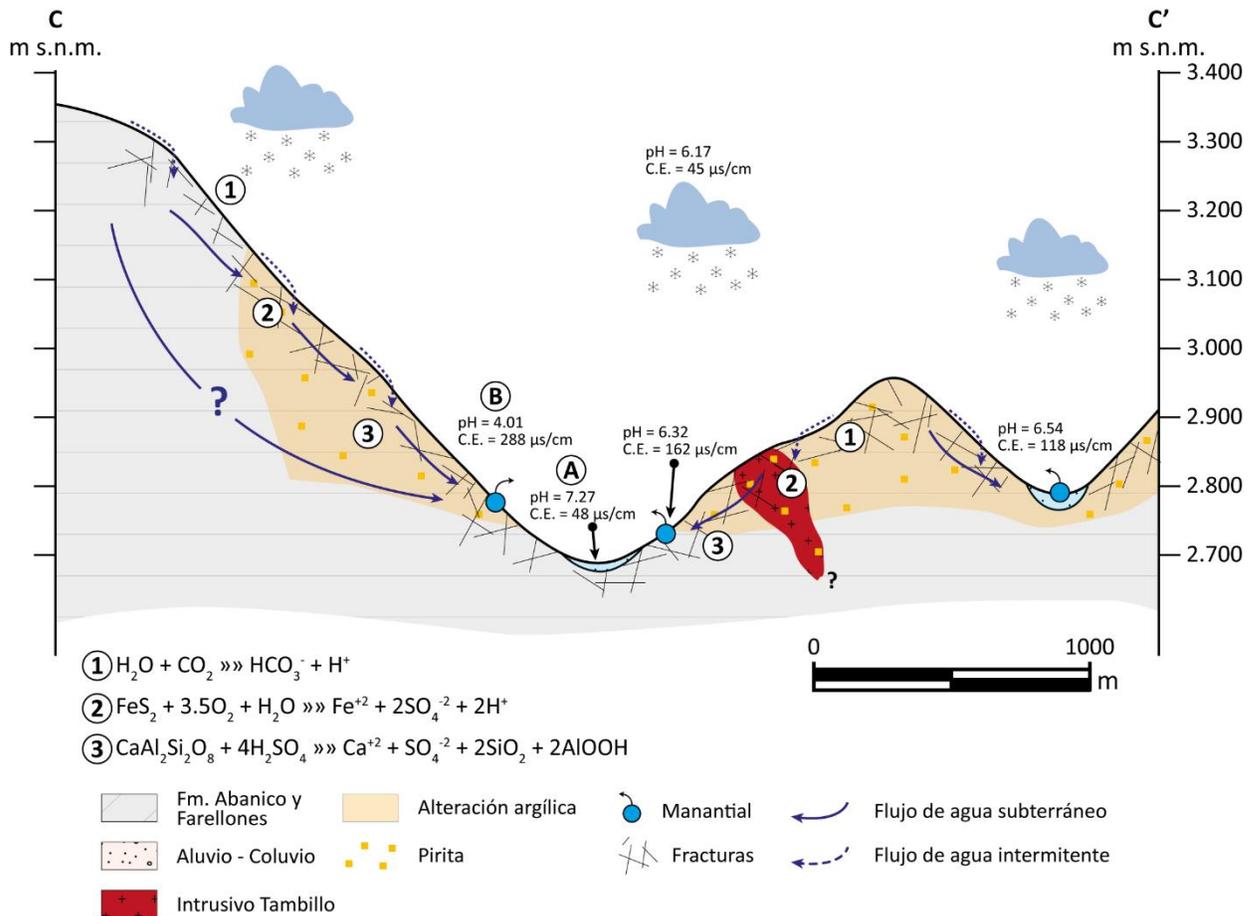


Figura 5.11 Modelo de circulación hídrica para Sky el Arpa con orientación N-S.

## 6. Conclusiones

En Campos de Ahumada, las aguas analizadas se caracterizan por ser de tipo sulfatadas cálcicas, con pH ácido hasta 3,86 y, generalmente inferior a 7. Los datos fisicoquímicos han revelado grandes contenidos de los iones hierro y manganeso. En la zona de estudio, además se ha caracterizado una fuerte alteración hidrotermal, fílica y argílica moderada y/o avanzada, caracterizada por cuarzo, muscovita, caolinita e illita, producto de la circulación de fluidos hidrotermales en el pasado. En Campos de Ahumada es común encontrar óxidos de hierro y manganeso.

El análisis de los datos fisicoquímicos ha permitido establecer que la química de las aguas analizadas está dominada por procesos de interacción agua – roca locales. Los datos de los isótopos estables de oxígeno sugieren que ocurren procesos de evaporación, aunque parecen ocurrir en menor medida. Se ha podido establecer que las aguas al interactuar con las rocas de la formación Abanico, producen la disolución de silicatos, especialmente de las plagioclasas cálcicas, favorecida, en este caso, por la posible presencia de ácido sulfúrico producto de la oxidación de pirita.

Esta oxidación, que produce acidez en las aguas, sería responsable de los valores de pH medidos, de la predominancia de sulfato en las aguas respecto al resto de aniones, así como una elevada concentración de hierro.

La oxidación de pirita, simulada mediante un modelo de transporte reactivo 1D, es un proceso bastante rápido que provoca un descenso rápido también en el pH. Sin embargo, debido a la presencia de otros minerales y sus reacciones, el pH en el agua no desciende tan rápidamente.

Las simulaciones geoquímicas realizadas en Phreeqc, reproducen de manera general lo que ocurre en Campos de Ahumada. Los modelos obtenidos indican que las interacciones agua – roca identificadas, se reproducen utilizando los modelos inversos. En general se observa disolución de dióxido de silicio, pirita, pirolusita y, precipitación de sílice.

El modelo de circulación hídrica propuesto para Campos de Ahumada plantea que, las aguas de las precipitaciones, tanto líquidas como sólidas, se infiltran a través de fracturas, interactúan tanto con rocas de la Formación Abanico como las extensas rocas alteradas, aflorando posteriormente por fracturas y material no consolidado generando escorrentía y produciendo drenaje ácido.

Considerando que la población del lugar usa esta agua para su consumo propio y para riego, se ha evaluado los posibles efectos adversos en la salud humana calculando el riesgo por ingesta diaria. Los resultados indican que, su consumo no supone un riesgo para la salud. Aunque se recomienda evitar su consumo diario, en particular por la población infantil, debido a los pH ácidos y los altos contenidos de hierro y manganeso, que sobrepasan los límites permitidos para agua potable.

El fenómeno de drenaje ácido analizado es de carácter local, pero dada la geología de Chile, donde abundan minerales sulfurados, y las zonas con alteración hidrotermal, es

muy probable que el drenaje ácido natural sea igualmente común. Estudiar este proceso e identificarlo es muy importante para conocer mejor los recursos hídricos de nuestro país, la variedad de ecosistemas asociados a estas condiciones particulares y, que no cause daño en la salud de las personas.

## 7. Bibliografía

- Aguirre, L. (1960). Geología de los Andes de Chile Central (provincia de Aconcagua). Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín No. 9., 79.
- Bigam, J., & Nordstrom, D. (2000). Iron and Aluminum Hydroxysulfates from Acid Sulfate Waters. En *Mineralogy and Geochemistry*, Vol.40, 351-403.
- Bustamante, M., Lemus, M., Cortés, R., Vivallos, J., Cáceres, D., & Wall, R. (2012a). Exploración Geológica para el fomento de la Energía Geotérmica: Área de Jahuel, Región de Vaparaíso. Servicio Nacional de Geología y Minería. Informe Inédito, 243p., 5 anexos y 6 anexos digitales, 2 mapas a escala 1:50.000, 1 mapa a escala 1:250.000. Santiago.
- Bustamante, M., Wall, R., Lemus, M., & Vivallos, J. (2012b). Recalificación termal de las aguas de vertiente de Los Andes - San Felipe, Región de Valparaíso. En: Congreso Geológico Chileno 13°. Antofagasta, Chile. Unidad de Recursos Energéticos, Departamento de geología Aplicada, Servicio Nacional de Geología y minería. pp. 571-573.
- CADE-IDEPE. (2004). Cuenca del Río Aconcagua - Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Dirección General de Agua (DGA), Ministerio de Obras Públicas (MOP), Gobierno de Chile. DGA, Valparaíso, 160 pp.
- Cahill, T., & Isacks, B. (1992). Seismicity and Shape of the Subducted Nazca Plate. *Journal of Geophysical Research*, 17,503 - 17,529.
- Campbell, D. (2005). Termocronología del sector comprendido entre los ríos Rocín y Aconcagua: Implicancias en la evolución meso-cenozoica de la zona. Memoria, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, 113.
- Carter, W., & Aguirre, L. (1965). Structural Geology of Aconcagua Province and its Relationship to the Central Valley Graben, Chile. *Geological Society of America Bulletin*, v. 76, 651-664.
- Charrier, R. (1973). Geología de las Provincias O'higgins y Colchagua. Instituto de Investigación de Recursos Naturales (IREN), Publicación n° 7, 69, Santiago.
- Charrier, R., Baeza, O., Elgueta, S., Flynn, J., Gans, P., Kay, S., Muñoz, N., Wyss, A., & Zurita, E. (2002). Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33°-36°S.L.). *Journal of South American Earth Sciences* 15, 117 - 139.
- Consejo Minero, Ministerio de Minería. (2002). Guía Metodológica sobre Drenaje Ácido en la Industria Minera: Chile. Santiago: Biblioteca Sernageomin, 11058 c.2.
- Craig, H. (1961). Isotopic Variations in Meteoric Waters. En *Science* vol 133 (3465), 1702–1703.

- Custodio, E., & Llamas, M. (1976). Hidrología subterránea. Barcelona: Ediciones Omega. 2 Vol: 1-2350 (2ª. edic. 1985).
- DeMets, C., Gordon, R., Argus, D., & Stein, S. (1994). Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical Research Letters*, Vol. 21, No 20, 2191-2194.
- Departamento de Administración de recursos hídricos, Dirección General de Aguas. (2002). Informe de zonificación hidrogeológica para las Regiones Metropolitana y V. DGA, Santiago, SDT 133.
- Dold, B. (2010). Basic Concepts in Environmental Geochemistry of Sulfidic Mine-Waste Management. En *Waste Management*. ISBN 978-953-7619-84-8, pp. 232.
- Fock, A. (2005). Cronología y Tectónica de la Exhumación en el Neógeno de Los Andes de Chile Central entre los 33° y los 34°S. Santiago, Chile: Tesis, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Fronzoni, F., Caliro, S., Cardellini, C., Chiodini, G., & Morgantini, N. (2009). Carbon dioxide degassing and thermal energy release in the Monte Amiata volcanic-geothermal area (Italy). *Applied Geochemistry* 24, 860 - 875.
- Fuenzalida, A., Pardo, M., Cisternas, A., Dorbath, L., Comte, D., & Kausel, E. (1992). On the geometry of the Nazca Plate subducted under Central Chile (32-34.5°S) as inferred from microseismic data. *Tectonophysics* 205, 1-11.
- Gana, P., & Wall, R. (1997). Evidencias geocronológicas  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  y K-Ar de un hiatus cretácico superior-eoceno en Chile central (33-33°30'S). *Revista Geológica de Chile*, Vol. 24, n° 2, 145-163.
- Gergen, I., & Harmanescu, M. (2012). Application of principal component analysis in the pollution assessment with heavy metals of vegetable food chain in the old mining areas. *Chemistry Central Journal* , 6:156.
- Güngör, H., & Elik, A. (2007). Comparison of ultrasound-assisted leaching with conventional and acid bomb digestion for determination of metals in sediment samples. *Microchemical Journal* 86, 65 - 70.
- IAEA/WMO, 2019. Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. URL <http://www.iaea.org/water>
- INE. (2017). Compendio Estadístico. Santiago: Instituto Nacional de Estadísticas, ISBN: 978-956-323-193-9.
- INN. (2005). Norma chilena oficial - Agua potable - Parte 1 - Requisitos. Instituto Nacional de Normalización, NCh409/1.Of2005.
- Jara, M. (2016). Simulación de sistemas hidrotermales mediante modelos de transporte reactivo: el caso de San Felipe – Los Andes, Chile Central. Santiago: Memoria, Departamento de Geología, Universidad de Chile.

- Karolyte, R., Serno, S., Johnson, G., & Gilfillan, S. (2017). The influence of oxygen isotope exchange between CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O in natural CO<sub>2</sub>-rich spring waters: Implications for geothermometry. *Applied Geochemistry*, Vol. 84, 173-186.
- Klohn, C. (1960). Geología de la Cordillera de los Andes de Chile central (provincias de Santiago, O'Higgins, Colchagua y Curicó). Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín No. 8, 95 p. Santiago.
- Levi, B., Aguirre, L., Nyström, J., Padilla, H., & Vergara, M. (1989). Low-grade regional metamorphism in the Mesozoic-Cenozoic volcanic sequences of the Central Andes. *Journal of Metamorphic Geology*, Vol. 7, 478-495.
- Martínez, P., Martínez, P., & Castaño, S. (2006). *Fundamentos de Hidrogeología*. Mundiprensa, ISBN: 84-8476-239-4.
- Mediavilla, M. J. (2014). Meteorización Química. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, Vol. 22, n° 3, p 230.
- Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. (2015). Determinación de la Disponibilidad de Aguas Subterráneas en el Valle del Río Aconcagua. DGA, Santiago, SDT 372.
- Ministerio de Salud. (2010). Decreto 735 - Reglamento de los Servicios de Agua destinados al consumo humano. Biblioteca del congreso nacional, Id 197226.
- Ministerio de Salud (2010). Encuesta Nacional de Salud ENS Chile 2009-2010 Tomo II. URL [hipertension.cl/2015/07/29/encuesta-nacional-de-salud-ens-chile-20092010-tomo-ii/](http://hipertension.cl/2015/07/29/encuesta-nacional-de-salud-ens-chile-20092010-tomo-ii/)
- Navarro, L. (2014). Alteración Hidrotermal Asociada al Sistema de Falla "Pocuro - San Ramón". Santiago: Memoria, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Nordstrom, D. (1982). Aqueous Pyrite Oxidation and the Consequent Formation of Secondary Iron Minerals. En: Kittrick J.A. y Fanning D.S. (eds.), *Acid sulfate weathering*. Soil Science Society of America Journal, Special Publication 10: 37-56.
- Nordstrom, K., & Alpers, C. (1999). *Geochemistry of Acid Mine Waters*. The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, V. 6a, Chapter 6.
- Nyström, J., Vergara, M., Morata, D., & Levi, B. (2003). Tertiary volcanism during extension in the Andean foothills of central Chile (33°15' - 33°45'S). *Geological Society of America Bulletin*, v. 115; n° 12, 1523 - 1537.
- Padilla, H., & Vergara, M. (1985). Control Estructural y Alteración tipo Campo Geotérmico en los Intrusivos subvolcánicos miocénicos del área cuesta de Chacabuco-Baños el Corazón, Chile central. *Revista Geológica de Chile* n° 24, 3-17.
- Pardo, M., Comte, D., & Monfret, T. (2002). Seismotectonic and Stress Distribution in the central Chile Subduction Zone. *Journal of South American Earth Sciences* 15, 11-22.

- Plumlee, G. (1999). The Environmental Geology of Mineral Deposits. En G.S. Plumlee and M.J. Logsdon (Editors), The environmental geochemistry of ore deposits. Part A: Processes, techniques, and health issues. Reviews in Economic Geology, pp. 71-116.
- Poppe, L., Paskevich, V., Hathaway, J., & Blackwood, D. (2013). A Laboratory Manual for X-Ray Powder Diffraction. U.S. Geological Survey Open-File Report 01-041.
- Redwan, M. (2016). Effect of water–rock interaction processes on the hydrogeochemistry of groundwater west of Sohag area, Egypt. Arabian Journal of Geosciences 9: 111.
- Rivano, S. (1996). Geología de las hojas Quillota y Portillo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, 232 p.
- Rivano, S., Godoy, E., Vergara, M., & Villarroel, R. (1990). Redefinición de la Formación Farellones en la Cordillera de Los Andes de Chile central (32-34°S). Revista Geológica de Chile, Vol. 17, n° 2, p 205-214.
- Rivano, S., Sepúlveda, P., Herve, M., & Puig, A. (1985). Geocronología K-Ar de las rocas intrusivas entre los 31°-32° latitud sur, Chile. Revista Geológica de Chile n° 24, 63-74.
- Sánchez-Murillo, R., Aguirre-Dueñas, E., Gallardo-Améstica, M., Moya-Vega, P., Birkel, C., & Esquivel-Hernández, G. a. (2018). Isotopic Characterization of Waters Across Chile. En Andean Hydrology. (Rivera, D, Godoy-Faúndez, A and Lillo-Saavedra, M, Eds). CRC Press, Boca Ratón, FL, USA. pp 205-230.
- Spangenberg, J., Dold, B., Vogt, M.-L., & Pfeifer, H.-R. (2007). Stable Hydrogen and Oxygen Isotope Composition of Waters from Mine Tailings in Different Climatic Environments. Environmental Science & Technology, Vol. 41, N° 6. .
- Taucare, M., Daniele, L., Arancibia, G., Viguier, B., & Morata, D. (2018). Conceptual model assessment for sustainable direct use of geothermal resources: The case of Los Andes – San Felipe basin (central Chile). European Geothermal Workshop 2018. Strasbourg, France.
- Taylor, R. (2011). Gossans and Leached Cappings, Field Assessment. Springer, Berlin, 146 pp.
- Thiele, R. (1980). Hoja Santiago, Región Metropolitana. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile n° 39, 51, Santiago.
- Vergara, M., Charrier, R., Munizaga, F., Rivano, S., Sepúlveda, P., Thiele, R., & Drake, R. (1988). Miocene volcanism in the central Chilean Andes (31°30'S-34°35'S). Journal of South American Earth Sciences, 199-209.
- U.S. EPA. (1989). Guidance manual for assessing human health risks from chemically contaminated, fish and shellfish. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, EPA-503/8-89-002.

Zaporozec, A. (1972). Graphical Interpretation of Water-Quality Data. Ground Water, Vol. 10, n° 2.

## **Anexo A**

### **Metodología de preparación de muestras para la difracción de rayos X (DRX)**

- Difracción de rayos X
- Método del polvo cristalino
- Fracción tamaño arcilla y remoción de elementos no deseados
- Tratamiento con etilenglicol
- Tratamiento con temperatura

## Difracción de rayos X (DRX)

La difracción de rayos X o DRX es una técnica utilizada para estudiar características de la estructura cristalina y determinar mineralogía.

Los rayos X son una radiación electromagnética con longitud de onda corta entre 10 y 0,1 nm, esta radiación al incidir sobre una red cristalina se puede reflejar, absorber, refractar, transmitir y dispersar. La dispersión puede ser destructiva o constructiva, cuando es esta última ocurre la difracción, los rayos dispersados de distintos planos atómicos están en fase generando un haz lo suficientemente intenso que puede ser medido por un detector de rayos X. Dado que cada material tiene su estructura atómica particular, cada uno tendrá un patrón único característico de rayos X. La relación para entender las condiciones geométricas que deben cumplirse para que ocurra difracción de rayos X por parte de un material cristalino es la Ley de Bragg (Figura A1), la cual es la siguiente:

$$n * \lambda = 2 * d * \sin\theta$$

Con

- n un número entero
- $\lambda$  la longitud de onda de los rayos X
- d el espaciado interplanar, y
- $\theta$  el ángulo entre el rayo incidente y el plano de dispersión

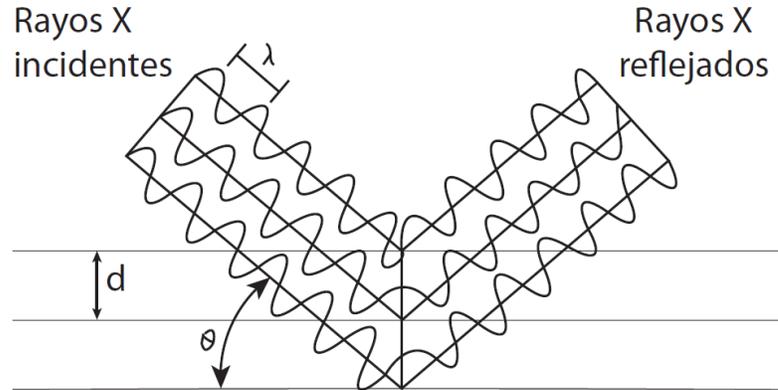


Figura A1 Esquema de difracción de rayos X (Navarro, 2014).

El análisis se realiza en un difractómetro de rayos X, el cual consta básicamente de una fuente de radiación monocromática y un detector de rayos X ubicado en una circunferencia cuyo centro es la muestra (Figura A2). Se dirige el haz de rayos X, con una longitud de onda fija, hacia la muestra, mientras el detector va variando el ángulo  $2\theta$ , con la finalidad de captar las reflexiones en un rango de ángulos. Finalmente se obtiene un difractograma, en el que se observan los picos característicos de la estructura cristalina del o los minerales, en el eje x se tiene el ángulo  $2\theta$  y en el eje y el número de conteos de reflexiones.

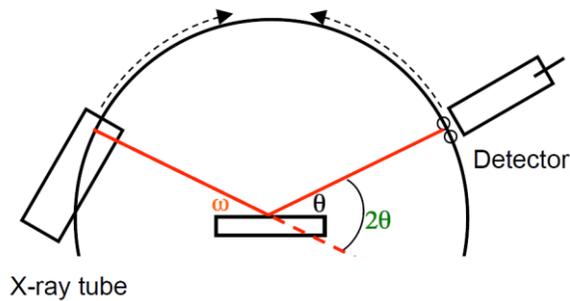


Figura A2 Esquema simple de difractor.

## Método del polvo cristalino

El método del polvo cristalino o policristalino consiste en reducir a tamaño de polvo muy fino, idealmente hasta un tamaño de grano inferior o igual a  $10\ \mu\text{m}$ , la muestra a analizar. La preparación de las muestras de este trabajo se realizó en un mortero de ágata.

Luego se ponen las muestras en un haz monocromático de rayos X. Cada una de las partículas del polvo es un cristal orientado al azar con respecto al haz incidente, por lo que siempre habrá un porcentaje de partículas orientadas apropiadamente para que cada plano pueda reflejar el haz incidente. Se asume que para cada familia de planos hay igual número de cristales que difractarán.

## Fracción tamaño arcilla

El tamaño arcilla según el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) es aquel inferior a  $4\ \mu\text{m}$ , pero para análisis mineralógicos dice que debe utilizarse un tamaño inferior a  $2\ \mu\text{m}$ .

Previo al proceso de separar la fracción menor a  $2\ \mu\text{m}$ , se debe revisar que la muestra no contiene elementos o compuestos no deseados, lo cual se explica más adelante en 'Remoción de elementos no deseados con compuestos químicos'. Esto se realiza entre el paso 1 y el paso 2 que se explican a continuación.

El procedimiento para separar la muestra tamaño arcilla realizado es el siguiente:

1. Disgregación preliminar: Moler la muestra hasta un tamaño de grano aproximado de  $0,5\ \text{cm}$  de diámetro, en un mortero de acero.
2. Aplicación de dispersante: En un vaso de precipitado poner 40 a 60 g de muestra (sin elementos no deseados) con 200 ml de agua ultrapura, luego se agregan 0,25 mg de hexametáfosfato de sodio y se revuelve durante 10 minutos.
3. Disgregación con ultrasonido: Se coloca el vaso de precipitado dentro del ultrasonido, este se llena con agua hasta el mismo nivel que tenga la muestra dentro del vaso, y se aplica ultrasonido por 10 minutos.

4. Centrifugado o separación de fracción menor a 2  $\mu\text{m}$ : Se llenan 4 tubos para centrifuga de 50 ml con el líquido de las muestras, los cuales deben pesar lo mismo. Se colocan los tubos y se centrifuga a 1500 rpm durante 26 segundos. En los tubos se habrá separado la arcilla, que queda en la parte superior, del material más grueso que decanta en el fondo del tubo, y se separan manualmente en distintos contenedores.
5. Lámina de vidrio o agregado orientado: El líquido con la fracción arcilla en suspensión se vierte en una lámina de vidrio, con un gotario para que quede bien sujeta y una cantidad suficiente. Esto se hace sobre una rejilla y luego se deja secar (Figura A3). Si la muestra está demasiado concentrada se diluye con agua ultrapura, y si está muy diluida se concentra en la centrifuga a 3000 rpm durante 5 minutos, quedando el material tamaño arcilla en la parte inferior del tubo.



Figura A3 Láminas de vidrio con líquido con fracción tamaño arcilla. A. Líquidas. B. Secas.

### Remoción de elementos no deseados con compuestos químicos

Con la finalidad de eliminar elementos no deseados en la fracción tamaño arcilla, se realizan diferentes tratamientos químicos según los elementos que se quieran remover. Éstos se realizan posteriormente al paso de disgregación preliminar, y antes del paso de aplicación de dispersante (descritos en el capítulo 0). Luego de esta remoción de elementos no deseados se debe lavar la muestra.

1. Carbonatos: Con ácido clorhídrico al 10%, revisar si la muestra presenta efervescencia. Para eliminar los carbonatos, se dejan entre 40 y 60 g de muestra ya disgregada, en un vaso precipitado con 250 ml de solución Morgan, durante 24 a 48 horas bajo campana. La solución Morgan se prepara en un matraz de 1000 ml, con 82 g de acetato de sodio, 27 ml de ácido acético glacial, y agua ultrapura hasta completar los 1000 ml.
2. Materia orgánica: Con agua oxigenada (30 v) revisar si la muestra presenta efervescencia. Para remover la materia orgánica, se dejan 40 a 60 g de muestra en un vaso precipitado con 250 ml de agua oxigenada al 6%, durante 24 a 48 horas bajo campana.

3. Lavado: Después de los procedimientos anteriores, se pasa toda la muestra con los líquidos (solución Morgan, peróxido al 6%, o ambas) a tubos de centrífuga de 50 ml, se centrifuga por unos 5 minutos o hasta que todo el sólido haya decantado, y se bota el líquido. Luego se rellenan los tubos con agua ultrapura, se agitan y se comienza con el lavado propiamente tal. Centrifugar por 3 minutos y botar el líquido; rellenar nuevamente con agua ultrapura, agitar el tubo, centrifugar por 5 minutos y botar el líquido; volver a rellenar con agua ultrapura, agitar nuevamente, centrifugar 10 minutos y botar el líquido; y finalmente rellenar con agua ultrapura, volver a agitar los tubos, centrifugar 20 minutos y botar el líquido.

### Tratamiento con etilenglicol

Este procedimiento se hace con la finalidad de identificar ciertos minerales de arcilla, ya que algunos de ellos se pueden expandir con la adsorción del etilenglicol (Tabla A). Este proceso fue realizado en el Laboratorio de Cristalografía del Departamento de Física de la Universidad de Chile.

### Tratamiento con temperatura

Con el propósito de poder identificar ciertos minerales de arcilla, se aplica calor durante un tiempo determinado, provocando que, dependiendo la especie mineral, éstos puedan cambiar su estructura cristalina o perderla, ya que se puede colapsar su estructura por deshidratación o destruirla (Tabla A).

Las muestras en lámina de vidrio se colocaron en un horno a 500°C durante 4 horas.

*Tabla A Minerales y cambios al tratarlos con etilenglicol y temperatura. Basado en la información del USGS (A Laboratory Manual for X-Ray Powder Diffraction, 2013)*

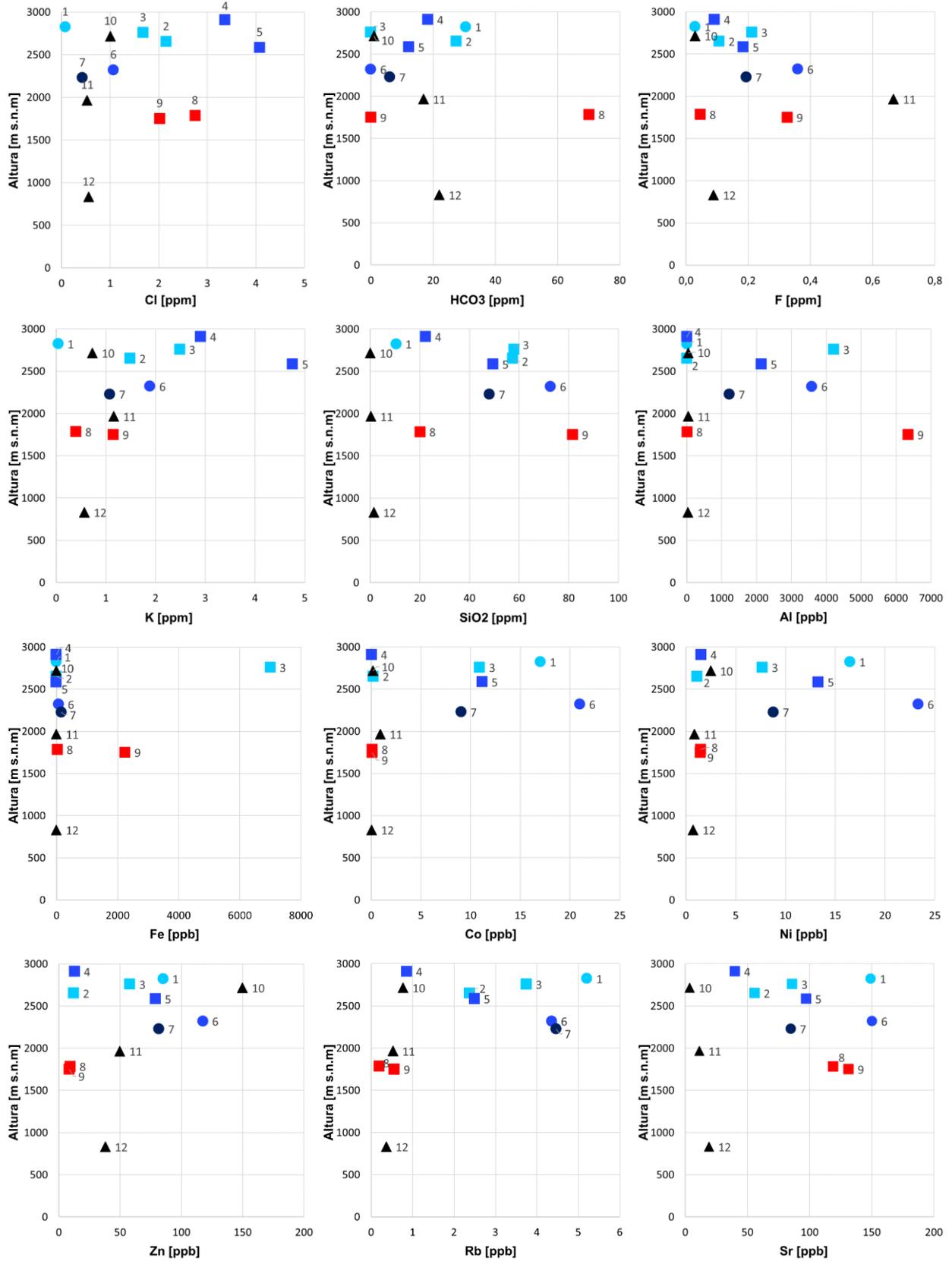
Mineral	Peak [Å]	Etilenglicol	Temperatura
Illita	10	no varía	no varía
	5,03		
	3,35		
Clorita	14,1	no varía	disminuye o desaparece
	7,07		
Caolinita	7,18	no varía	desaparece
	3,58		
Halloysita	7,4	no varía	desaparece
	3,63		
Dickita	7,15	no varía	desaparece
	3,58		
Corrensita	29,1	cambia a 31,1	desaparece o cambia
Montmorillonita	14 aprox	cambia a 17,5	desaparece o cambia

## Anexo B

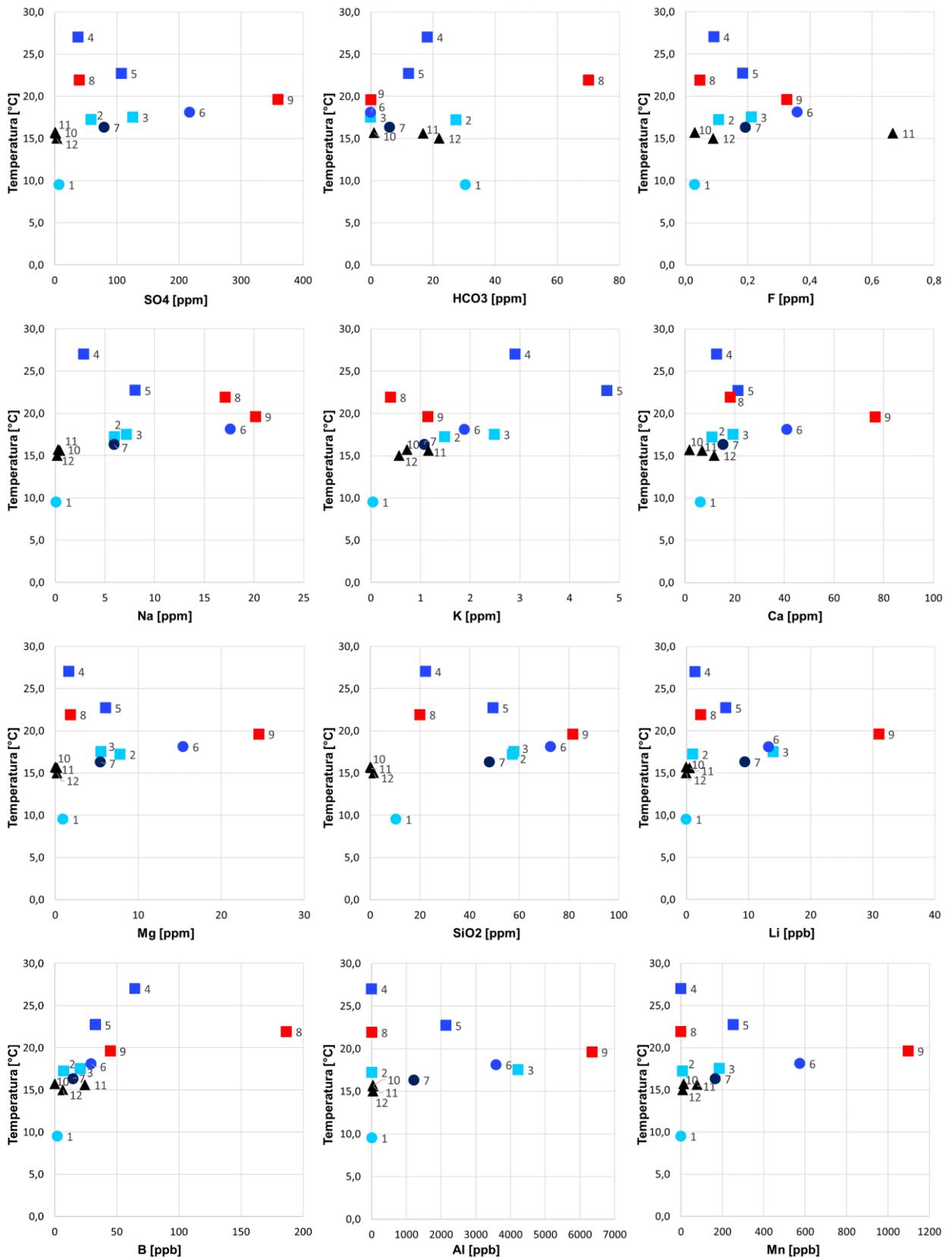
### Diagramas Binarios – Elementos mayoritarios y elementos minoritarios

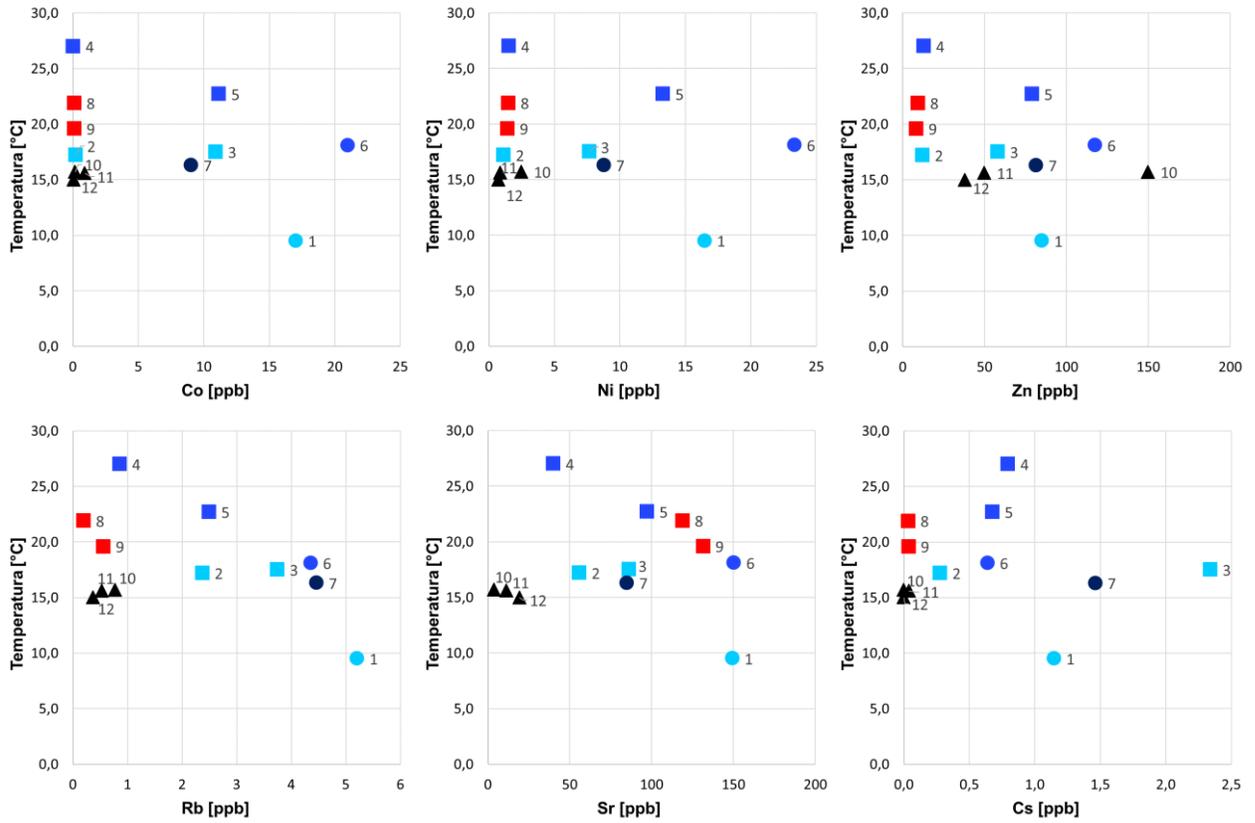
- Altura vs Elementos mayoritarios y minoritarios
- Temperatura vs Elementos mayoritarios y minoritarios (temperatura de muestras de lluvia no son las reales, corresponden a las del momento en que se recolectaron).
- pH vs Elementos mayoritarios y minoritarios.
- Potencial Redox vs Elementos mayoritarios y minoritarios.
- Cl<sup>-</sup> vs Elementos mayoritarios y minoritarios.
- SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> vs Elementos mayoritarios.

# Altura vs Elementos mayoritarios y minoritarios

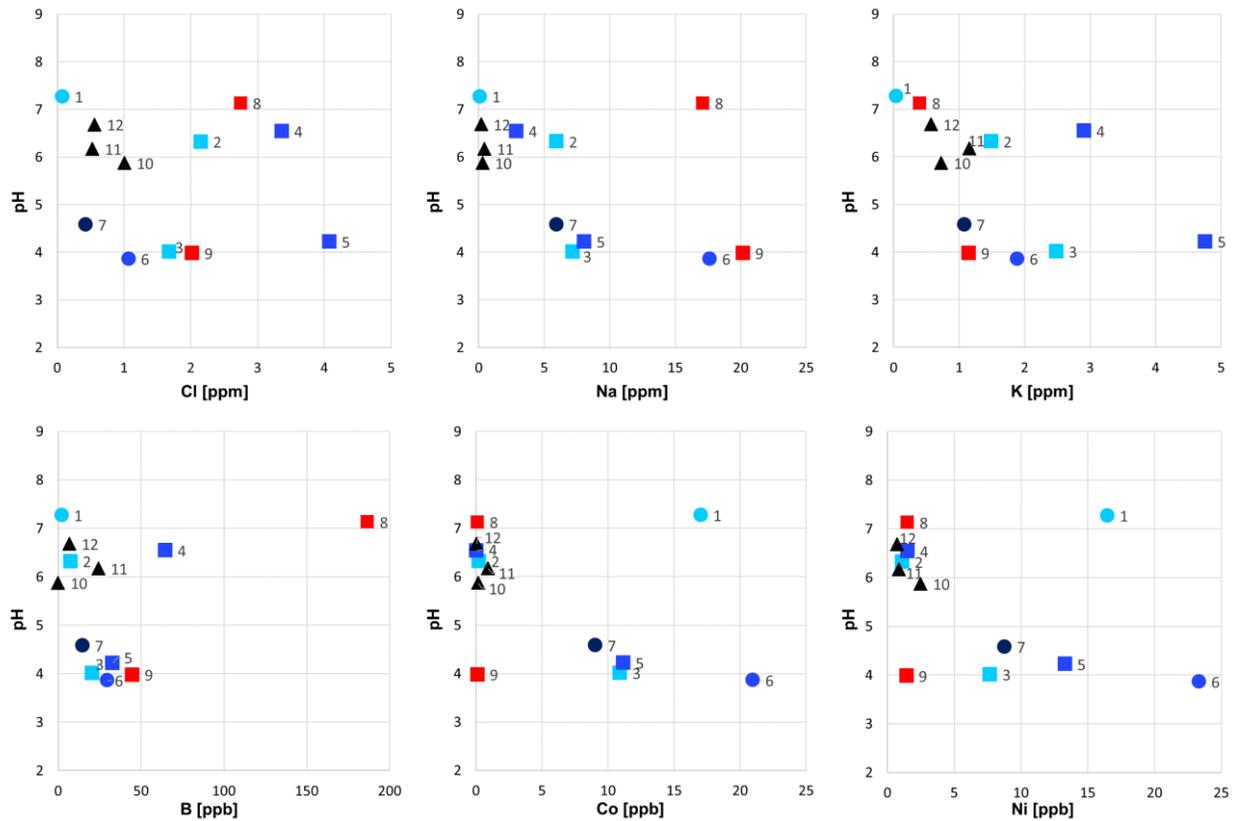


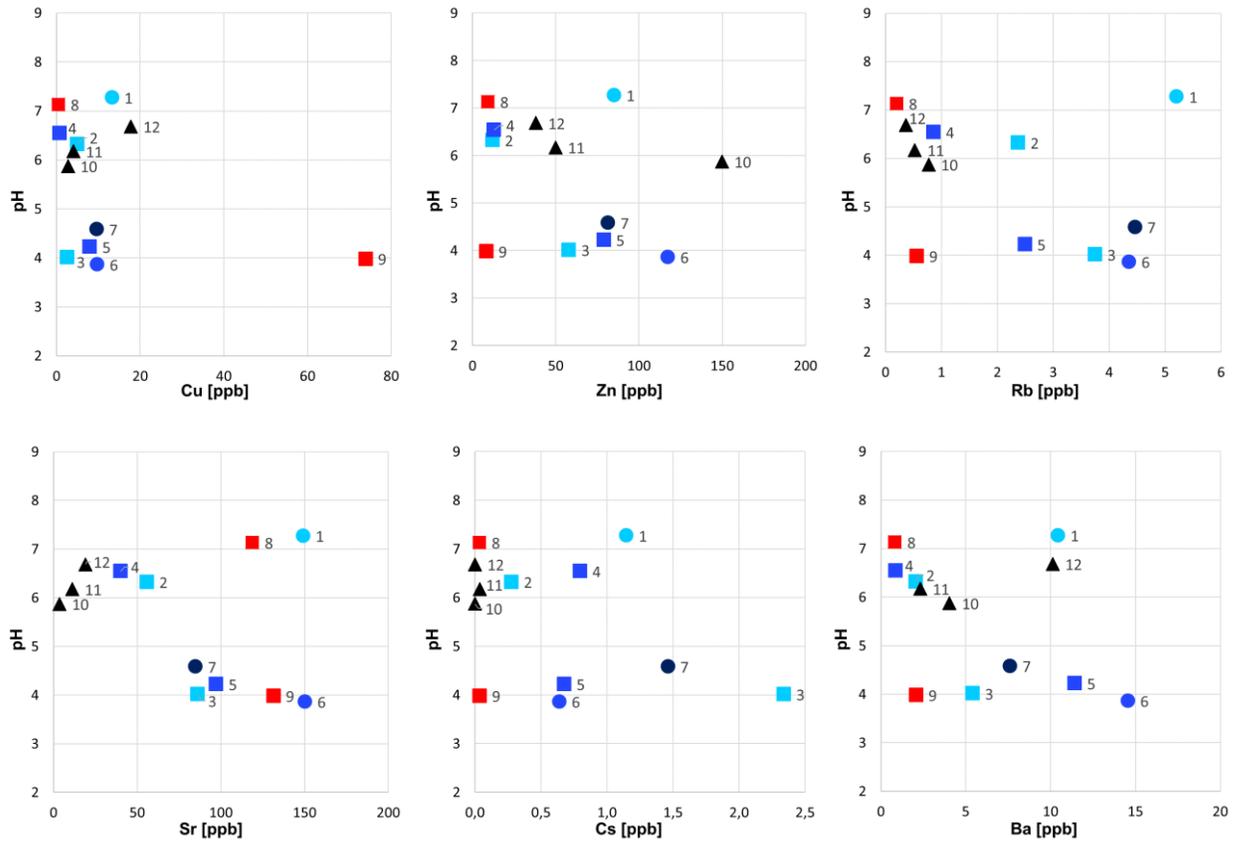
# Temperatura vs Elementos mayoritarios y minoritarios



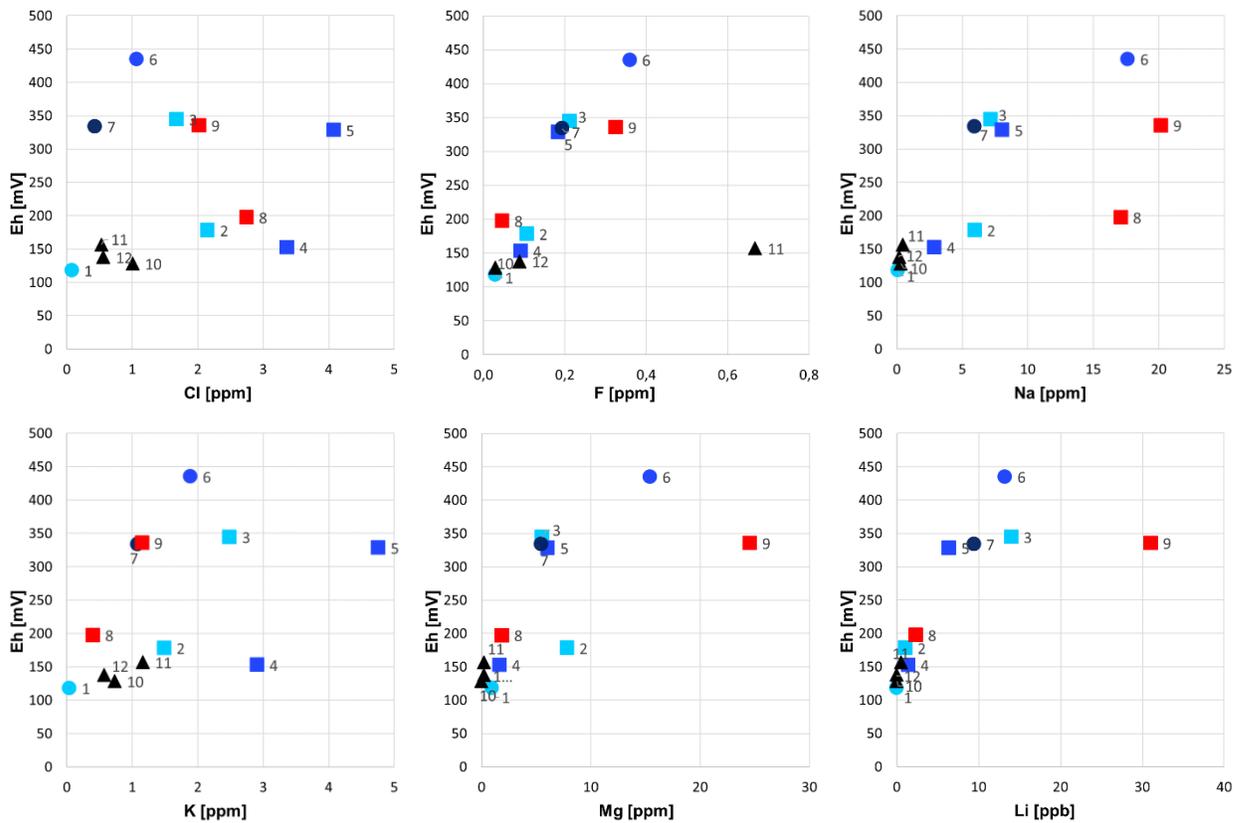


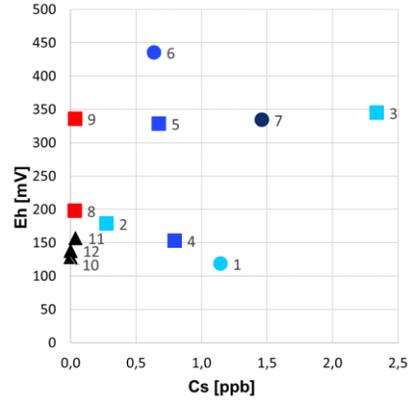
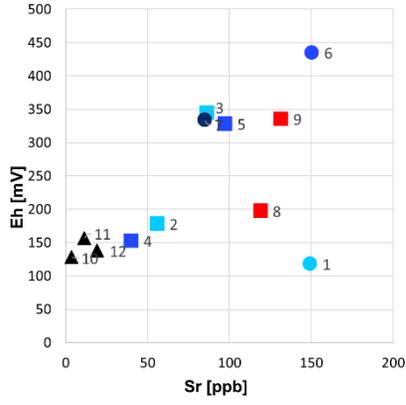
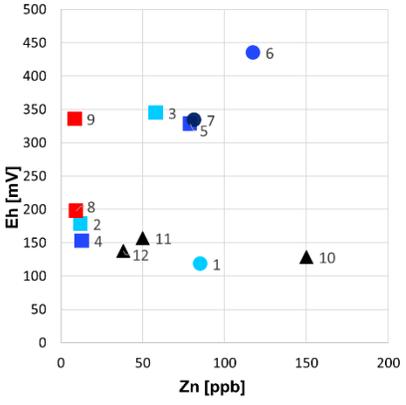
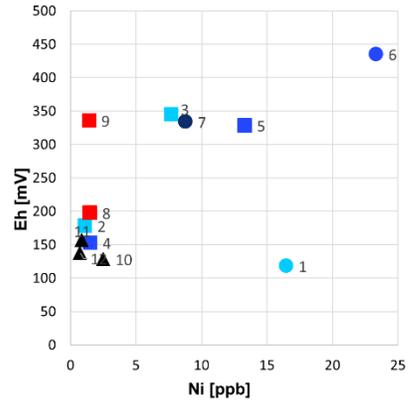
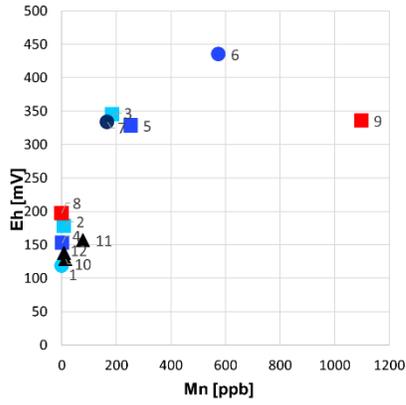
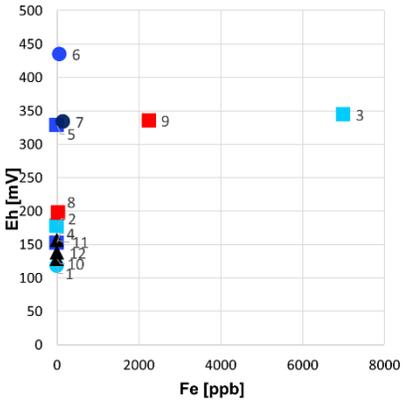
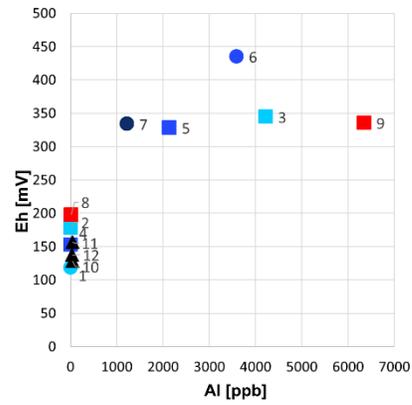
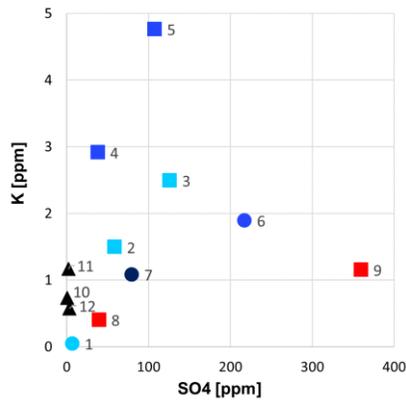
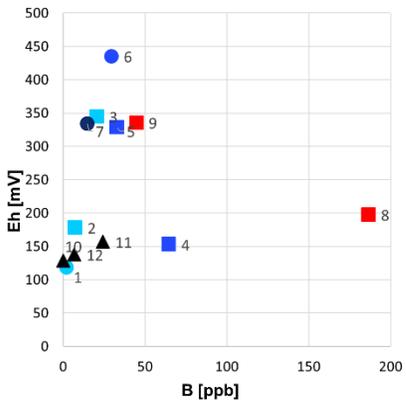
### pH vs Elementos mayoritarios y minoritarios



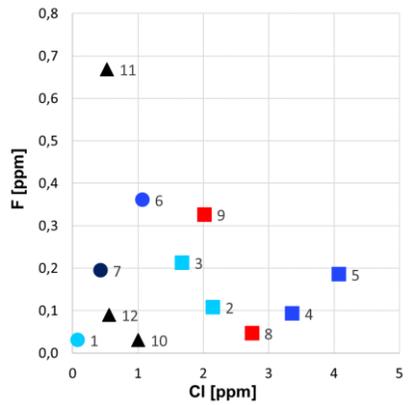
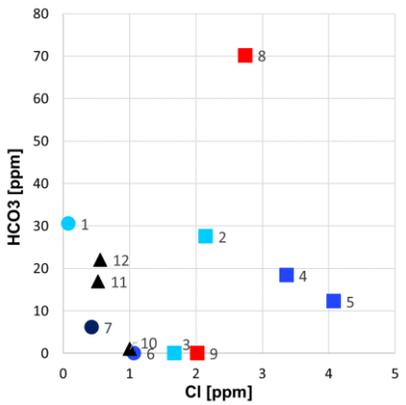
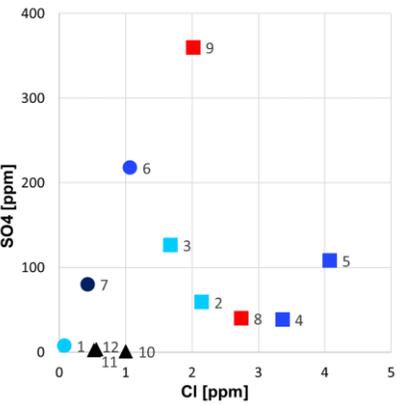


## Potencial Redox vs Elementos mayoritarios y minoritarios



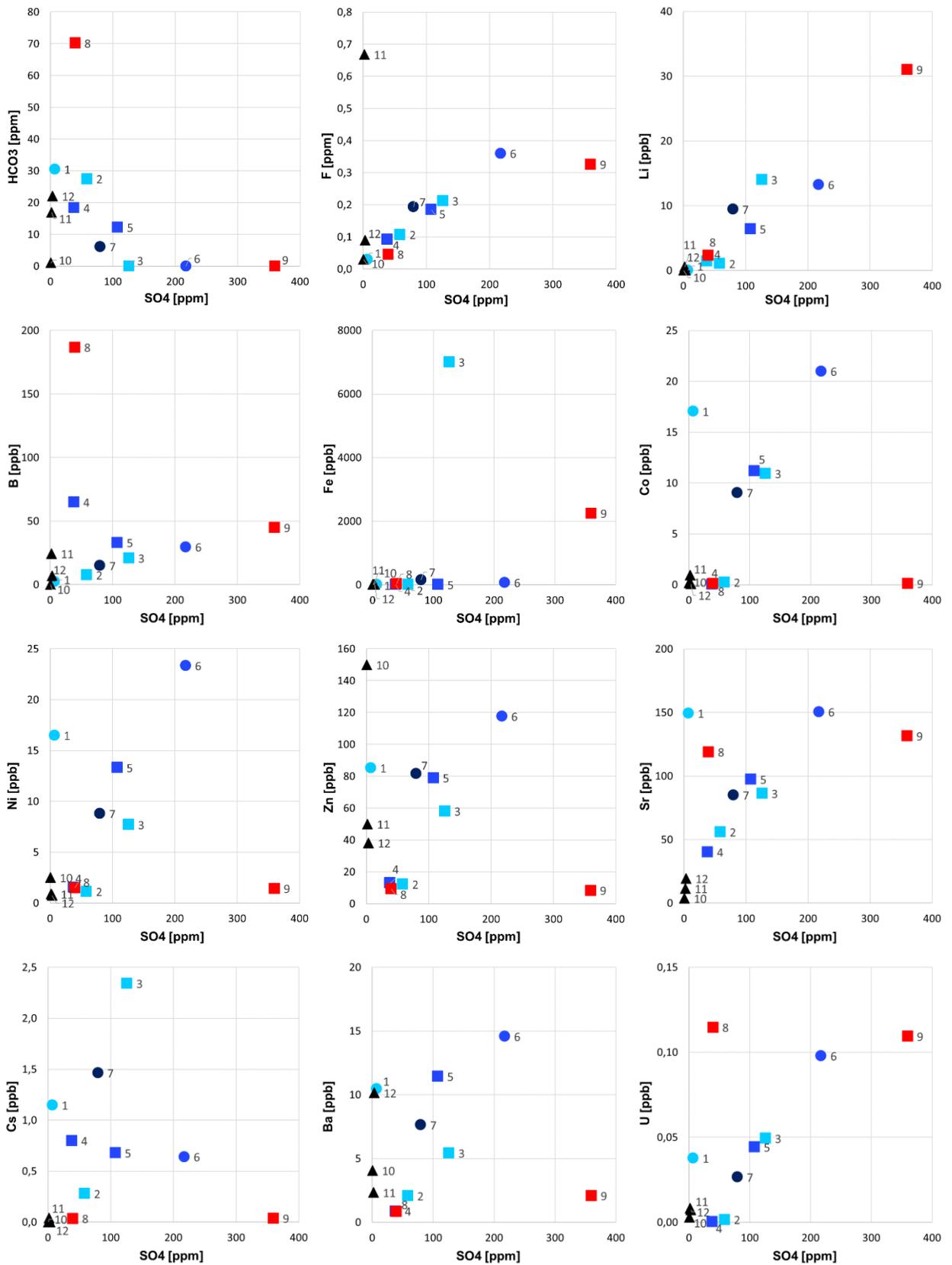


**Cl<sup>-</sup> vs Elementos mayoritarios y minoritarios**





## SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> vs Elementos mayoritarios y minoritarios



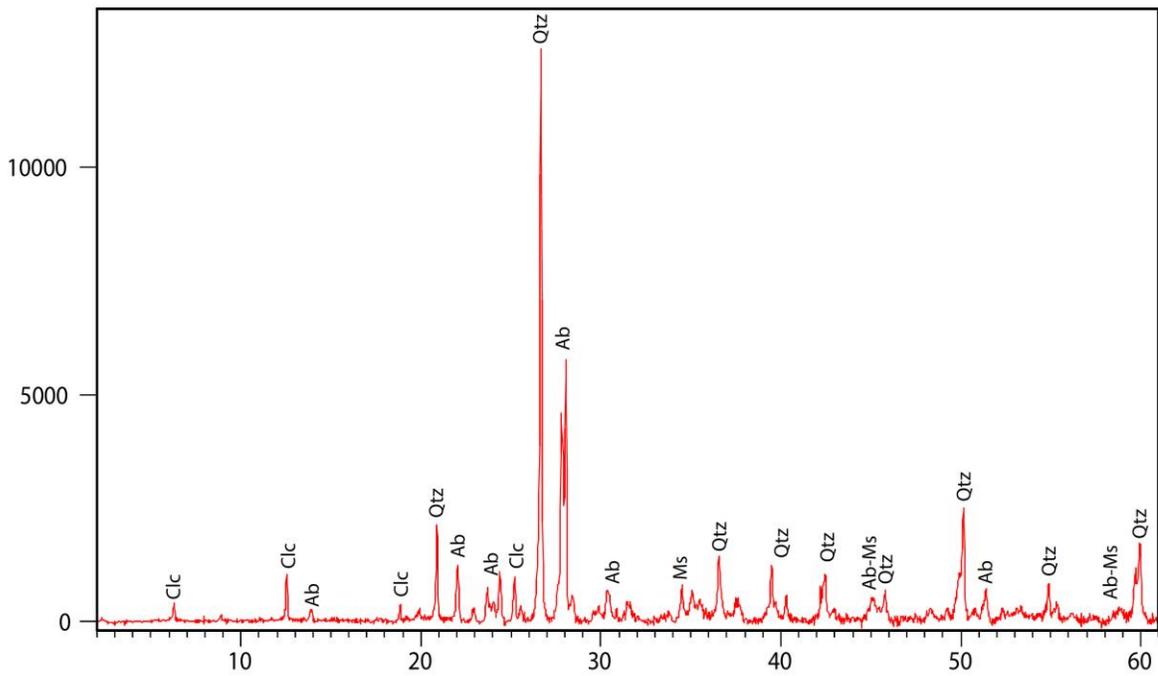
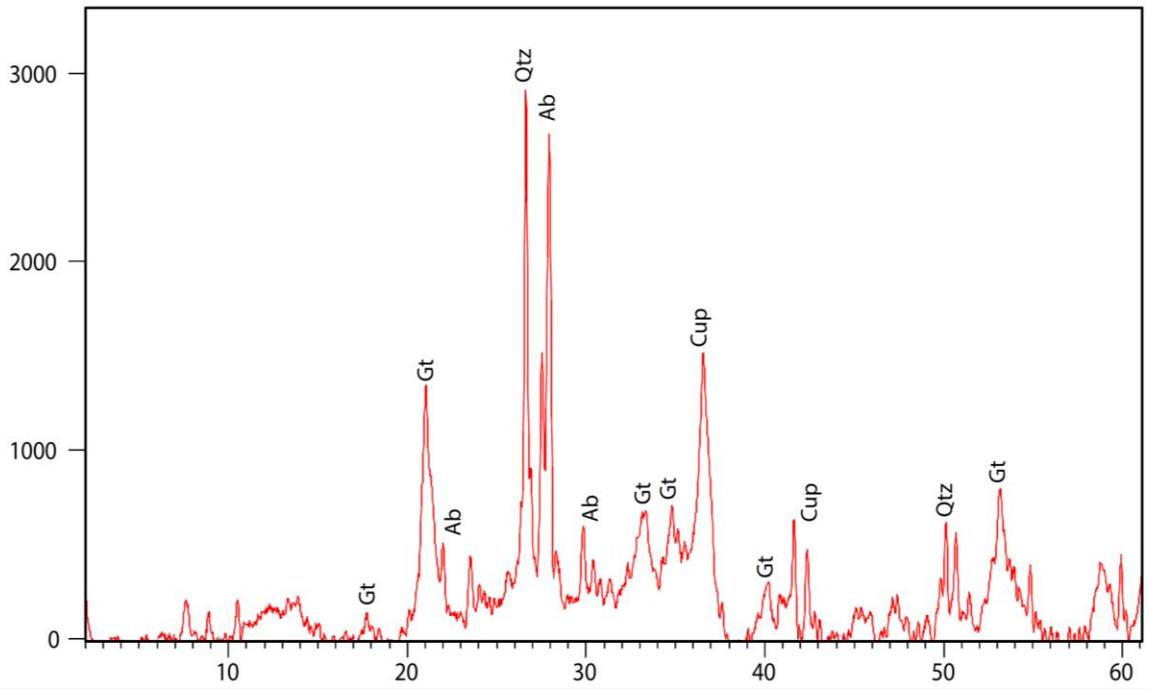
## **Anexo C**

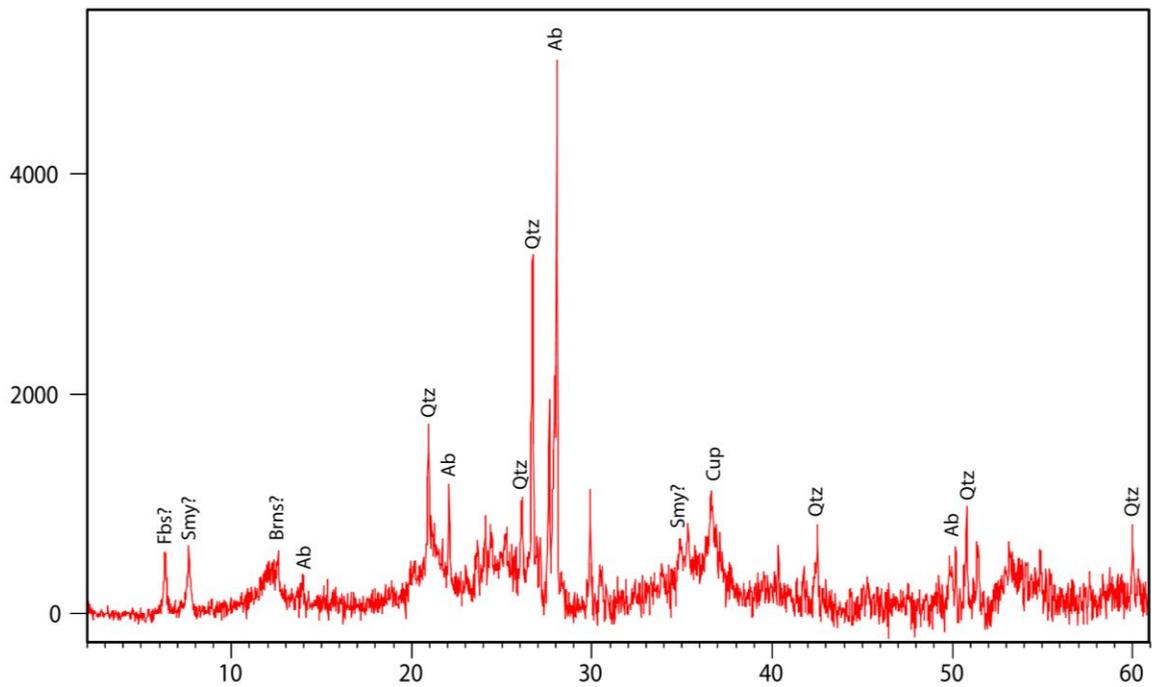
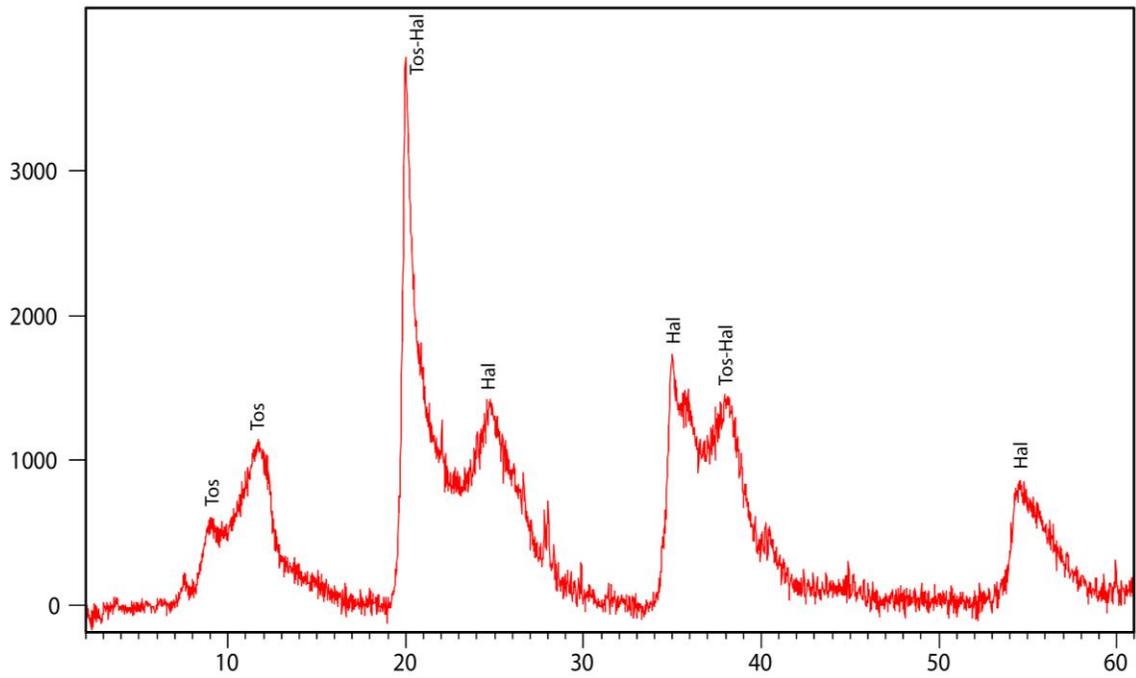
### **Resultados difracción de rayos X**

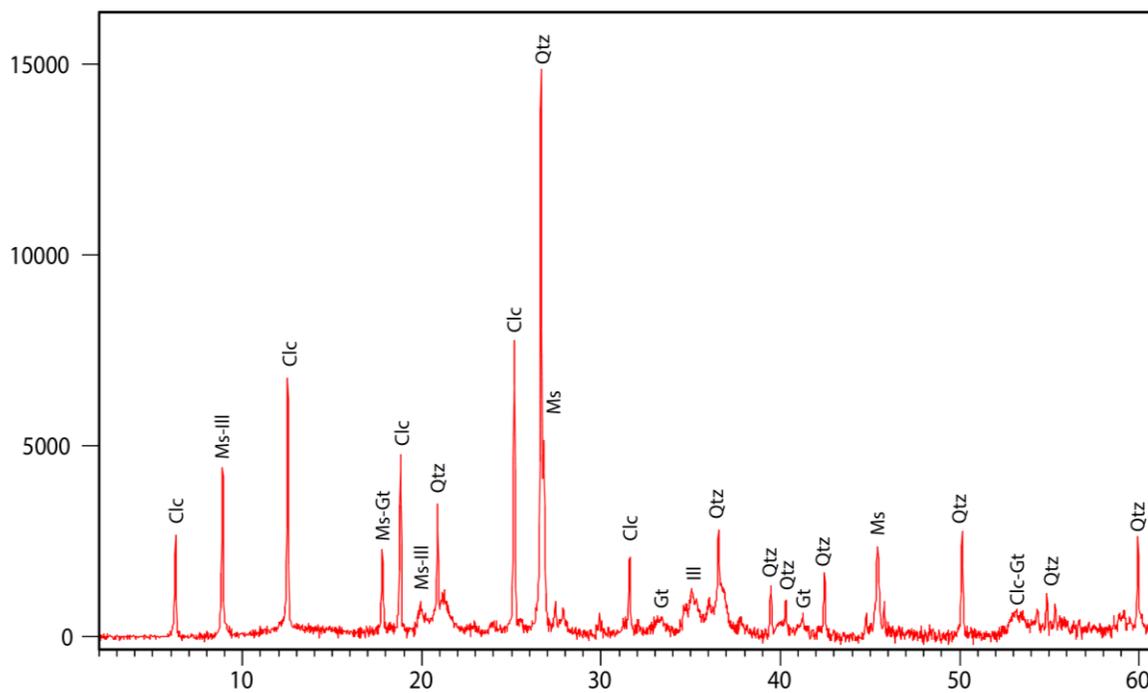
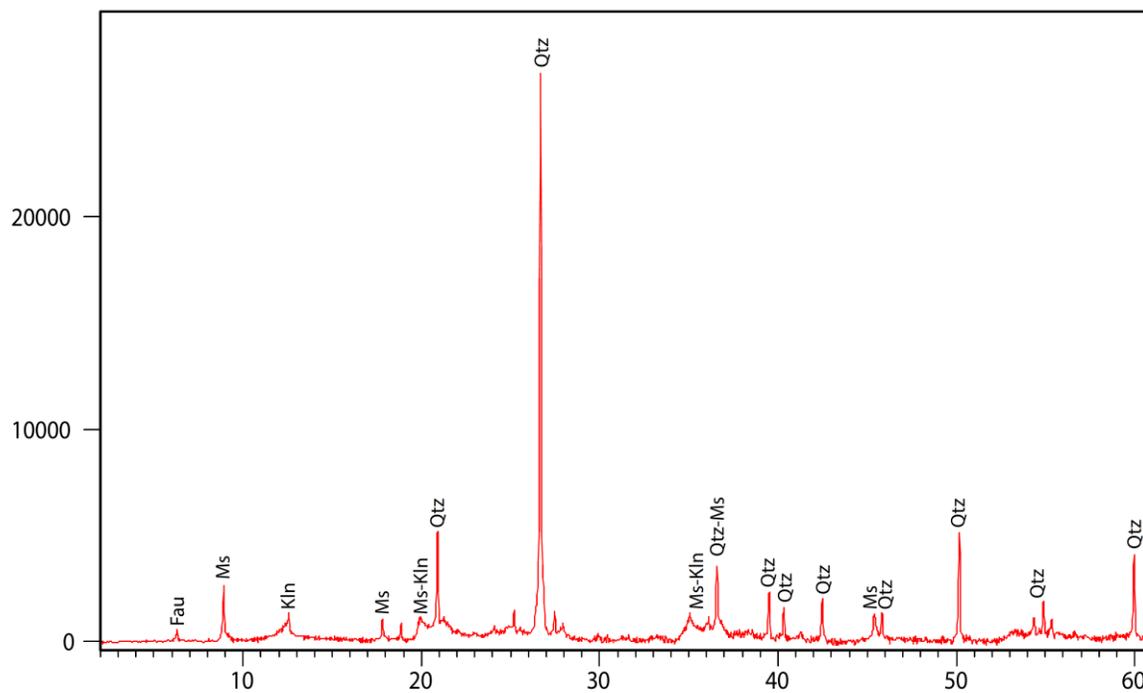
- Abreviaciones minerales utilizadas.
- Tabla resumen de los minerales identificados a través de DRX en las muestras.
- Análisis de difracción de rayos X realizado en difractómetro BRUCKER D8 ADVANCE.
- Difractogramas interpretados con el programa X'Pert HighScore Plus.

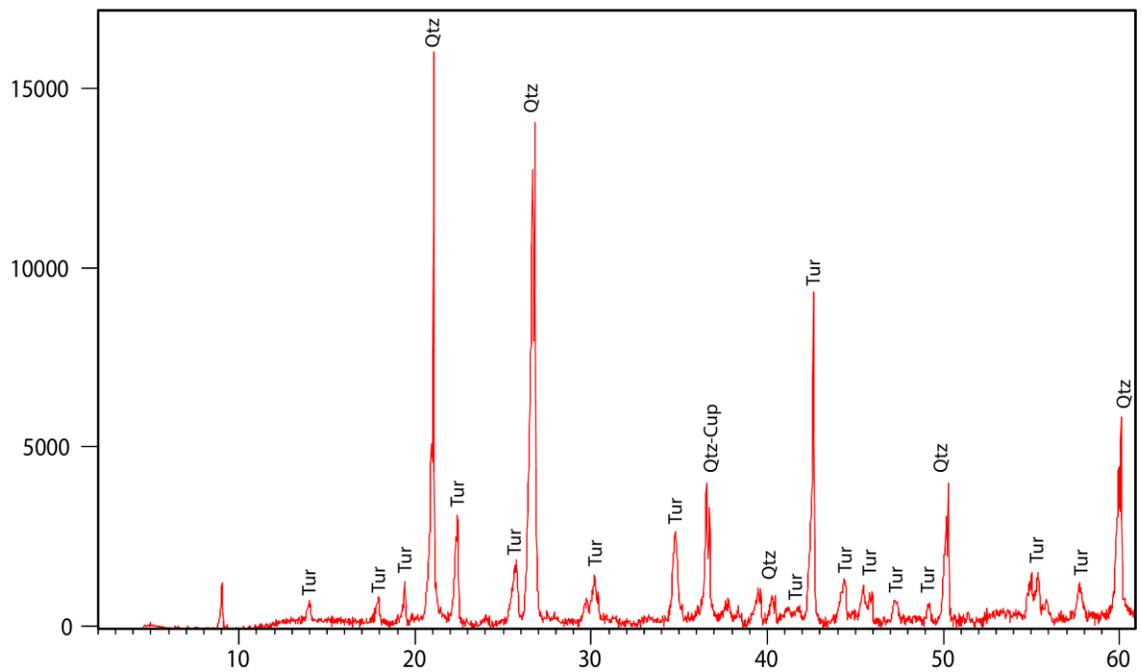
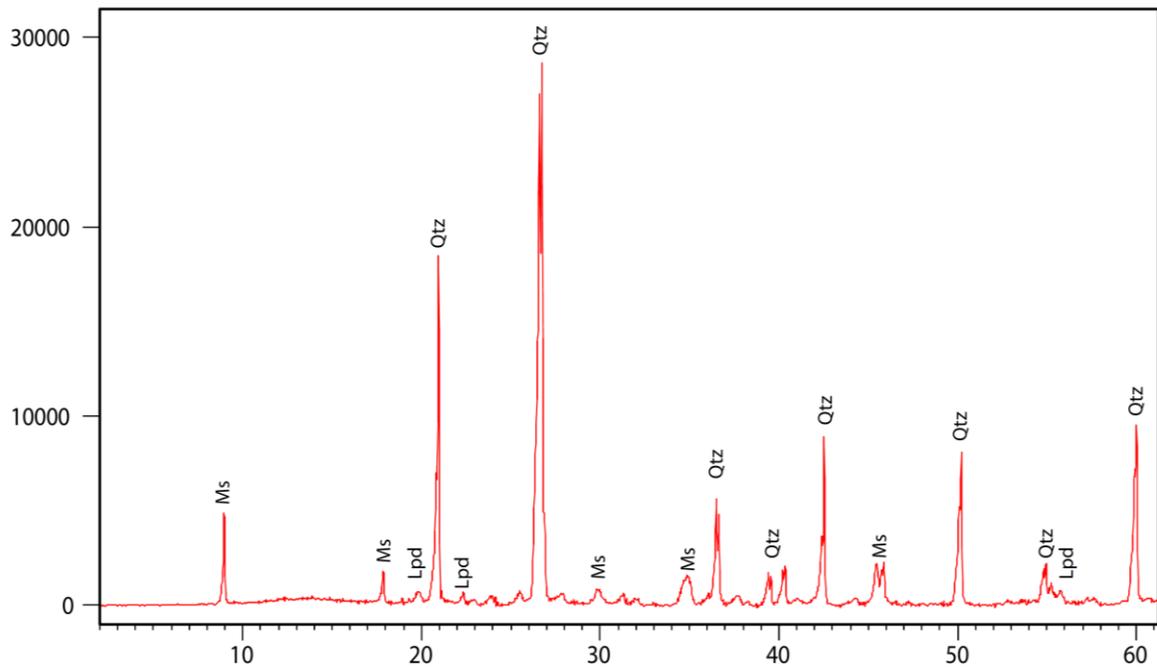
Abreviación	Mineral
Ab	Albita
Brns	Birnessita
Brg	Buergerita
Kln	Caolinita
Clc	Clinocloro
Qtz	Cuarzo
Cup	Cuprita
Fau	Faujasita
Fbs	Ferrobustamita
Glt	Glauconita
Gt	Goethita
Hal	Halloysita
Hem	Hematita
Ill	Illita
Lpd	Lepidolita
Ms	Moscovita
Rct	Rectorita
Smy	Smythita
Tos	Tosudita
Tur	Turmalina
Zwd	Zinnwaldita

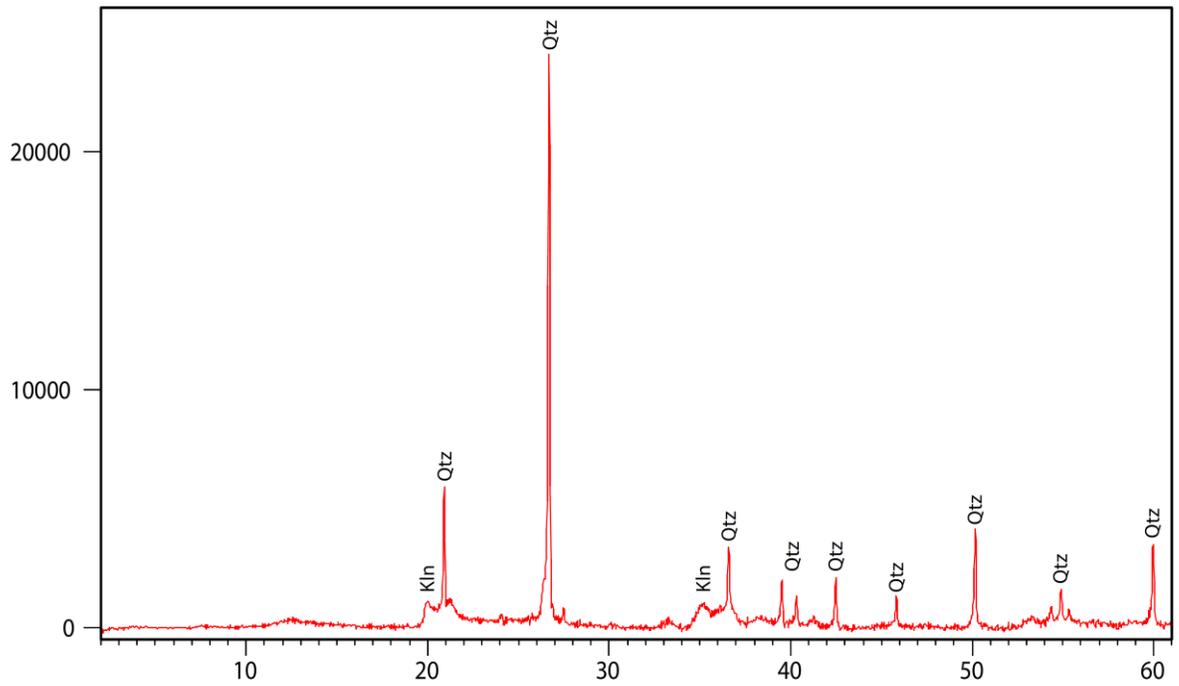
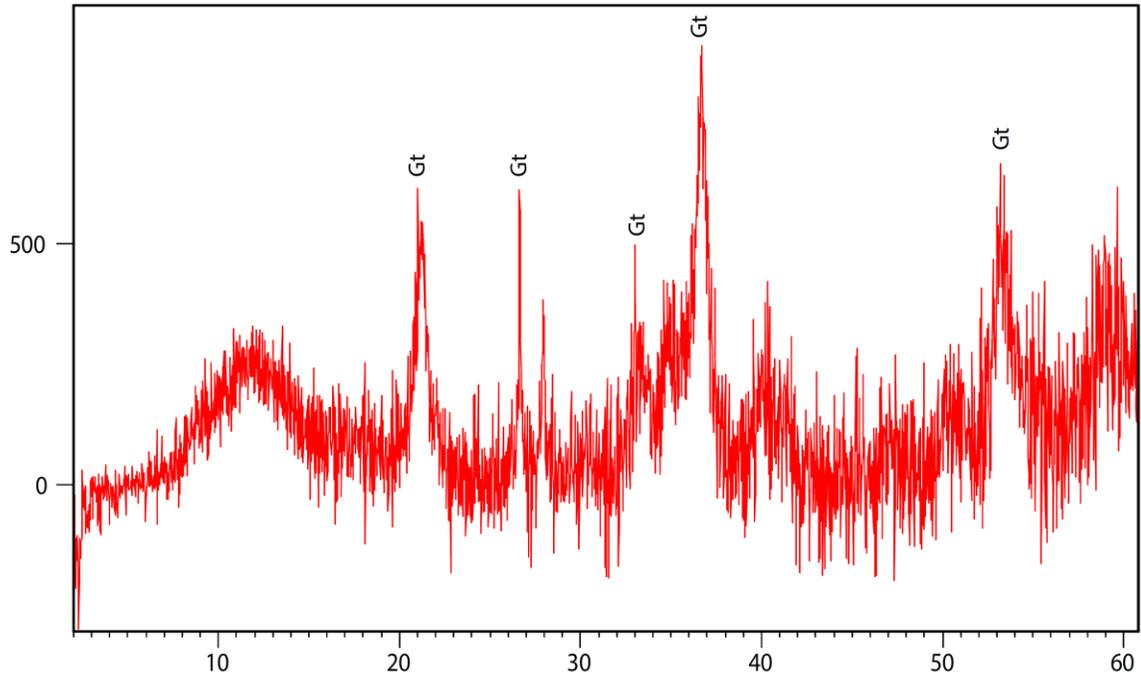
Id	Tipo	Zona	Qtz	Ab	Ms	Kln	Ill	Gt	Clc	Fau	Cup	Brns	Hal	Glt	Lpd	Hem	Zwd	Brg	Tos	Smy	Fbs	Tur	Rct
SA_1	Roca total	Sky El Arpa	x	x				x			x												
SA_2	Roca total	Sky El Arpa	x	x	x				x														
SA_3	Roca total	Sky El Arpa											x						x				
SA_4	Roca total	Sky El Arpa	x	x							x	x									x		
SA_5	Roca total	Sky El Arpa	x		x	x				x													
SA_6	Roca total	Sky El Arpa	x		x		x	x	x														
SA_7	Roca total	Sky El Arpa	x		x									x									
SA_8	Roca total	Sky El Arpa	x								?												x
MA_1	Roca total	Manchón Amarillo						x															
MA_2	Roca total	Manchón Amarillo	x			x																	
MA_3	Roca total	Manchón Amarillo	x	x		x																	
MA_4	Roca total	Manchón Amarillo	x	x								x											
MA_5	Roca total	Manchón Amarillo	x	x			x						?										
MA_6	Roca total	Manchón Amarillo	x	x										x									x
MA_7	Roca total	Manchón Amarillo	x	x	x																		
MA_8	Roca total	Manchón Amarillo	x		x		x							x									
MA_9	Roca total	Manchón Amarillo	x	x		x							?										
MA_10	Roca total	Manchón Amarillo	x	x				x						x	x								
MA_11	Roca total	Manchón Amarillo	x													x	x						
MA_12	Roca total	Manchón Amarillo	x		x																		
MA_13	Fracción < 2µm	Manchón Amarillo				x	x									?							

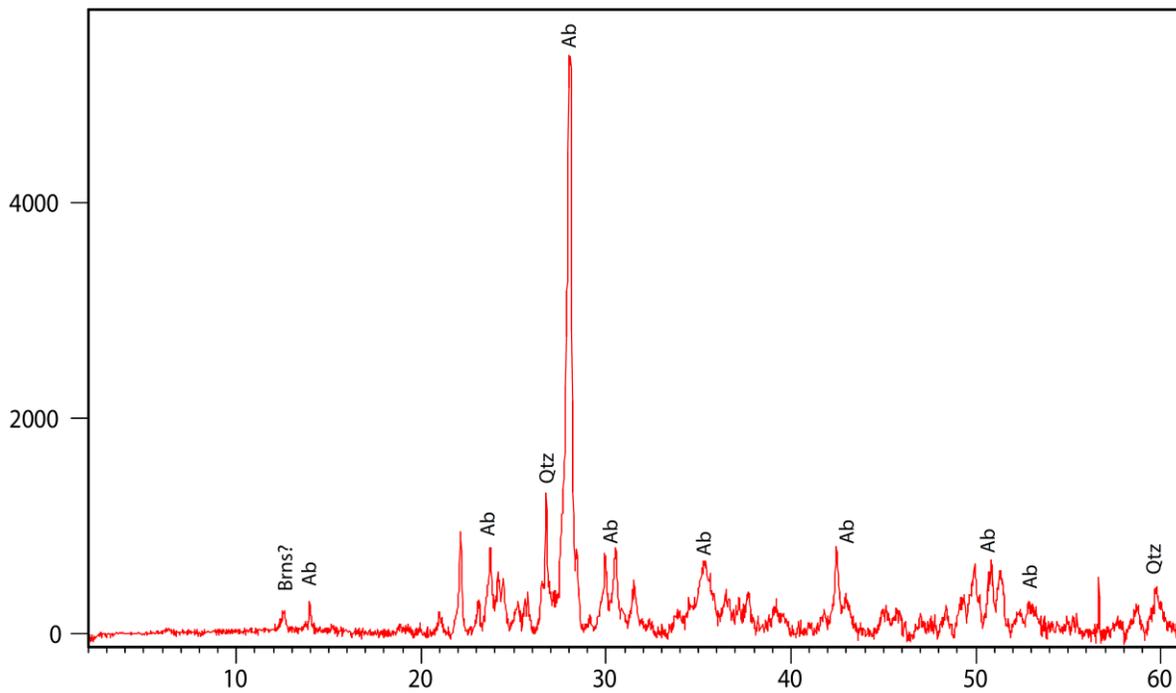
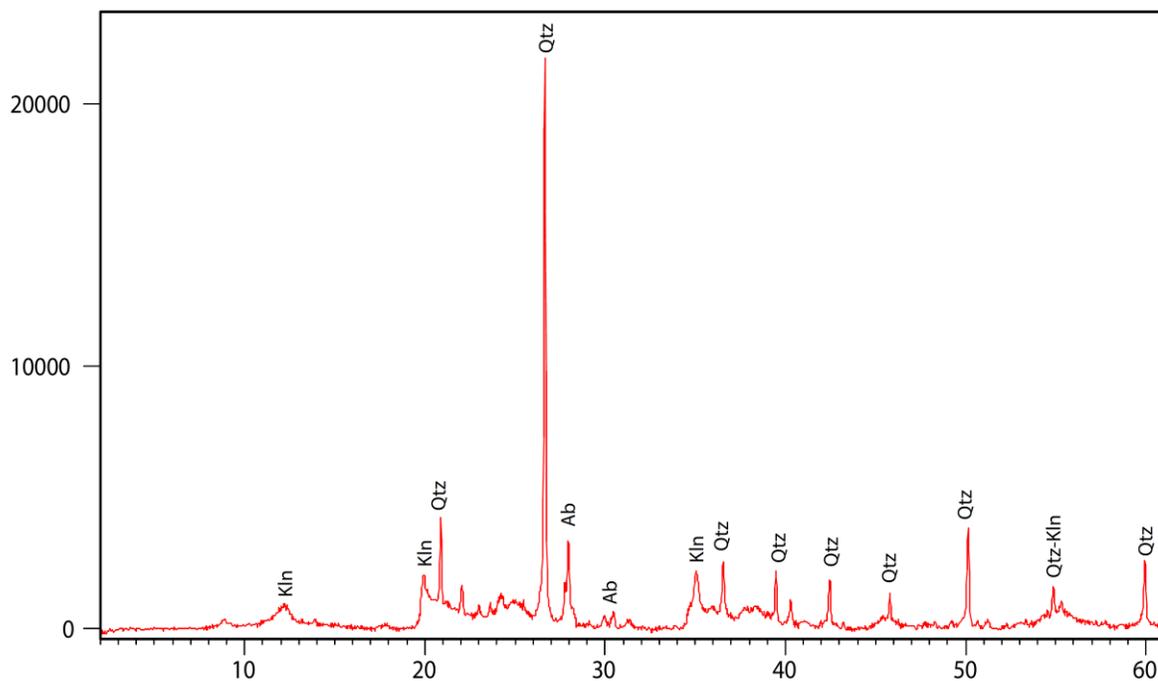


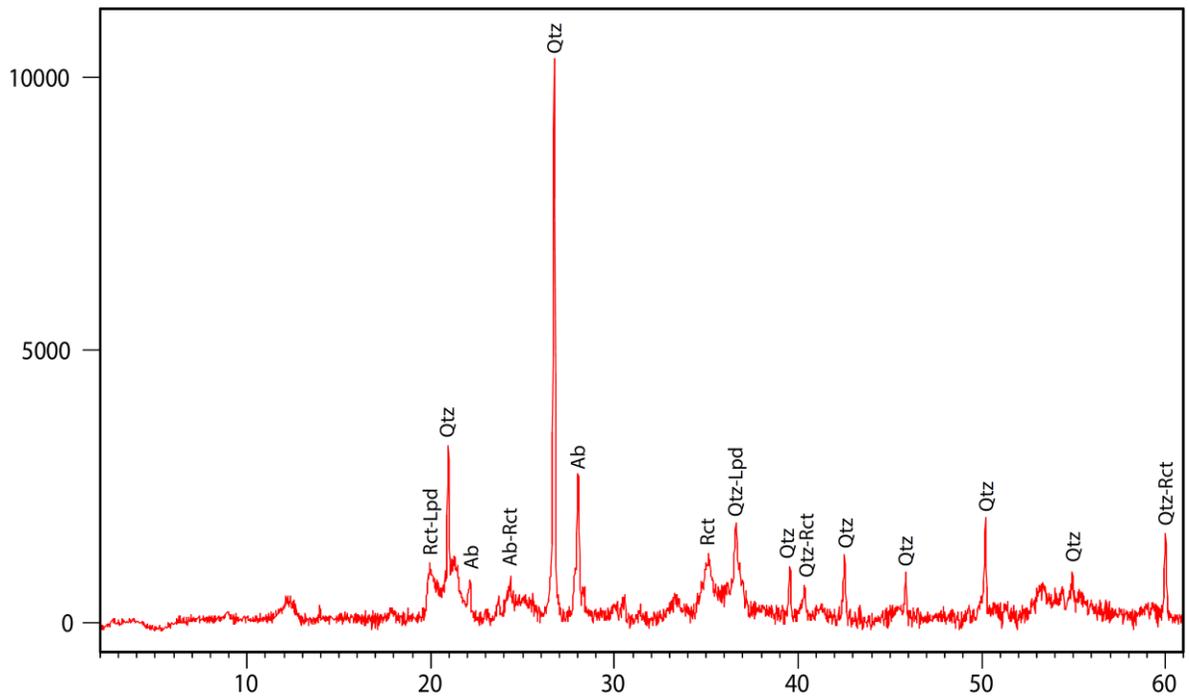
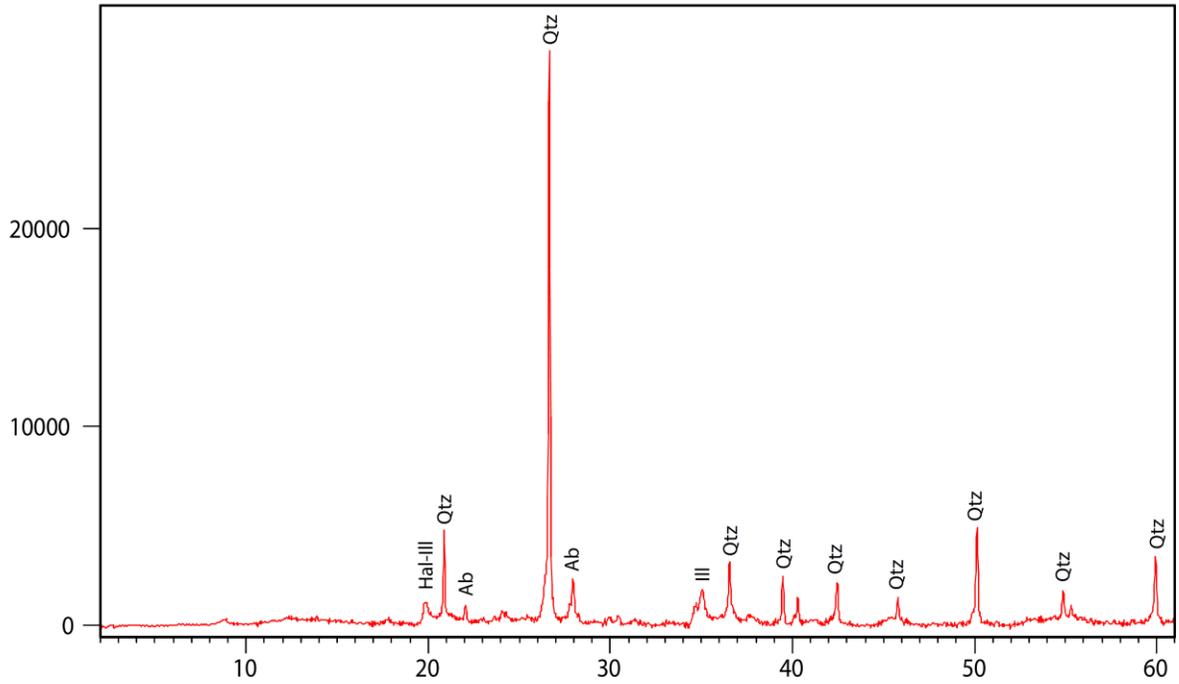


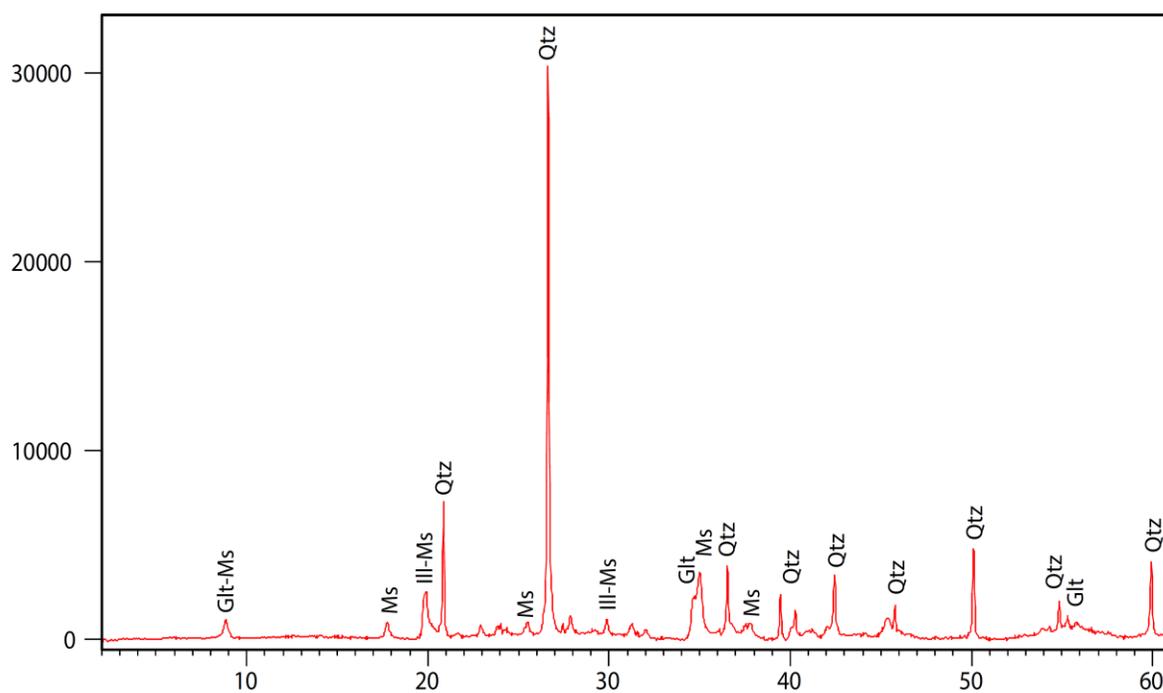
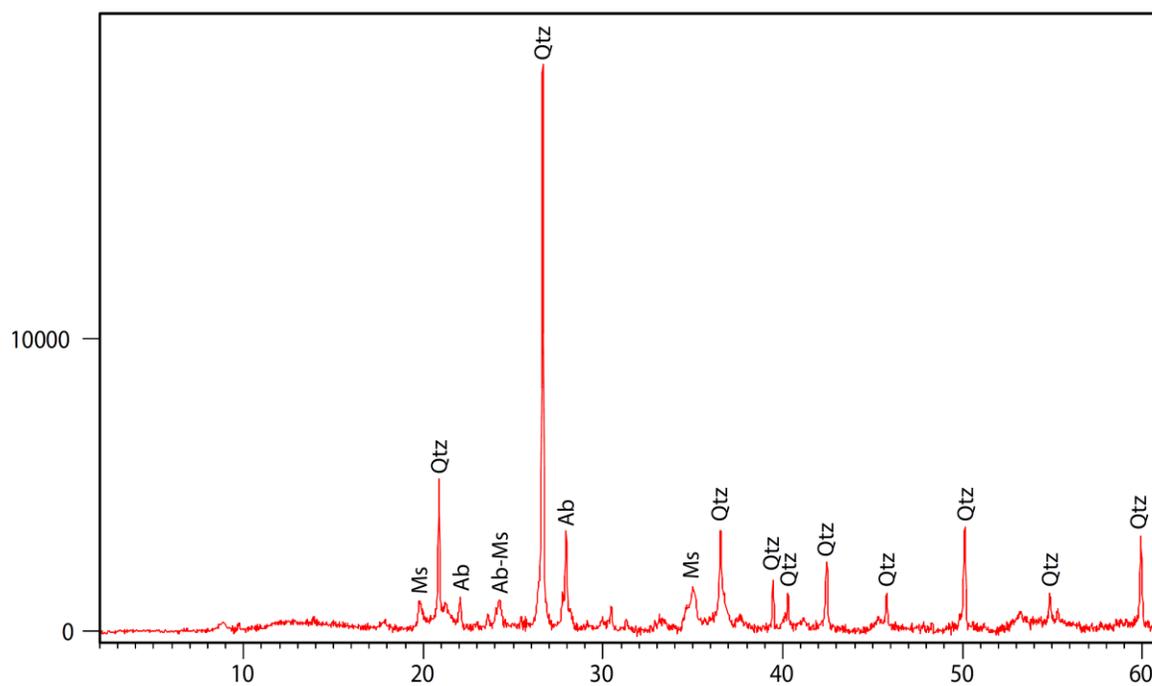


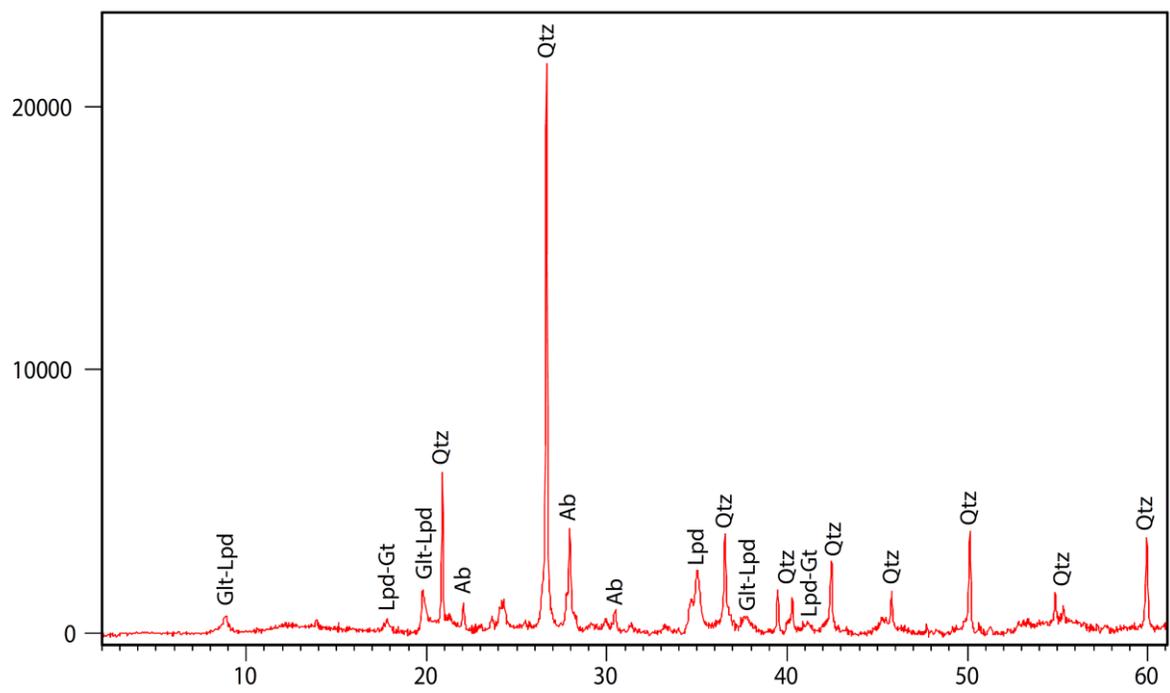
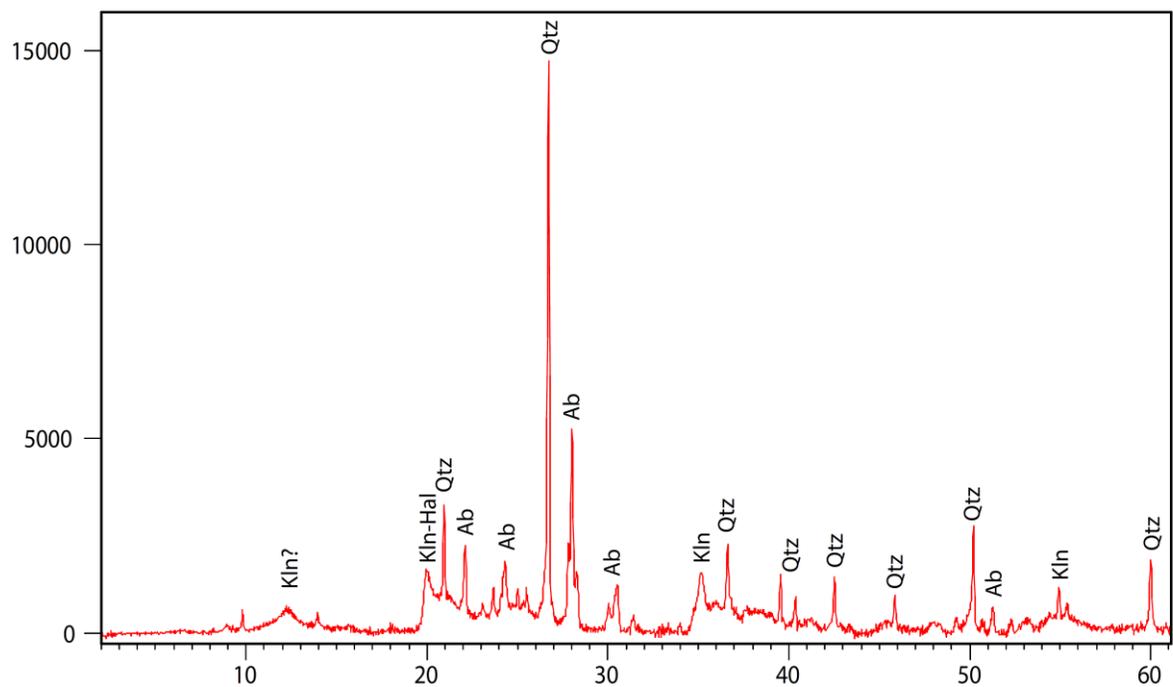


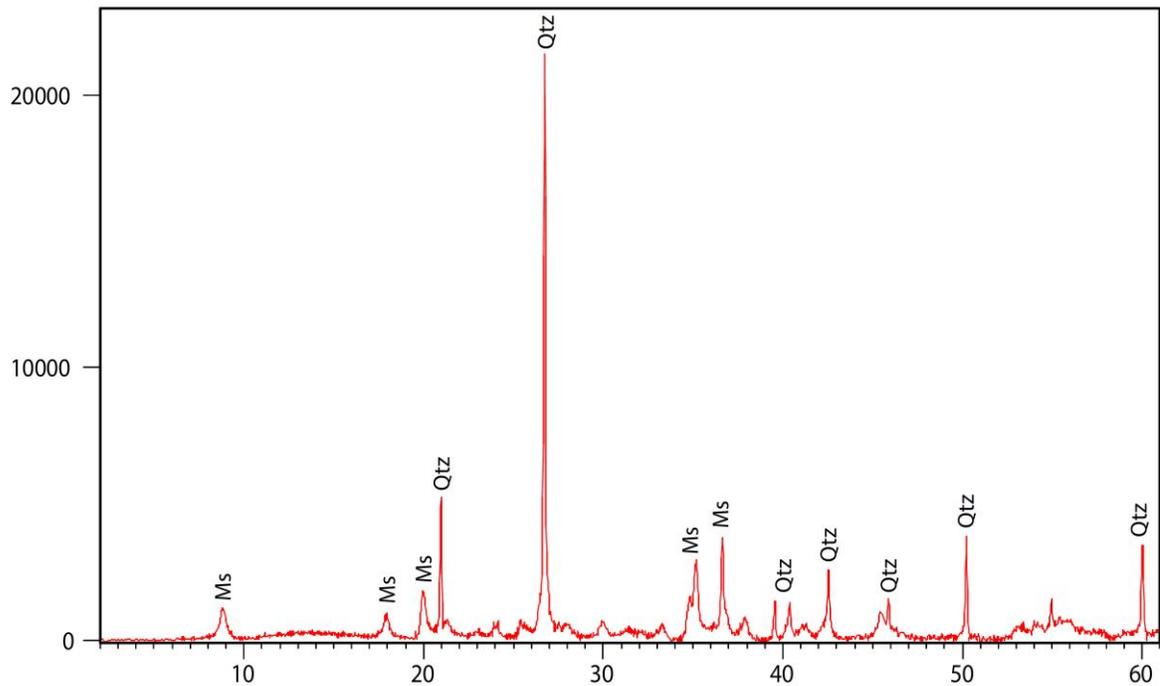
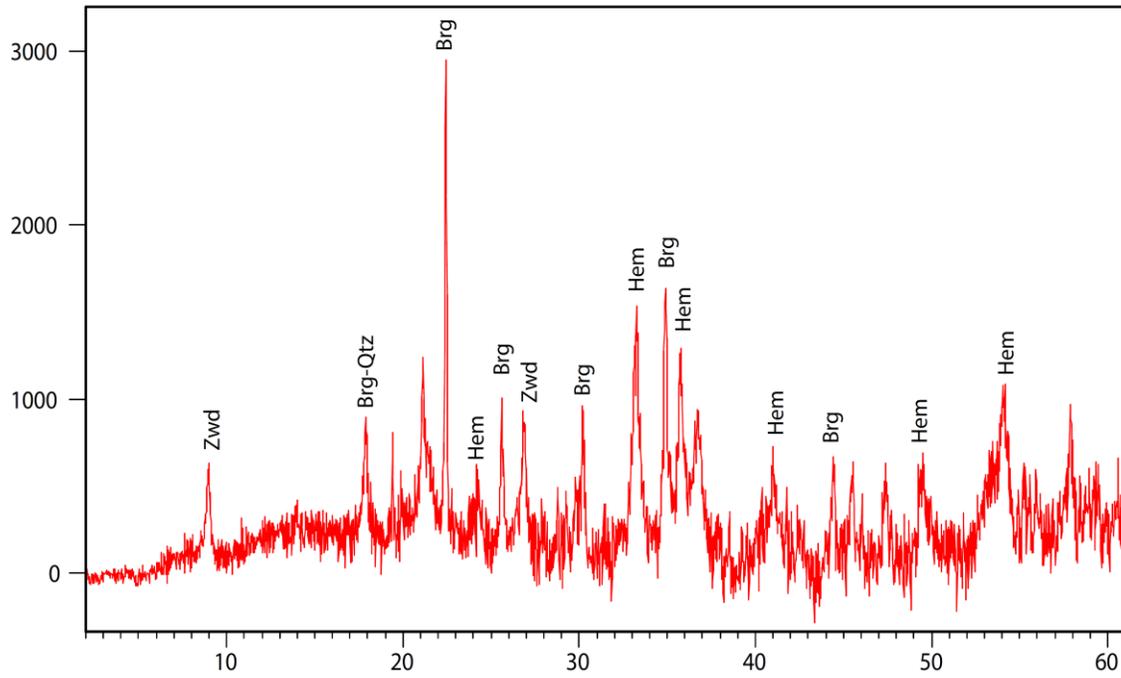


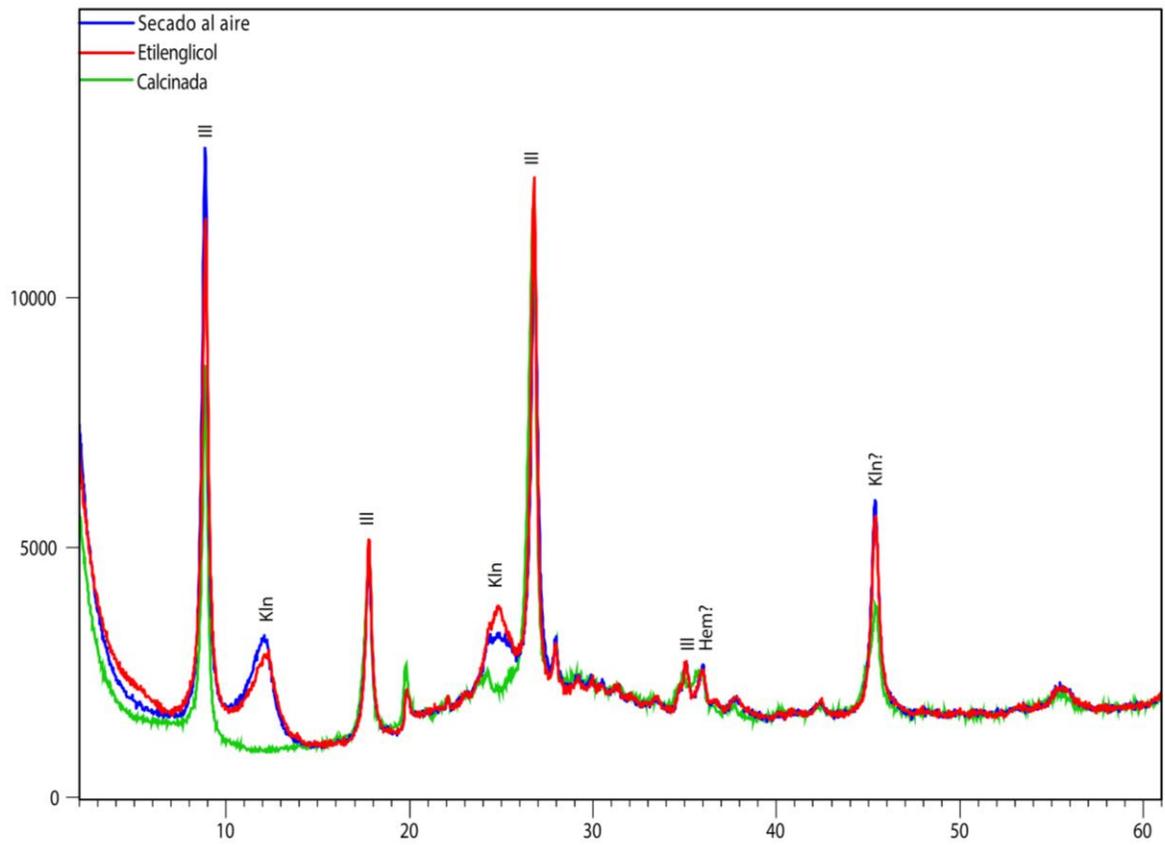












## Anexo D

### Resultados química de rocas

- Zona y coordenadas de las muestras
- Óxidos en %
- Aniones y cationes en mg/kg
- Elementos traza en  $\mu\text{g/g}$

Muestra	MT-3 (Sólido)	MT-4 (Sólido)	MT-6 (Sólido)	MT-8 (Sólido)	MT-9 (Sólido)		GeoReM Jochum et al			USGS Certificate of analysis		
							Valor	incertidumbre	error	Valor	incertidumbre	error
							%	%	%	%	%	%
Na2O	2,99	0,98	0,94	2,5	0,19	4,04	4,204	0,21	-3,9	4,19	0,13	-3,6
K2O	1,37	1,33	1,27	0,033	0,13	2,84	2,898	0,033	-1,9	2,88	0,11	-1,3
CaO	4,64	0,06	0,15	6,43	0,03	4,70	5,15	0,1	-8,7	5,2	0,13	-9,6
MgO	1,4	0,23	0,44	4,19	0,41	1,70	1,8	0,15	-5,6	1,79	0,03	-5,0
Fe	3,17	4,10	12,69	8,03	1,17	4,15	4,74		-12,5	4,68	0,09	-11,4
Fe2O3	4,53	5,87	18,15	11,49	1,68	5,95	6,78	0,17	-12,2	6,69	0,13	-11,1
SiO2	68,15	60,20	43,27	58,56	92,88	65,55	59,14	0,58	10,8	59,3	0,7	10,5
Si						30,64	27,65		10,8	27,7	0,35	10,6
Al	7,82	11,33	9,92	8,74	1,61	8,50	9,01		-5,7	8,95	0,11	-5,1
Al2O3	14,79	21,42	18,77	16,52	3,06	16,05	17,03	0,12	-5,8	16,91	0,21	-5,1
MnO	0,1398	0,0073	0,0229	0,5177	0,0067	0,09	0,1004	0,0026	-7,5			
Suma óxidos	98,01	90,09	83,01	100,24	98,39	100,93						

Muestra	MT-3 (Sólido)	MT-4 (Sólido)	MT-6 (Sólido)	MT-8 (Sólido)	MT-9 (Sólido)	
Zona	Manchón Amarillo	Manchón Amarillo	Manchón Amarillo	Sky El Arpa	Sky El Arpa (rodado)	
coordenadas	358100 mE	357754 mE		361348 mE	361821 mE	
	6382214 mN	6382247 mN		6385850 mN	6385438 mN	
<b>Aniones</b>	conc.	conc.	conc.	conc.	conc.	Std AGV-2
	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	
Fluoruro	< 0,03	< 0,03	1,269	1,730	0,496	
Cloruro	42,61	105,80	41,47	49,15	45,23	
Sulfato	9,36	933,26	554,19	58,13	17,76	
Bromuro	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	
Nitrato	8,936	113,351	8,195	5,659	10,034	
Fosfato	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	
<b>Cationes</b>	conc.	conc.	conc.	conc.	conc.	conc.
	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg
Na	22171,31	7283,83	6975,61	18558,14	1410,92	30000,00
K	11399,40	11052,63	10551,22	273,49	1052,52	23600,00
Ca	33147,41	403,20	1059,22	45920,93	245,97	33600,00
Mg	8450,20	1385,34	2677,07	25258,60	2500,66	10280,00
Fe	31667,33	41032,89	126921,95	80337,21	11747,35	41480

Muestra	MT-3 (Sólido)	MT-4 (Sólido)	MT-6 (Sólido)	MT-8 (Sólido)	MT-9 (Sólido)	GeoReM Jochum et al		USGS Certificate of analysis			
	ug/g	ug/g	ug/g	ug/g	ug/g	Valor	incertidumbre	error	Valor	incertidumbre	error
Li	22,95	5,81	6,32	3,71	8,02	10,93	10,80	0,21	11		%
Be	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	1,93	2,209	0,066	2,3	0,4	-12,6
B	58,93	14,67	8,75	<8,5	2067,63	<8,5	6,45	0,52	-		-16,1
Al	78172	113269	99247	87351	16098	84957,38					
V	75,00	163,87	172,97	290,60	33,23	111,82	118,5	1,2	120	5	-5,6
Cr	53,92	11,97	50,49	51,57	43,62	13,89	16,22	0,72	17	2	-14,4
Fe AAS	31667	41033	126922	80337	11747	41480	47400				
Mn	1081,94	55,82	176,76	4008,63	51,25	718,72	780		770	20	-7,9
Co	20,52	2,60	8,68	32,99	35,58	14,72	15,46	0,5	16	1	-4,8
Ni	28,81	1,91	7,26	30,34	15,20	17,76	18,87	0,41	19	3	-5,9
Cu	27,37	35,48	104,20	51,17	58,42	49,44	51,51	0,65	53	4	-4,0
Zn	77,35	23,53	37,12	147,17	20,39	89,78	86,7	1,2	86	8	3,6
As	36,85	37,48	380,26	8,25	60,28	<0,6	0,67	0,13	n.r.		
Rb	22,38	30,52	48,98	<0,04	3,00	64,38	67,79	0,66	68,6	2,3	-5,0
Sr	647,90	228,73	75,79	307,97	54,24	616,74	659,5	5,7	658	17	-6,5
Zr	132,53	65,97	2,14	9,52	10,90	221,73	232	2,3	230	4	-4,4
Mo	<2	<2	125,68	<2	50,09	2,50	2	0,11			25,2
Ag	<0,60	<0,60	<0,60	<0,60	<0,60	<	0,09		n.r.		
Cd	<0,40	<0,40	<0,40	<0,40	<0,40	0,40	0,184	0,069	n.r.		114,7
Sn	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	1,81	1,83	0,25	2,3	0,4	-1,1
Sb	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	12,09	-	0,458	0,061	0,6		
Cs	29,86	10,40	5,43	0,79	0,38	1,22	1,173	0,018	1,16	0,08	3,7
Ba	447,83	517,51	215,18	71,73	26,14	1094,26	1134	8	1140	32	-3,5
W						<0,4	0,553	0,094			
Pb	15,25	6,32	6,59	5,68	10,81	12,83	13,14	0,15	13	1	-2,4
U	0,691	0,499	0,913	0,299	0,586	1,93	1,885	0,015	1,88	0,16	2,5

# Anexo E

## Resultados modelos Inversos

- Tabla de resumen de resultados del modelo inverso 1
- Tabla de resumen de resultados del modelo inverso 2

## Resultados Modelo Inverso 1

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	9.015e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>
Albite	8.783e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
Diopside	1.011e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
Pyrite	1.927e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS <sub>2</sub>
Magnetite	-3.701e+01	0.000e+00	0.000e+00	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
Goethite	1.110e+02	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Kaolinite	-1.267e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>
Quartz	-2.655e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO <sub>2</sub>
Muscovite	2.943e-05	0.000e+00	0.000e+00	KAl <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>
Pyrolusite	2.000e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO <sub>2</sub>
O <sub>2</sub> (g)	-9.245e+00	0.000e+00	0.000e+00	O <sub>2</sub>

Redox mole transfers:	
Fe(2)	-3.701e+01
Mn(2)	-2.000e-05
S(-2)	3.855e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation):	-7.952e-01
Sum of delta/uncertainty limit:	1.205e+00
Maximum fractional error in element concentration:	1.400e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	9.015e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>
Albite	8.783e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
Diopside	1.011e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
Pyrite	1.927e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS <sub>2</sub>
Magnetite	-2.883e-02	0.000e+00	0.000e+00	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
Goethite	1.110e+02	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	-5.547e+01	0.000e+00	0.000e+00	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Kaolinite	-1.267e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>
Quartz	-2.655e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO <sub>2</sub>
Muscovite	2.943e-05	0.000e+00	0.000e+00	KAl <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>
Pyrolusite	2.000e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO <sub>2</sub>

Redox mole transfers:	
Fe(2)	-2.694e-02
Mn(2)	-2.000e-05
S(-2)	3.855e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation):	-7.952e-01
Sum of delta/uncertainty limit:	1.205e+00
Maximum fractional error in element concentration:	1.400e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Albite	6.625e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	1.040e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.624e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Magnetite	1.574e+03	0.000e+00	0.000e+00	Fe3O4
Goethite	-4.721e+03	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Kaolinite	1.862e-04	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-2.315e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-2.793e-04	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
O2(g)	3.934e+02	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-2.133e-03	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:	
Fe(2)	1.574e+03
S(-2)	3.248e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation):	2.930e+02
Sum of delta/uncertainty limit:	8.399e+00
Maximum fractional error in element concentration:	6.200e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	8.496e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	8.631e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	1.011e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.909e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Magnetite	7.604e+01	0.000e+00	0.000e+00	Fe3O4
Goethite	-2.281e+02	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Kaolinite	-1.164e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-2.628e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Pyrolusite	1.925e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
O2(g)	1.902e+01	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-1.497e-04	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:	
Fe(2)	7.604e+01
Mn(2)	-1.925e-05
S(-2)	3.817e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation):	1.922e+01
Sum of delta/uncertainty limit:	7.098e+00
Maximum fractional error in element concentration:	6.200e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	-4.311e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	-4.875e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	8.693e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Magnetite	1.105e+04	0.000e+00	0.000e+00	Fe3O4
Goethite	-3.316e+04	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Kaolinite	7.659e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Muscovite	-2.101e-03	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	-5.590e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
O2(g)	2.763e+03	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-1.468e-02	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	1.105e+04
Mn(2)	5.590e-05

Sum of residuals (epsilons in documentation): 1.685e+03  
Sum of delta/uncertainty limit: 1.516e+01  
Maximum fractional error in element concentration: 6.200e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Albite	7.358e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	1.152e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.698e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Magnetite	1.036e+03	0.000e+00	0.000e+00	Fe3O4
Goethite	-3.109e+03	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Quartz	-2.672e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-1.764e-04	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	1.292e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
O2(g)	2.591e+02	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-1.421e-03	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	1.036e+03
Mn(2)	-1.292e-05
S(-2)	3.396e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): 1.642e+02  
Sum of delta/uncertainty limit: 7.635e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 6.200e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	8.845e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	8.733e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	1.011e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.922e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Magnetite	-6.271e-04	0.000e+00	0.000e+00	Fe3O4
Kaolinite	-1.237e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-2.645e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	2.233e-05	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	1.975e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
O2(g)	7.029e-03	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-4.900e-05	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:	
Fe(2)	1.254e-03
Mn(2)	-1.975e-05
S(-2)	3.843e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation):	5.795e+00
Sum of delta/uncertainty limit:	5.794e+00
Maximum fractional error in element concentration:	6.200e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	9.015e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	8.783e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	1.011e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.927e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Goethite	1.110e+02	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	-5.551e+01	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Kaolinite	-1.267e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-2.655e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	2.943e-05	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	2.000e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
O2(g)	7.207e-03	0.000e+00	0.000e+00	O2

Redox mole transfers:	
Fe(2)	1.887e-03
Mn(2)	-2.000e-05
S(-2)	3.855e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation):	-7.952e-01
Sum of delta/uncertainty limit:	1.205e+00
Maximum fractional error in element concentration:	1.400e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	-1.147e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Diopside	1.011e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.206e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Magnetite	4.429e+03	0.000e+00	0.000e+00	Fe3O4
Goethite	-1.329e+04	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Kaolinite	2.469e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-1.028e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-8.268e-04	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
O2(g)	1.107e+03	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-5.914e-03	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	4.429e+03
S(-2)	2.412e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): 7.507e+02  
Sum of delta/uncertainty limit: 8.296e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 6.200e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Albite	6.625e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	1.040e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.624e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Magnetite	-2.432e-02	0.000e+00	0.000e+00	Fe3O4
Goethite	-4.721e+03	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	2.360e+03	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Kaolinite	1.862e-04	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-2.315e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-2.793e-04	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
CO2(g)	-2.133e-03	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	-2.274e-02
S(-2)	3.248e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): 2.930e+02  
Sum of delta/uncertainty limit: 8.399e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 6.200e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	8.496e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	8.631e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	1.011e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.909e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Magnetite	-2.855e-02	0.000e+00	0.000e+00	Fe3O4
Goethite	-2.281e+02	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	1.141e+02	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Kaolinite	-1.164e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-2.628e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Pyrolusite	1.925e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
CO2(g)	-1.497e-04	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:	
Fe(2)	-2.668e-02
Mn(2)	-1.925e-05
S(-2)	3.817e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation):	1.922e+01
Sum of delta/uncertainty limit:	7.098e+00
Maximum fractional error in element concentration:	6.200e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	-4.400e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	-5.035e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	8.943e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Goethite	-3.358e+04	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	1.679e+04	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Kaolinite	7.784e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Muscovite	-2.127e-03	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	-2.024e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
CO2(g)	-1.487e-02	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:	
Fe(2)	-4.048e-05
Mn(2)	2.024e-05

Sum of residuals (epsilons in documentation):	1.889e+03
Sum of delta/uncertainty limit:	1.553e+01
Maximum fractional error in element concentration:	6.200e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	-1.730e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	-2.836e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	8.693e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	8.654e-04	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Magnetite	6.010e+03	0.000e+00	0.000e+00	Fe3O4
Goethite	-1.803e+04	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Kaolinite	3.620e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Muscovite	-1.130e-03	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
O2(g)	1.503e+03	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-8.008e-03	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:	
Fe(2)	6.010e+03
S(-2)	1.731e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation):	1.070e+03
Sum of delta/uncertainty limit:	1.179e+01
Maximum fractional error in element concentration:	6.200e-01

Model contains minimum number of phases.

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Albite	7.358e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	1.152e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.698e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Magnetite	-2.541e-02	0.000e+00	0.000e+00	Fe3O4
Goethite	-3.109e+03	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	1.555e+03	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Quartz	-2.672e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-1.764e-04	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	1.292e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
CO2(g)	-1.421e-03	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:	
Fe(2)	-2.375e-02
Mn(2)	-1.292e-05
S(-2)	3.396e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation):	1.642e+02
Sum of delta/uncertainty limit:	7.635e+00
Maximum fractional error in element concentration:	6.200e-01

Model contains minimum number of phases.

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	1.862e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	6.625e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	9.874e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.665e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Magnetite	1.574e+03	0.000e+00	0.000e+00	Fe3O4
Goethite	-4.721e+03	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Quartz	-2.210e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-2.793e-04	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
O2(g)	3.934e+02	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-2.133e-03	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	1.574e+03
S(-2)	3.329e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): 2.927e+02  
Sum of delta/uncertainty limit: 8.014e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 6.200e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	8.845e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	8.733e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	1.011e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.922e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Magnetite	-2.874e-02	0.000e+00	0.000e+00	Fe3O4
Goethite	8.435e-02	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Kaolinite	-1.237e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-2.645e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	2.234e-05	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	1.975e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
CO2(g)	-4.897e-05	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	-2.686e-02
Mn(2)	-1.975e-05
S(-2)	3.843e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): 5.790e+00  
Sum of delta/uncertainty limit: 5.794e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 6.200e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	8.845e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	8.733e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	1.011e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.922e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Magnetite	-2.874e-02	0.000e+00	0.000e+00	Fe3O4
Hematite	4.217e-02	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Kaolinite	-1.237e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-2.645e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	2.233e-05	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	1.975e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
CO2(g)	-4.900e-05	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	-2.686e-02
Mn(2)	-1.975e-05
S(-2)	3.843e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): 5.795e+00  
Sum of delta/uncertainty limit: 5.794e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 6.200e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Albite	6.625e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	1.040e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.624e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Goethite	-4.721e+03	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	2.360e+03	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Kaolinite	1.862e-04	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-2.315e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-2.793e-04	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
O2(g)	6.080e-03	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-2.133e-03	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	1.585e-03
S(-2)	3.248e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): 2.930e+02  
Sum of delta/uncertainty limit: 8.399e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 6.200e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	8.496e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	8.631e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	1.011e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.909e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Goethite	-2.281e+02	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	1.141e+02	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Kaolinite	-1.164e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-2.628e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Pyrolusite	1.925e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
O2(g)	7.138e-03	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-1.497e-04	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	1.869e-03
Mn(2)	-1.925e-05
S(-2)	3.817e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): 1.922e+01  
Sum of delta/uncertainty limit: 7.098e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 6.200e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Albite	7.358e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	1.152e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.698e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Goethite	-3.109e+03	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	1.555e+03	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Quartz	-2.672e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-1.764e-04	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	1.292e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
O2(g)	6.352e-03	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-1.421e-03	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	1.658e-03
Mn(2)	-1.292e-05
S(-2)	3.396e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): 1.642e+02  
Sum of delta/uncertainty limit: 7.635e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 6.200e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	8.845e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	8.733e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	1.011e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.922e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Goethite	-1.881e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Kaolinite	-1.237e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-2.645e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	2.233e-05	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	1.975e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
O2(g)	7.186e-03	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-4.900e-05	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:	
Fe(2)	1.881e-03
Mn(2)	-1.975e-05
S(-2)	3.843e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation):	5.795e+00
Sum of delta/uncertainty limit:	5.794e+00
Maximum fractional error in element concentration:	6.200e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	8.845e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	8.733e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	1.011e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.922e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Hematite	-9.406e-04	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Kaolinite	-1.237e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-2.645e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	2.233e-05	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	1.975e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
O2(g)	7.186e-03	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-4.900e-05	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:	
Fe(2)	1.881e-03
Mn(2)	-1.975e-05
S(-2)	3.843e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation):	5.795e+00
Sum of delta/uncertainty limit:	5.794e+00
Maximum fractional error in element concentration:	6.200e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	-1.147e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Diopside	1.011e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.206e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Magnetite	-1.805e-02	0.000e+00	0.000e+00	Fe3O4
Goethite	-1.329e+04	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	6.644e+03	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Kaolinite	2.469e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-1.028e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-8.268e-04	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
CO2(g)	-5.914e-03	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	-1.688e-02
S(-2)	2.412e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): 7.507e+02  
Sum of delta/uncertainty limit: 8.296e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 6.200e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	-1.147e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Diopside	1.011e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.206e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Goethite	-1.329e+04	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	6.643e+03	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Kaolinite	2.469e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-1.028e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-8.268e-04	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
O2(g)	4.513e-03	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-5.914e-03	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	1.168e-03
S(-2)	2.412e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): 7.507e+02  
Sum of delta/uncertainty limit: 8.296e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 6.200e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	-1.730e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	-2.836e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	8.693e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	8.654e-04	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Magnetite	-1.294e-02	0.000e+00	0.000e+00	Fe3O4
Goethite	-1.803e+04	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	9.016e+03	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Kaolinite	3.620e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Muscovite	-1.130e-03	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
CO2(g)	-8.008e-03	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	-1.212e-02
S(-2)	1.731e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): 1.070e+03  
Sum of delta/uncertainty limit: 1.179e+01  
Maximum fractional error in element concentration: 6.200e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	1.862e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	6.625e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	9.874e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.665e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Magnetite	-2.493e-02	0.000e+00	0.000e+00	Fe3O4
Goethite	-4.721e+03	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	2.360e+03	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Quartz	-2.210e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-2.793e-04	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
CO2(g)	-2.133e-03	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	-2.331e-02
S(-2)	3.329e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): 2.927e+02  
Sum of delta/uncertainty limit: 8.014e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 6.200e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	-1.730e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	-2.836e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	8.693e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	8.654e-04	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Goethite	-1.803e+04	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	9.016e+03	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Kaolinite	3.620e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Muscovite	-1.130e-03	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
O2(g)	3.236e-03	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-8.008e-03	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	8.281e-04
S(-2)	1.731e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): 1.070e+03  
Sum of delta/uncertainty limit: 1.179e+01  
Maximum fractional error in element concentration: 6.200e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	1.862e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	6.625e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	9.874e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.665e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Goethite	-4.721e+03	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	2.360e+03	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Quartz	-2.210e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-2.793e-04	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
O2(g)	6.233e-03	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-2.133e-03	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	1.625e-03
S(-2)	3.329e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): 2.927e+02  
Sum of delta/uncertainty limit: 8.014e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 6.200e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

## Modelo Inverso 2

```
Phase mole transfers:           Minimum           Maximum
Anorthite      9.015e-04       0.000e+00       0.000e+00      CaAl2Si2O8
Albite        8.783e-04       0.000e+00       0.000e+00      NaAlSi3O8
Diopside      1.011e-03       0.000e+00       0.000e+00      CaMgSi2O6
Pyrite        1.927e-03       0.000e+00       0.000e+00      FeS2
Magnetite     -3.701e+01      0.000e+00       0.000e+00      Fe3O4
Goethite      1.110e+02       0.000e+00       0.000e+00      FeOOH
Kaolinite     -1.267e-03      0.000e+00       0.000e+00      Al2Si2O5(OH)4
Quartz        -2.655e-03      0.000e+00       0.000e+00      SiO2
Muscovite     2.943e-05       0.000e+00       0.000e+00      KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite    2.000e-05       0.000e+00       0.000e+00      MnO2
O2(g)        -9.245e+00      0.000e+00       0.000e+00      O2
```

```
Redox mole transfers:
Fe(2)        -3.701e+01
Mn(2)        -2.000e-05
S(-2)        3.855e-03
```

```
Sum of residuals (epsilons in documentation):      -7.952e-01
Sum of delta/uncertainty limit:                    1.205e+00
Maximum fractional error in element concentration:  1.400e-01
```

Model contains minimum number of phases.

```
=====  
Phase mole transfers:           Minimum           Maximum
Anorthite      9.015e-04       0.000e+00       0.000e+00      CaAl2Si2O8
Albite        8.783e-04       0.000e+00       0.000e+00      NaAlSi3O8
Diopside      1.011e-03       0.000e+00       0.000e+00      CaMgSi2O6
Pyrite        1.927e-03       0.000e+00       0.000e+00      FeS2
Magnetite     -2.883e-02      0.000e+00       0.000e+00      Fe3O4
Goethite      1.110e+02       0.000e+00       0.000e+00      FeOOH
Hematite     -5.547e+01      0.000e+00       0.000e+00      Fe2O3
Kaolinite     -1.267e-03      0.000e+00       0.000e+00      Al2Si2O5(OH)4
Quartz        -2.655e-03      0.000e+00       0.000e+00      SiO2
Muscovite     2.943e-05       0.000e+00       0.000e+00      KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite    2.000e-05       0.000e+00       0.000e+00      MnO2
```

```
Redox mole transfers:
Fe(2)        -2.694e-02
Mn(2)        -2.000e-05
S(-2)        3.855e-03
```

```
Sum of residuals (epsilons in documentation):      -7.952e-01
Sum of delta/uncertainty limit:                    1.205e+00
Maximum fractional error in element concentration:  1.400e-01
```

Model contains minimum number of phases.

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	-1.921e-01	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	-9.402e-02	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	-5.046e-02	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	-1.272e-01	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Magnetite	2.793e+04	0.000e+00	0.000e+00	Fe3O4
Goethite	-8.379e+04	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Kaolinite	3.235e-01	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Muscovite	-5.622e-02	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
O2(g)	6.982e+03	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-3.453e-01	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	2.793e+04
S(-2)	-2.544e-01

Sum of residuals (epsilons in documentation): 9.814e+02  
Sum of delta/uncertainty limit: 5.879e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 1.400e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	8.006e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	8.286e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	9.838e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.860e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Magnetite	-2.238e+01	0.000e+00	0.000e+00	Fe3O4
Goethite	6.713e+01	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Kaolinite	-1.097e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-2.649e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Pyrolusite	1.999e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
O2(g)	-5.587e+00	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-1.806e-04	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	-2.238e+01
Mn(2)	-1.999e-05
S(-2)	3.719e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): 6.334e-01  
Sum of delta/uncertainty limit: 1.289e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 1.400e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Albite	6.148e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	9.544e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.472e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Magnetite	4.055e+01	0.000e+00	0.000e+00	Fe3O4
Goethite	-1.217e+02	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Quartz	-2.796e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-1.266e-04	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	1.995e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
O2(g)	1.014e+01	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-9.574e-04	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:	
Fe(2)	4.055e+01
Mn(2)	-1.995e-05
S(-2)	2.944e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): 3.987e+00  
Sum of delta/uncertainty limit: 2.602e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 1.400e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	6.464e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	7.526e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	9.425e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.756e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Magnetite	-5.720e-04	0.000e+00	0.000e+00	Fe3O4
Kaolinite	-8.375e-04	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-2.639e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-4.501e-05	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	1.997e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
O2(g)	6.423e-03	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-4.568e-04	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:	
Fe(2)	1.144e-03
Mn(2)	-1.997e-05
S(-2)	3.513e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): 1.289e+00  
Sum of delta/uncertainty limit: 1.289e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 1.400e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	9.015e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	8.783e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	1.011e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.927e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Goethite	1.110e+02	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	-5.551e+01	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Kaolinite	-1.267e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-2.655e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	2.943e-05	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	2.000e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
O2(g)	7.207e-03	0.000e+00	0.000e+00	O2

Redox mole transfers:

Fe(2)	1.887e-03
Mn(2)	-2.000e-05
S(-2)	3.855e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): -7.952e-01  
Sum of delta/uncertainty limit: 1.205e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 1.400e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	-1.799e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Diopside	2.756e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Magnetite	2.847e+02	0.000e+00	0.000e+00	Fe3O4
Goethite	-8.541e+02	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Kaolinite	2.826e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-2.635e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-6.176e-04	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	1.980e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
O2(g)	7.118e+01	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-3.971e-03	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	2.847e+02
Mn(2)	-1.980e-05

Sum of residuals (epsilons in documentation): 2.672e+01  
Sum of delta/uncertainty limit: 7.102e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 1.400e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	-1.504e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	-5.707e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Magnetite	3.895e+02	0.000e+00	0.000e+00	Fe3O4
Goethite	-1.169e+03	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Kaolinite	3.149e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-2.030e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-8.284e-04	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	1.974e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
O2(g)	9.738e+01	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-5.265e-03	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	3.895e+02
Mn(2)	-1.974e-05

Sum of residuals (epsilons in documentation): 2.187e+01  
Sum of delta/uncertainty limit: 4.131e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 1.400e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	-1.921e-01	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	-9.402e-02	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	-5.046e-02	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	-1.272e-01	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Magnetite	1.908e+00	0.000e+00	0.000e+00	Fe3O4
Goethite	-8.379e+04	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	4.189e+04	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Kaolinite	3.235e-01	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Muscovite	-5.622e-02	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
CO2(g)	-3.453e-01	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	1.781e+00
S(-2)	-2.544e-01

Sum of residuals (epsilons in documentation): 9.814e+02  
Sum of delta/uncertainty limit: 5.879e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 1.400e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase	mole transfers:	Minimum	Maximum	
Anorthite	8.006e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>
Albite	8.286e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
Diopside	9.838e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
Pyrite	1.860e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS <sub>2</sub>
Magnetite	-2.781e-02	0.000e+00	0.000e+00	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
Goethite	6.713e+01	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	-3.352e+01	0.000e+00	0.000e+00	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Kaolinite	-1.097e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>
Quartz	-2.649e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO <sub>2</sub>
Pyrolusite	1.999e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO <sub>2</sub>
CO <sub>2</sub> (g)	-1.806e-04	0.000e+00	0.000e+00	CO <sub>2</sub>

Redox mole transfers:

Fe(2)	-2.600e-02
Mn(2)	-1.999e-05
S(-2)	3.719e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): 6.334e-01  
Sum of delta/uncertainty limit: 1.289e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 1.400e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase	mole transfers:	Minimum	Maximum	
Albite	6.148e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
Diopside	9.544e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
Pyrite	1.472e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS <sub>2</sub>
Magnetite	-2.200e-02	0.000e+00	0.000e+00	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
Goethite	-1.217e+02	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	6.086e+01	0.000e+00	0.000e+00	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Quartz	-2.796e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO <sub>2</sub>
Muscovite	-1.266e-04	0.000e+00	0.000e+00	KAl <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>
Pyrolusite	1.995e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO <sub>2</sub>
CO <sub>2</sub> (g)	-9.574e-04	0.000e+00	0.000e+00	CO <sub>2</sub>

Redox mole transfers:

Fe(2)	-2.057e-02
Mn(2)	-1.995e-05
S(-2)	2.944e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): 3.987e+00  
Sum of delta/uncertainty limit: 2.602e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 1.400e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase	mole transfers:	Minimum	Maximum	
Anorthite	6.465e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	7.526e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	9.425e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.756e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Magnetite	-2.627e-02	0.000e+00	0.000e+00	Fe3O4
Goethite	7.708e-02	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Kaolinite	-8.378e-04	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-2.639e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-4.495e-05	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	1.997e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
CO2(g)	-4.565e-04	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	-2.455e-02
Mn(2)	-1.997e-05
S(-2)	3.513e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): 1.288e+00  
Sum of delta/uncertainty limit: 1.289e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 1.400e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase	mole transfers:	Minimum	Maximum	
Anorthite	6.464e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	7.526e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	9.425e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.756e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Magnetite	-2.626e-02	0.000e+00	0.000e+00	Fe3O4
Hematite	3.854e-02	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Kaolinite	-8.375e-04	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-2.639e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-4.501e-05	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	1.997e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
CO2(g)	-4.568e-04	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	-2.455e-02
Mn(2)	-1.997e-05
S(-2)	3.513e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): 1.289e+00  
Sum of delta/uncertainty limit: 1.289e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 1.400e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase	mole transfers:	Minimum	Maximum	
Anorthite	-1.791e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Diopside	2.774e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	5.315e-06	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Goethite	-8.511e+02	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	4.256e+02	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Kaolinite	2.815e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-2.628e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-6.156e-04	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	1.980e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
CO2(g)	-3.959e-03	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	-3.481e-05
Mn(2)	-1.980e-05
S(-2)	1.063e-05

Sum of residuals (epsilons in documentation): 2.640e+01  
Sum of delta/uncertainty limit: 7.074e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 1.400e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase	mole transfers:	Minimum	Maximum	
Anorthite	-1.921e-01	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	-9.402e-02	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	-5.046e-02	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	-1.272e-01	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Goethite	-8.379e+04	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	4.190e+04	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Kaolinite	3.235e-01	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Muscovite	-5.622e-02	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
O2(g)	-4.771e-01	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-3.453e-01	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	-1.272e-01
S(-2)	-2.544e-01

Sum of residuals (epsilons in documentation): 9.814e+02  
Sum of delta/uncertainty limit: 5.879e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 1.400e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase	mole transfers:	Minimum	Maximum	
Anorthite	8.006e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	8.286e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	9.838e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.860e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Goethite	6.713e+01	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	-3.357e+01	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Kaolinite	-1.097e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-2.649e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Pyrolusite	1.999e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
O2(g)	6.954e-03	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-1.806e-04	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	1.819e-03
Mn(2)	-1.999e-05
S(-2)	3.719e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): 6.334e-01  
Sum of delta/uncertainty limit: 1.289e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 1.400e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase	mole transfers:	Minimum	Maximum	
Albite	6.148e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	9.544e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.472e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Goethite	-1.217e+02	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	6.083e+01	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Quartz	-2.796e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-1.266e-04	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	1.995e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
O2(g)	5.501e-03	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-9.574e-04	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	1.432e-03
Mn(2)	-1.995e-05
S(-2)	2.944e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): 3.987e+00  
Sum of delta/uncertainty limit: 2.602e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 1.400e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	6.464e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	7.526e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	9.425e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.756e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Goethite	-1.716e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Kaolinite	-8.375e-04	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-2.639e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-4.501e-05	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	1.997e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
O2(g)	6.566e-03	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-4.569e-04	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	1.716e-03
Mn(2)	-1.997e-05
S(-2)	3.513e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): 1.289e+00  
Sum of delta/uncertainty limit: 1.289e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 1.400e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	6.464e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	7.526e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Diopside	9.425e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.756e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Hematite	-8.580e-04	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Kaolinite	-8.375e-04	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-2.639e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-4.501e-05	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	1.997e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
O2(g)	6.566e-03	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-4.568e-04	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	1.716e-03
Mn(2)	-1.997e-05
S(-2)	3.513e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): 1.289e+00  
Sum of delta/uncertainty limit: 1.289e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 1.400e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	-1.799e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Diopside	2.756e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Magnetite	7.972e-05	0.000e+00	0.000e+00	Fe3O4
Goethite	-8.541e+02	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	4.271e+02	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Kaolinite	2.826e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-2.635e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-6.176e-04	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	1.980e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
CO2(g)	-3.971e-03	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	3.960e-05
Mn(2)	-1.980e-05

Sum of residuals (epsilons in documentation): 2.672e+01  
Sum of delta/uncertainty limit: 7.102e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 1.400e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	-1.799e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Diopside	2.756e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Goethite	-8.541e+02	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	4.271e+02	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Kaolinite	2.826e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-2.635e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-6.176e-04	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	1.980e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
O2(g)	-1.993e-05	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-3.971e-03	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	-4.012e-05
Mn(2)	-1.980e-05

Sum of residuals (epsilons in documentation): 2.672e+01  
Sum of delta/uncertainty limit: 7.102e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 1.400e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	-1.504e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	-5.707e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Magnetite	7.954e-05	0.000e+00	0.000e+00	Fe3O4
Goethite	-1.169e+03	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	5.843e+02	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Kaolinite	3.149e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-2.030e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-8.284e-04	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	1.974e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
CO2(g)	-5.265e-03	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	3.947e-05
Mn(2)	-1.974e-05

Sum of residuals (epsilons in documentation): 2.187e+01  
Sum of delta/uncertainty limit: 4.131e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 1.400e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	-1.504e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	-5.707e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Goethite	-1.169e+03	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	5.843e+02	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Kaolinite	3.149e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-2.030e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-8.284e-04	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	1.974e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
O2(g)	-1.989e-05	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-5.265e-03	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	-4.007e-05
Mn(2)	-1.974e-05

Sum of residuals (epsilons in documentation): 2.187e+01  
Sum of delta/uncertainty limit: 4.131e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 1.400e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Diopside	5.094e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.052e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Magnetite	1.580e+02	0.000e+00	0.000e+00	Fe3O4
Goethite	-4.740e+02	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Kaolinite	6.615e-04	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-1.859e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-3.628e-04	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	1.988e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
O2(g)	3.951e+01	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-2.407e-03	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	1.580e+02
Mn(2)	-1.988e-05
S(-2)	2.104e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): 1.395e+01  
Sum of delta/uncertainty limit: 5.345e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 1.400e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Anorthite	-1.492e-03	0.000e+00	0.000e+00	CaAl2Si2O8
Albite	-5.658e-04	0.000e+00	0.000e+00	NaAlSi3O8
Pyrite	5.303e-06	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Goethite	-1.164e+03	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	5.821e+02	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Kaolinite	3.129e-03	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-2.026e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-8.255e-04	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	1.974e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
CO2(g)	-5.247e-03	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	-3.477e-05
Mn(2)	-1.974e-05
S(-2)	1.061e-05

Sum of residuals (epsilons in documentation): 2.207e+01  
Sum of delta/uncertainty limit: 4.153e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 1.400e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Diopside	5.094e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.052e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Magnetite	-1.570e-02	0.000e+00	0.000e+00	Fe3O4
Goethite	-4.740e+02	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	2.370e+02	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Kaolinite	6.615e-04	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-1.859e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-3.628e-04	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	1.988e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
CO2(g)	-2.407e-03	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	-1.469e-02
Mn(2)	-1.988e-05
S(-2)	2.104e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): 1.395e+01  
Sum of delta/uncertainty limit: 5.345e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 1.400e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```

Phase mole transfers:		Minimum	Maximum	
Diopside	5.094e-04	0.000e+00	0.000e+00	CaMgSi2O6
Pyrite	1.052e-03	0.000e+00	0.000e+00	FeS2
Goethite	-4.740e+02	0.000e+00	0.000e+00	FeOOH
Hematite	2.370e+02	0.000e+00	0.000e+00	Fe2O3
Kaolinite	6.615e-04	0.000e+00	0.000e+00	Al2Si2O5(OH)4
Quartz	-1.859e-03	0.000e+00	0.000e+00	SiO2
Muscovite	-3.628e-04	0.000e+00	0.000e+00	KAl3Si3O10(OH)2
Pyrolusite	1.988e-05	0.000e+00	0.000e+00	MnO2
O2(g)	3.926e-03	0.000e+00	0.000e+00	O2
CO2(g)	-2.407e-03	0.000e+00	0.000e+00	CO2

Redox mole transfers:

Fe(2)	1.012e-03
Mn(2)	-1.988e-05
S(-2)	2.104e-03

Sum of residuals (epsilons in documentation): 1.395e+01  
Sum of delta/uncertainty limit: 5.345e+00  
Maximum fractional error in element concentration: 1.400e-01

Model contains minimum number of phases.

```
=====
```