



# Geoquímica de las aguas vinculadas al Complejo volcánico Planchón-Peteroa, Mendoza-Argentina

**Joaquín LLANO<sup>1,2</sup>, Victoria NOGUÉS<sup>3</sup>, Mariano AGUSTO<sup>1,2</sup>, María Clara LAMBERTI<sup>1,2</sup>, Daniel SIERRA<sup>2,4</sup>, Sebastián GARCÍA<sup>5</sup>, Fabricio CARBAJAL<sup>5</sup>, Sergio CALABRESE<sup>6,7</sup> y Walter D'ALESSANDRO<sup>7</sup>**

<sup>1</sup> Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Buenos Aires.

<sup>2</sup> Instituto de Estudios Andinos "Don Pablo Groeber" (IDEAN), Universidad de Buenos Aires - CONICET, Buenos Aires.

<sup>3</sup> CICTERRA-CONICET, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Córdoba.

<sup>4</sup> Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

<sup>5</sup> Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica (OAVV), Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR).

<sup>6</sup> Dipartimento di Scienze della Terra e del Mare (DiSTeM), Università degli Studi di Palermo, Italia.

<sup>7</sup> Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), sez. Palermo, Italia.

E-mail: joaquinllano28@gmail.com

**Editor:** Romina Sanci

Recibido: 19 de julio de 2021

Aceptado: 25 de noviembre de 2021

## RESUMEN

El presente trabajo fue desarrollado en el Complejo volcánico Planchón-Peteroa en la provincia de Mendoza, Argentina. Su objetivo es analizar y describir los principales procesos geoquímicos que se desarrollan y controlan la composición de las aguas pertenecientes al sistema hídrico del complejo volcánico. Dichas aguas fueron clasificadas a partir de sus composiciones y características fisicoquímicas en cuatro grupos: aguas termales sulfato-cloruradas ácidas, pertenecientes a las lagunas cratéricas; aguas termales sulfatadas neutras; aguas termales bicarbonatadas neutras; y aguas de escorrentía frías y ácidas a levemente ácidas. Los principales procesos que se reconocen en las aguas descritas son la interacción de las mismas con gases ácidos y calientes provenientes desde el sistema magmático-hidrotermal, la precipitación de minerales secundarios como sulfatos y carbonatos de calcio, la interacción agua-roca, en particular con las evaporitas de la Formación Auquilco, y la interacción de las aguas con las cenizas emitidas desde el volcán Peteroa durante períodos de actividad eruptiva. La presencia o combinación de algunos de estos procesos definen la composición geoquímica en cada grupo de agua.

**Palabras clave:** Hidrogeoquímica, Volcán activo, Peteroa, Sistema hídrico.

## ABSTRACT

*Geochemistry of the waters related to the Planchón-Peteroa Volcanic Complex, Mendoza-Argentina.*

The present work was developed in the Planchón-Peteroa volcanic Complex in the Mendoza province, Argentina. Its goal is to analyze and describe the main geochemical processes that are developed and control the waters composition in the studied volcanic complex hydric system. Those waters were classified from compositions and physicochemical characteristics in four groups: sulfate-chlorided, acidic and hot waters from the crater lakes; thermal neutral sulfated waters; thermal neutral bicarbonated waters; and cold and acidic to slightly acidic stream waters. The main processes recognized in the described waters are its interaction with the hot and acidic gases emanated from the magmatic chamber, precipitation of secondary minerals as calcium sulfate and carbonate, water-rock interaction, particularly with the Auquilco formation evaporites, and interaction with the ashes emitted from the Peteroa volcano during eruptive activity periods. The occurrence and/or the combination of some of these processes defines the geochemical composition of each water group.

**Keywords:** Hydrogeochemistry, active volcano, Peteroa, hydric system.

## INTRODUCCIÓN

El gran impacto que ha tenido la actividad volcánica en Argentina sobre la población y sobre el territorio en general, mayormente generado por la caída de cenizas (Watt et al. 2009, Daga et al. 2012, 2017, Petrinovic et al. 2014a, 2014b, Forte et al. 2018), ha puesto a la investigación volcánica en la lista de prioridades a nivel estatal y científico. Sin embargo, muchos de los volcanes presentes en nuestra cordillera continúan aun poco explorados, contando con escasos o nulos estudios científicos. Particularmente, en el caso del Complejo volcánico Planchón-Peteroa (provincia de Mendoza) se han desarrollado estudios orientados a aspectos generales de la actividad volcánica histórica y actual (Tormey et al. 1989, Haller et al. 1994, Sruoga 2008, Haller y Coscarella 2011, Haller y Risso 2011, Aguilera et al. 2016, Badi et al. 2018), al estudio geofísico del volcán (Casas et al. 2014, Casas et al. 2018, Casas et al. 2019, Casas et al. 2020), investigaciones sobre la geología estructural (Vigide et al. 2020) y trabajos geoquímicos de distinta índole (Lemus Hernández 2010, Sancí et al. 2010, Tassi et al. 2016, Lamberti et al. 2020). Sin embargo, aún continúa siendo bajo el nivel de conocimiento adquirido sobre este volcán, en especial en cuanto a su peligrosidad, teniendo en cuenta que es uno de los volcanes con más actividad de la Argentina (Haller et al. 1994, Naranjo et al. 1999, Naranjo y Haller 2002, Sruoga et al. 2004, Sruoga 2008, Elissondo y Villegas 2011, Haller y Risso 2011, Elissondo et al. 2016, Romero et al. 2020, Forte et al. 2022), y cercano geográficamente a áreas altamente pobladas del centro y oeste del país.

El estudio de la geoquímica de aguas vinculadas a volcanes activos otorga información que puede ser de relevancia en distintos aspectos. Puede aportar valiosa información, tanto para una caracterización del sistema en su conjunto (Lewis et al. 1997, Aiuppa et al. 2000, Panarello 2002, D'Alessandro et al. 2004, Taran et al. 2008, Chiodi et al. 2016, Agosto y Vélez 2017), como para identificar precursores eruptivos (Taran et al. 2008, Rouwet et al. 2009, Agosto et al. 2012, Agosto y Varekamp 2016) o aportar al conocimiento de sistemas geotermales asociados al mismo (Giggembach 1991, Mas et al. 1996, Gaviria Reyes et al. 2016, Rouwet et al. 2017, Wrage et al. 2017). Si bien se han realizado estudios de algunas de las aguas presentes en el complejo volcánico, los mismos se han orientado a: las aguas de las lagunas cratéricas del volcán de manera complementaria al estudio de gases volcánicos (Tassi et al. 2016); algunas de las aguas periféricas del edificio volcánico han sido analizadas en conjunto con emisiones difusas de CO<sub>2</sub> del suelo (Sancí et al. 2010); y algunas aguas terma-

les en conjunto con otros sistemas geotermales y volcánicos desde una perspectiva regional (Benavente 2010, Benavente 2016, Benavente et al. 2016). Sin embargo, aún ningún trabajo realizado en este complejo volcánico ha profundizado sobre las características geoquímicas de todas las aguas del sistema en conjunto y comparado entre los distintos grupos existentes. Así, se presenta la primera investigación de detalle y con información novedosa de diferentes cuerpos de aguas presentes en el Complejo volcánico Planchón-Peteroa, describiendo y caracterizando al sistema hídrico asociado a este complejo. En el marco de este trabajo se estudiaron los procesos que se desarrollan en los diversos grupos de aguas, ya sean las lagunas cratéricas, como las aguas periféricas al centro eruptivo que involucran aguas termales y de escorrentía. De esta manera, los análisis realizados aportan nueva información no solo para la comprensión del sistema hídrico y geotermal en forma integral, sino también para el desarrollo de una línea de base ambiental que contribuya con futuros trabajos de monitoreo volcánico, peligrosidad volcánica y el impacto de las erupciones en las aguas del área de estudio.

## MARCO GEOLÓGICO

El volcán Peteroa (35° 14' S - 70° 34' O) está emplazado en el límite entre Argentina y Chile, siendo el único volcán activo del Complejo volcánico Planchón-Peteroa (Fig. 1a, b y c). Se encuentra entre los volcanes Azufre y Planchón, que también forman parte del complejo volcánico, inactivos actualmente. El volcán Peteroa forma parte del segmento transicional de la zona volcánica sur definida por Stern (2004) para las latitudes 34.5° a 37° S del arco volcánico andino. El control espacial de estratovolcanes y calderas dentro de la zona volcánica sur transicional estaría determinado por estructuras NO-SE y NE-SO que tienen su desarrollo a lo largo de la faja plegada y corrida de Malargüe (Stern et al. 2007, Vigide et al. 2020). Esta faja deforma en el Paleógeno-Neógeno las secuencias de la Cuenca Neuquina, una de las cuencas marinas que ocupaban el margen occidental de Gondwana durante el Mesozoico (Ramos y Folguera 2005, Fennell et al. 2017, Mescua et al. 2017).

El basamento del Complejo volcánico Planchón-Peteroa corresponde a la Formación Auquilco (Jurásico Superior), la cual aflora en la parte oriental y S de la zona de estudio (Fig. 1d), en el lateral E de los valles de los ríos Los Ciegos y Valenzuela (Tormey et al. 1989, Haller et al. 1994, Nogués 2019). Las mismas son secuencias evaporíticas de yeso y anhidrita que se reconocen por su color blanquecino y por su

morfología característica de dolinas y cuevas, ante la disolución del proceso kárstico (Nullo et al. 2005).

Como ya fue mencionado, el Complejo volcánico Planchón-Peteroa comprende un conjunto de tres estratovolcanes, Azufre, Planchón y Peteroa, con productos volcánicos cuyas edades van desde el Pleistoceno Medio a la actualidad (Fig. 1d; Hildreth et al. 1984, Naranjo et al. 1999). El volcán Azufre es el más antiguo y grande del complejo, consiste en 30 km<sup>3</sup> de lavas de composición basalto-andesíticas a dacíticas, depósitos de lahares y unidades piroclásticas (Tormey et al. 1995). El volcán Planchón se encuentra 3 km al N del volcán Azufre y comprende 25 km<sup>3</sup> de basaltos y basalto-andesitas toleíticos a calcoalcalinos (Tormey et al. 1995), siendo el volcán de composiciones basálticas que se encuentra más al N en la zona volcánica sur. El volcán Peteroa comprende la etapa volcánica más joven del Complejo volcánico Planchón-Peteroa, teniendo como productos lavas y unidades piroclásticas de composición andesítica, a diferencia del Azufre y Planchón. Las erupciones, mayoritariamente explosivas relacionadas a esta etapa más reciente, ocurrieron a través de 5 estructuras cratéricas principales, 4 cráteres y 1 cono de escoria superficialmente independientes (Fig. 1c; Naranjo et al. 1999). En esta etapa se han generado menos de 1 km<sup>3</sup> de lavas y unidades piroclásticas de composición andesítica (Naranjo et al. 1999). Las tobas y depósitos no consolidados holocenos de composición riodacítica resultan las unidades más diferenciadas dentro de las rocas piroclásticas del complejo (Tormey et al. 1995, Benavente 2010).

### Historia eruptiva del volcán Peteroa

Se tiene conocimiento sobre erupciones ocurridas en la zona de estudio desde el siglo XVII en adelante, sin demasiada documentación descriptiva (Tormey et al. 1989, Haller et al. 1994, Naranjo y Haller 2002). En el siglo XXI se registran dos nuevos periodos eruptivos. El primero ocurrió entre enero de 2010 y julio de 2011, caracterizado por actividad freática de baja intensidad y constantes columnas de vapor y gas, con presencia frecuente de ceniza y ocasionales explosiones, con columnas de hasta 3000 m sobre el cráter activo (Haller y Risso 2011, Aguilera et al. 2016). Entre los años 2016 y 2018 se detectó un aumento en los pulsos sísmicos, atribuido al fracturamiento de roca y movimiento de fluidos en el interior del edificio (OVDAS-SERNAGEOMIN 2018). Estos eventos precedieron a un nuevo período eruptivo, que comenzó en diciembre de 2018 y decayó hacia mediados de abril de 2019 (Romero et al. 2020), aunque algunos autores lo extienden al menos hasta mayo de 2019 (Forte et al. 2022). Este ciclo se caracterizó principalmente por explosiones freatomagmáticas con emisiones de gas y tefra, en columnas eruptivas

que llegaron a los 2 km de altura, acompañadas por una alta y persistente actividad sísmica (OAVV-SEGEMAR 2019, OVDAS-SERNAGEOMIN 2019). El período continuó con un considerable aporte de emisiones de ceniza de manera pulsátil, alcanzando distancias de ~20 km al E-SE, con una columna de menos de 1300 m y detección de un enjambre sísmico localizado principalmente cerca al área de los cráteres y a profundidades someras (Badi et al. 2018, OAVV-SEGEMAR 2019).

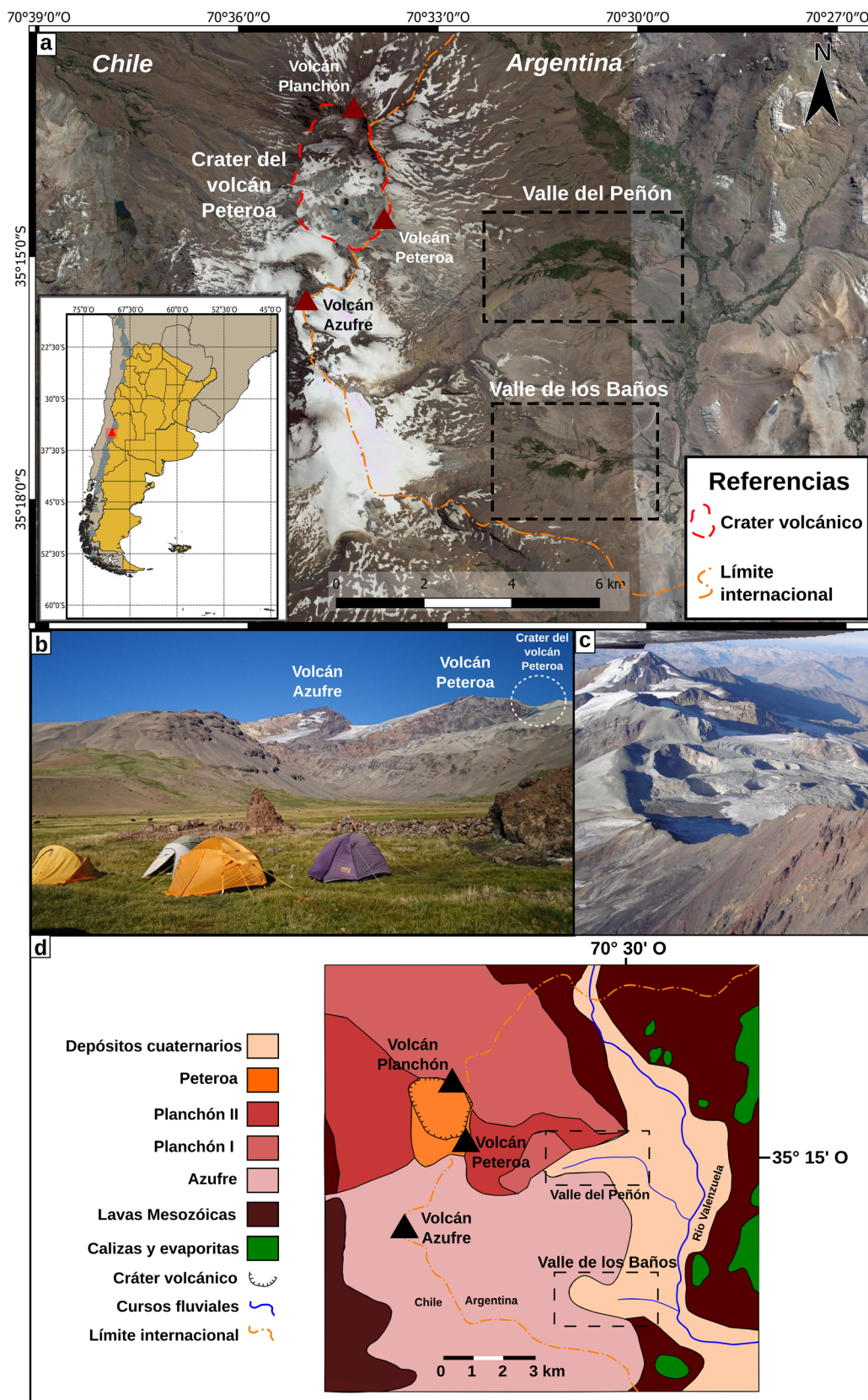
### Sistema hídrico del Complejo volcánico Planchón-Peteroa

La red hídrica en la zona de estudio está conformada por diferentes cuerpos de agua, que van desde lagunas cratéricas de decenas de metros de profundidad, piletas burbujeantes de algunos centímetros a pocos metros de profundidad, ríos de alto y bajo caudal y arroyos de régimen tanto permanente como efímero. En algunos casos se observa una vinculación directa entre las piletas burbujeantes y algunos de los ríos y arroyos permanentes.

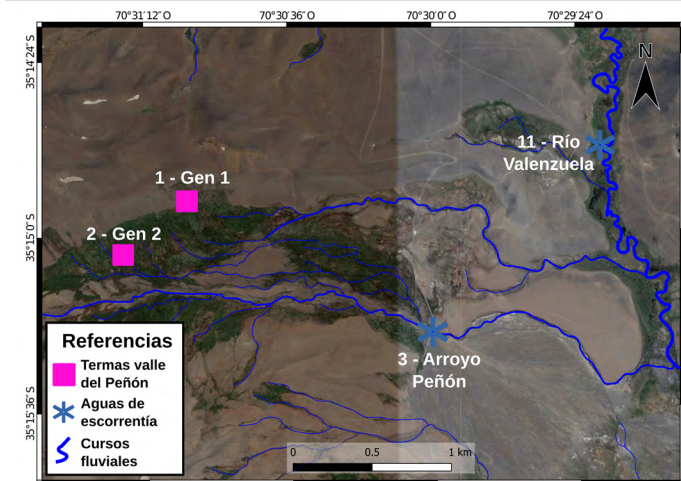
En el área cratérica del volcán Peteroa se ubican cuatro cráteres de explosión que oscilan entre los 150 a 300 m de diámetro, dentro de los cuales se reconocen lagunas con diámetros y profundidades variables dependiendo de las precipitaciones y de la actividad eruptiva (Fig. 1a, Sruoga 2008).

Hacia el E del volcán Peteroa se ubica el valle del Peñón (Figs. 1a y 2), mientras que hacia el SE se encuentra el valle de los Baños (Figs. 1a y 3). En el valle del Peñón se reconocen tres piletas burbujeantes, de las cuales se han muestreado las dos más reconocidas denominadas Gen 1 y Gen 2, con 2 a 4 m de diámetro y ~1,5 m de profundidad (Fig. 4a y b). Ambas piletas presentan temperaturas de 24 a 29 °C y se reconoce el burbujeo constante de gases, principalmente CO<sub>2</sub> (Tassi et al. 2016, Nogués 2019). Estas piletas se encuentran alimentadas tanto por cursos fluviales efímeros, como por lluvia y la fusión de nieve. El pequeño drenaje de las piletas burbujeantes desemboca en el cauce más importante y permanente en este valle denominado arroyo Peñón. Este curso nace a partir del derretimiento del glaciar perenne ubicado en las cabeceras del valle sobre el flanco E del volcán Azufre y de la nieve acumulada durante el invierno.

En el valle de los Baños se reconocen numerosas piletas burbujeantes, también alimentadas por pequeños cursos de escorrentía, donde al igual que en las termas del valle del Peñón, el único gas ácido reactivo identificado dentro de la composición gaseosa es el CO<sub>2</sub> (Tassi et al. 2016, Nogués 2019). Las piletas que fueron muestreadas en el marco de este trabajo son Curicó y Pelambre, con un diámetro aproximado de 1 m (Fig. 4c) y temperaturas de 30 a 46 °C (Sanci



**Figura 1.** a) Área de estudio donde se indica la ubicación de los volcanes Peteroa, Planchón y Azufre, el cráter del volcán Peteroa y los valles aledaños; b) Vista de la zona de estudio desde el E donde se reconocen a los volcanes Azufre y Peteroa; c) Vista de los distintos cráteres de explosión del volcán Peteroa desde una toma aérea (foto tomada en el año 2009 por el *International Center for Earth Sciences*, CNEA); d) Mapa geológico de la zona de estudio, donde se indican las diferentes unidades y los principales cursos fluviales.



**Figura 2.** Sitios de muestreo y cursos fluviales permanentes del valle del Peñón.

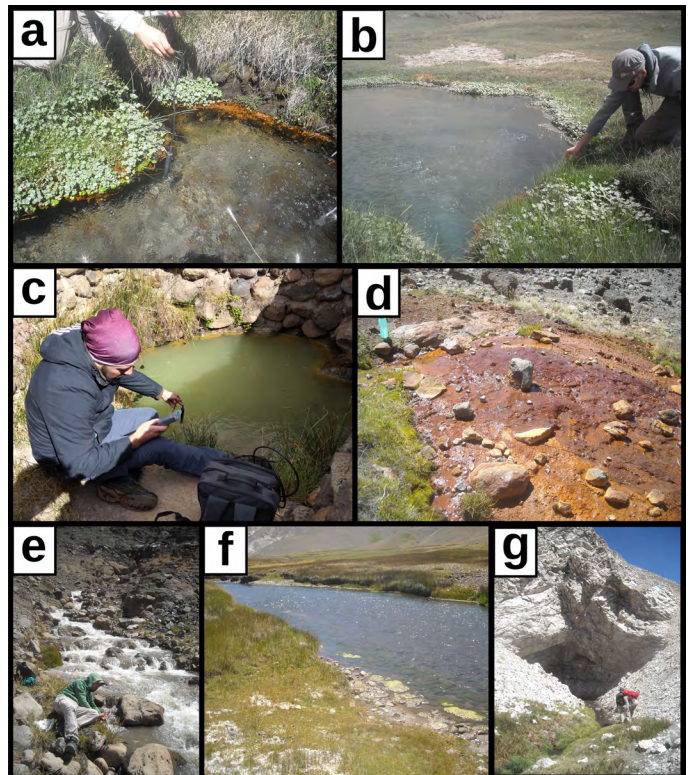


**Figura 3.** Sitios de muestreo y cursos fluviales permanentes del valle de los Baños.

et al. 2010, Tassi et al. 2016, Nogués 2019). Dentro del valle se reconocen a su vez pequeñas vertientes de poco caudal, ubicadas hacia la pared O del mismo que alimentan a las termas mencionadas. Entre estas vertientes se destaca la denominada Agua de Hierro o del Hierro (Fig. 4d) por la coloración ocre del lecho, la cual presenta temperaturas que no superan los 10 °C (Sanci et al. 2010). Como flujos de escorrentía se reconocen dos cascadas al O del valle ubicadas hacia el SO y el NO (Figs. 3 y 4e), que se originan por el derretimiento de glaciares perennes en los que se intercalan depósitos de cenizas generadas durante las erupciones del volcán Peteroa (Trombotto Liaudat et al. 2014), por lo que se generan cursos cargados de mucho material en suspensión (Forte et al. 2022). Dichas cascadas desarrollan escorrentías, que en conjunto con el drenaje de las termas, terminan uniéndose dentro del valle previo a la salida y conformando el arroyo de los Baños (Fig. 3).

Tanto el arroyo Peñón como el arroyo de los Baños son afluentes del río Valenzuela (Fig. 4f), el más importante de la zona de estudio ubicado hacia el oriente. Este río nace en el límite con territorio chileno al N, en la divisoria de aguas del paso Vergara y drena el flanco oriental del volcán en dirección al S (Fig. 2). A su vez, hacia el S de la zona de estudio por fuera de los valles glaciares se ubica el sitio de muestreo cueva del Sulfato (Figs. 3 y 4g), originada a partir del proceso kárstico previamente mencionado sobre los depósitos de evaporitas de la Formación Auquilco. Desde esta cueva, nace un pequeño arroyo permanente que desemboca aguas abajo en el río Valenzuela.

Por último, la zona del Complejo volcánico Planchón-Peteroa presenta un área termal adicional en territorio chileno. Esta zona se denomina Fumarola del Azufre y se ubica sobre el flanco S del edificio, a 3 km al SO del cráter del volcán Azu-



**Figura 4.** Fotografías de algunos sitios de muestreo: a) Terma Gen 1 del valle del Peñón; b) Terma Gen 2 del valle del Peñón; c) Terma Pelambre del valle de los Baños; d) Agua del hierro del valle de los Baños; e) Cascada norte del valle de los Baños; f) Río Valenzuela; g) Cueva del Sulfato.

fre. Aquí se presentan fumarolas y piletas burbujeantes con altas temperaturas (70 - 88 °C; Benavente 2010, Benavente et al. 2016). Sin embargo, su relación con el sistema volcánico en estudio se encuentra en debate.

## METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron datos fi-

sicoquímicos y de composiciones iónicas obtenidos durante las campañas realizadas entre los años 2015 y 2018 en 11 puntos de muestreo indicados en las figuras 2 y 3, de los cuales la mayoría fueron muestreados de manera intermitente durante este período. Se determinaron en campo los parámetros fisicoquímicos de temperatura, pH y conductividad eléctrica utilizando un equipo multiparamétrico portátil HANNA HI 991301. Se colectaron muestras de agua en botellas plásticas de 250 ml para los análisis de aniones mayoritarios ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ). Para los análisis de cationes mayoritarios ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}_{\text{tot}}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Si}$ ), elementos trazas y elementos de tierras raras (REE, por sus siglas en inglés) se colectaron las muestras en botellas plásticas de 150 ml, siendo las aguas muestreadas previamente filtradas *in situ* con una bomba de filtrado manual y filtros de 0,45  $\mu\text{m}$  de diámetro de poro. Cuando la muestra tomada presentaba temperaturas mayores a 40 °C se realizaron diluciones 1:10 en una botella extra para el análisis de Si, evitando de esta manera la posible precipitación del compuesto. Las muestras para análisis de cationes se acidificaron con  $\text{HNO}_3$  Suprapur hasta pH <2. Los análisis químicos de iones mayoritarios fueron realizados en los laboratorios del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). Los análisis de aniones fueron desarrollados a partir del método 4110 B del *Standard Methods 23<sup>rd</sup> Edition* utilizando un cromatógrafo iónico Methrom 850 Professional IC y una columna Metrosep A Supp 5. Para los análisis de cationes se utilizó un ICP-OES Optima 5300 DV. Perkin Elmer, siguiendo el método 3120 B del *Standard Methods 23<sup>rd</sup> Edition*. En las muestras de la campaña de febrero de 2018 fueron analizados los elementos trazas y REE mediante un ICP-MS utilizando un instrumento Agilent 7500ce en los laboratorios del Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia sez. Palermo (Italia). Las soluciones calibradas para todos los elementos fueron preparadas diariamente utilizando soluciones estándares Merck.

Los datos químicos de las lagunas cratéricas fueron tomadas de Tassi et al. (2016) y algunas muestras de escorrentía de Forte et al. (2022).

Para el cálculo del índice de saturación de los posibles minerales que precipitan en el sistema fue utilizado el *software* PHREEQC versión 3.1.4 (Parkhurst y Appelo 2013) con la base de datos *phreeqc.dat*. La muestra de roca de composición basalto-andesítica denominada Az6 por Tormey et al. (1995) fue utilizada como referencia normalizadora para este trabajo, debido a que es una muestra representativa de la composición de las rocas expuestas en el Complejo volcánico Planchón-Peteroa y, a su vez, presenta el más amplio análisis de elementos traza.

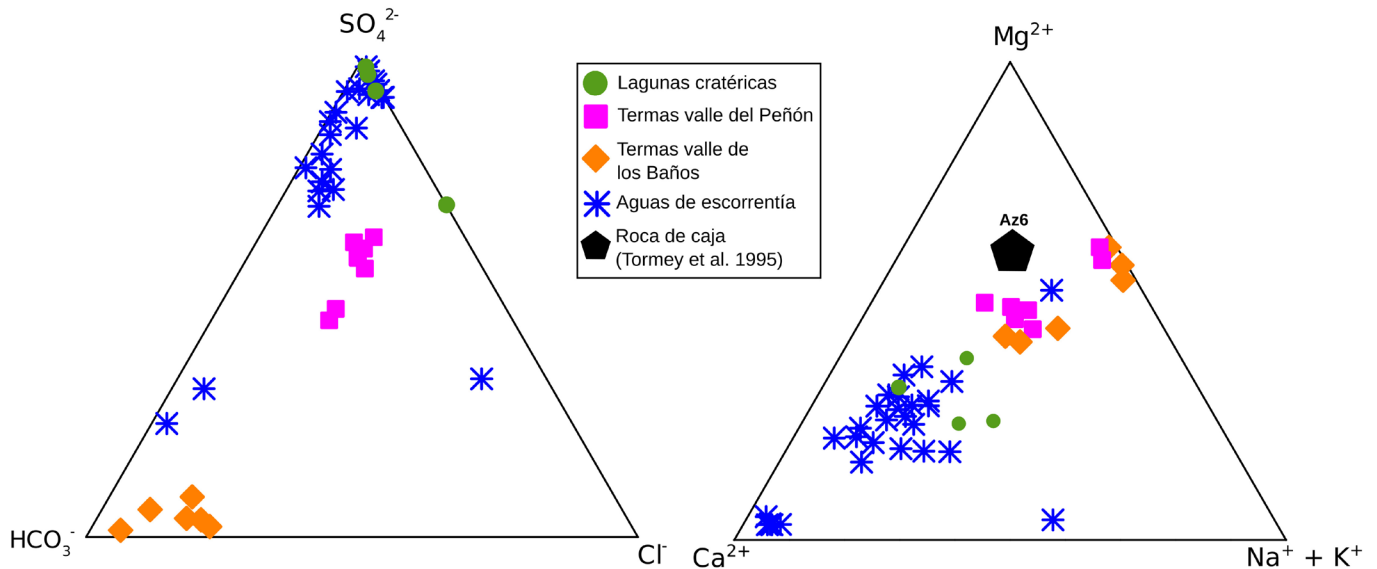
Para los diagramas binarios se graficaron las concentra-

ciones de los iones mayoritarios en función del  $\text{Na}^+$  por ser un elemento conservativo (Stumm y Morgan 1996). Para el caso de los aniones en dichos diagramas, se graficó una línea de tendencia estimativa para el sistema estudiado, mientras que para los cationes se trazó la línea de relaciones de la roca de caja normalizadora. De similar manera, en el análisis de elementos trazas se han normalizado sus concentraciones por dicha muestra de roca. Las concentraciones de las REE fueron normalizadas por valores de condrita (McDonough y Sun 1995) debido a que ninguna de las rocas de la zona de estudio analizadas químicamente por otros autores presenta resultados completos de análisis de REE.

## RESULTADOS

En el cuadro 1 se presentan los datos de los parámetros fisicoquímicos y concentraciones de los elementos mayoritarios para cada muestra de agua tomada. Las aguas termales del valle del Peñón presentan temperaturas en torno a los 27 °C, su pH varía de levemente ácido a neutro (5.88 – 6.30) y poseen conductividades eléctricas de 2800 a 3800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Por su parte, las termas del valle de los Baños son aguas más calientes (alrededor de los 40 °C), con pH cercano a la neutralidad (6.10 – 6.60) y conductividades eléctricas, más bajas que las termas del otro valle, que varían de 1400 a 2500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Por su parte, las aguas de escorrentía corresponden a la muestra agua del Hierro con pH ácido a levemente ácido (4.80 – 5.35), temperaturas bajas (4 – 9 °C) y conductividades eléctricas de 130 a 260  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La otra muestra de agua de escorrentía corresponde a la cueva del Sulfato con temperaturas en torno a los 8 °C, pH neutro (7.00 – 7.60) y conductividades eléctricas de 900 a 1100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

En la figura 5 se presentan los diagramas ternarios de aniones y cationes de los sitios de muestreo mencionados previamente, en conjunto con las muestras presentadas por Tassi et al. (2016) y Forte et al. (2022). Las relaciones aniónicas indican que las aguas de las lagunas cratéricas son sulfato-cloruradas. Por su parte, las aguas de las termas del Peñón tienen composiciones sulfatadas a intermedias, mientras que las termas del valle de los Baños son bicarbonatadas. Por último, las aguas de escorrentía son sulfatadas. En el diagrama ternario de cationes se observa que las lagunas cratéricas poseen valores relativos intermedios, levemente enriquecidos en  $\text{Ca}^{2+}$ . En el caso de las aguas termales de los valles del Peñón y de los Baños, las muestras se ubican cercanas a los valores relativos de la roca de caja, mientras que otras se presentan empobrecidas en  $\text{Ca}^{2+}$ . Por su parte, algunas de las aguas de escorrentía se presentan con rela-



**Figura 5.** Diagramas ternarios de aniones y cationes mayoritarios. Se indica la relación catiónica de la roca de caja (Tormey et al. 1995).

ciones catiónicas intermedias levemente cálcicas, pero otras se enriquecen progresivamente en  $\text{Ca}^{2+}$ .

En la figura 6 se presentan las concentraciones de los iones mayoritarios en función de la concentración de  $\text{Na}^+$  para todas las muestras. Las concentraciones de  $\text{HCO}_3^-$  de la figura 6a indican un leve enriquecimiento con respecto al  $\text{Na}^+$  de los grupos de aguas termales, siendo ligeramente mayor en las termas del valle de los Baños. Las concentraciones de  $\text{Cl}^-$  (Fig. 6b) presentan una tendencia similar para todas las muestras comportándose de manera conservativa en todos los grupos. En la figura 6c, se observa que las aguas de las termas y la mayoría de las aguas de escorrentía presentan relaciones similares de  $\text{F}^-$  con respecto al  $\text{Na}^+$ . Sin embargo, en las muestras de las lagunas cratericas y algunas muestras de escorrentía se observa un enriquecimiento en los valores de  $\text{F}^-$ . En el caso del  $\text{SO}_4^{2-}$  (Fig. 6d) se reconoce un enriquecimiento de las muestras de las lagunas cratericas así como de algunas aguas de escorrentía. Por su parte, las termas del valle de los Baños presentan un empobrecimiento en este anión con respecto a las termas del valle del Peñón.

El  $\text{K}^+$  y el  $\text{Mg}^{2+}$  (Fig. 6e y f) presentan relaciones con respecto al  $\text{Na}^+$  muy similares a la roca de caja. En cambio, en la figura 6g se reconoce un comportamiento del  $\text{Ca}^{2+}$  similar al del  $\text{SO}_4^{2-}$ . Por un lado, un empobrecimiento muy marcado en las termas del valle de los Baños y, por otro, un enriquecimiento en algunas aguas de escorrentía que interaccionan con la Formación Auquilco.

Para los elementos Fe, Al y Mn (Fig. 6h, i y j) se observa un empobrecimiento general en las aguas.

En la figura 7 se presentan los contenidos relativos entre tres elementos conservativos típicos de ambientes geoterm-

ales (Giggembach 1991). El Li se incorpora a la composición química de las aguas únicamente como consecuencia de la disolución de la roca de caja, mientras que el  $\text{Cl}^-$  y el  $\text{B}^{3+}$  pueden ingresar al sistema tanto por lixiviación de la roca de caja como por aporte de gases magmáticos (Calabrese et al. 2011). A su vez, la relación entre estos dos últimos componentes puede indicar el grado de madurez del sistema (Giggembach 1991). Se reconoce que todas las muestras de las áreas termales poseen relaciones similares de  $\text{Li}^+$ . Las relaciones  $\text{B}^{3+}/\text{Cl}^-$  son distintas entre los grupos de aguas muestreadas, a pesar de no observarse diferencias significativas entre los gases analizados de las piletas burbujeantes de cada valle (Tassi et al. 2016, Nogués 2019). Las termas del valle del Peñón se ubican en el extremo vinculado a los aportes de gases con muy bajas relaciones de  $\text{B}^{3+}/\text{Cl}^-$ , mientras que las muestras del valle de los Baños presentan relaciones intermedias entre estos gases,

Las concentraciones de los elementos trazas para las muestras están presentadas en el cuadro 2. Para cada muestra se pueden identificar tres grupos de elementos según sus concentraciones. Por un lado, el Sr como el elemento traza más abundante en cada muestra (26 - 1385 ppb). Un segundo grupo de elementos trazas presenta concentraciones menores (0.01 - 126 ppb), dentro de los que se incluye As, Ba, Co, Cr, Cs, Ni, Rb, Ti, V y Y. El último grupo presenta concentraciones mucho menores (<0,001 - 1,65 ppb) donde se incluyen Hf, Th y Zr.

Los valores normalizados de las muestras por la roca Az6 (Tormey et al. 1995) se representan como patrones lineales en la figura 8. Las muestras de las termas del valle del Peñón tienen casi el mismo patrón normalizado, por lo que estarían

**Cuadro 1.** Composición química de las muestras tomadas durante los años 2015 y 2018. Las concentraciones están en ppm, las temperaturas en °C y las conductividades eléctricas (CE) en µS/cm. (n.a.: no analizado; n.d.: no detectado).

N.º de sitio	Sitio de muestreo	Grupo	Autor	Fecha	T	pH	CE	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl	F	Na	K	Ca	Mg	Fe	Si	Al	B	Li	Mn	Error (%)
1	Gen 1	Termas valle del Peñón	Este trabajo	05/03/2016	27	5.88	3780	441	911	235	0.50	248	41	21	248	0.094	57	0.015	1.12	0.31	0.033	1.24
1	Gen 1	Termas valle del Peñón	Este trabajo	19/02/2018	26	6.27	3270	611	1448	364	1.80	196	30	200	205	0.88	n.a.	0.009	1.02	0.20	0.43	16.17
1	Gen 1	Termas valle del Peñón	Este trabajo	28/12/2018	n.a.	6.20	2826	567	744	192	0.96	221	31	162	157	0.007	56	0.010	0.80	0.24	0.33	2.49
2	Gen 2	Termas valle del Peñón	Este trabajo	23/03/2015	24	5.90	n.a.	308	893	222	0.60	224	39	203	215	0.33	19	0.24	0.59	0.028	0.020	12.78
2	Gen 2	Termas valle del Peñón	Este trabajo	20/02/2017	27	6.10	2990	770	864	238	0.95	230	37	205	210	9.50	n.a.	n.d.	1.20	0.20	0.38	2.09
2	Gen 2	Termas valle del Peñón	Este trabajo	19/02/2018	26	6.01	3010	633	1345	336	1.70	185	28	200	196	0.67	n.a.	0.007	0.99	0.19	0.36	15.34
2	Gen 2	Termas valle del Peñón	Este trabajo	28/12/2018	n.a.	6.10	3124	648	850	215	1.20	238	36	185	177	0.007	63	0.009	1.00	0.30	0.39	1.51
4	Curicó	Termas valle de los Baños	Este trabajo	16/03/2015	42	6.52	n.a.	865	32	101	0.25	153	34	9.20	107	4.80	207	0.16	n.a.	0.22	n.d.	1.04
4	Curicó	Termas valle de los Baños	Este trabajo	03/03/2016	41	6.40	2032	937	11	32	0.26	148	37	30	127	0.007	132	0.001	2.61	0.16	n.d.	9.52
4	Curicó	Termas valle de los Baños	Este trabajo	21/02/2017	43	6.60	1930	1081	5.44	120	0.33	138	34	134	116	1.19	n.a.	n.d.	1.90	0.16	0.078	5.65
4	Curicó	Termas valle de los Baños	Este trabajo	17/02/2018	41	6.60	2190	779	17	124	0.60	121	28	118	107	0.001	n.a.	n.d.	2.78	n.d.	0.049	12.16
5	Pelambre	Termas valle de los Baños	Este trabajo	16/03/2015	39	6.23	n.a.	718	60	81	0.22	146	31	9.80	87	3.50	185	0.25	2.04	n.d.	n.d.	0.52
5	Pelambre	Termas valle de los Baños	Este trabajo	03/03/2016	39	6.13	146	769	38	65	0.45	137	29	75	101	0.002	111	0.001	2.32	0.27	n.d.	11.74
8	Agua del Hierro	Aguas de escorrentía	Este trabajo	01/03/2016	4	4.81	21	n.d.	24	2.20	0.23	4.10	1.80	11	3.5	20	28	0.078	0.068	n.d.	0.38	29.79
8	Agua del Hierro	Aguas de escorrentía	Este trabajo	22/02/2018	8	5.35	260	68	18	1.70	0.14	4.90	2.60	20	5.80	31	n.a.	0.17	0.011	0.004	0.52	7.42
8	Agua del Hierro	Aguas de escorrentía	Este trabajo	28/12/2018	n.a.	4.80	133	21	12	1.90	0.13	3.60	2.30	10	3.00	0.014	20	0.034	n.a.	n.d.	0.25	19.77
10	Cueva del Sulfato	Aguas de escorrentía	Este trabajo	03/03/2016	9	7.40	960	91	493	3.48	0.12	13	3.40	251	5.60	0.67	21	0.38	0.55	0.029	0.065	6.82
10	Cueva del Sulfato	Aguas de escorrentía	Este trabajo	21/02/2017	8	7.52	894	67	444	3.10	0.23	12	2.80	205	4.30	n.a.	n.a.	n.d.	0.63	n.d.	n.d.	3.20



10	Cueva del Sulfato	Aguas de escorrentía	Este trabajo	17/02/2018	8	7.04	970	56	655	3.70	0.35	11	2.30	227	4.70	0.26	n.a.	0.14	0.60	0.019	0.012	9.20
10	Cueva del Sulfato	Aguas de escorrentía	Este trabajo	28/12/2018	n.a.	7.60	1098	57	542	2.80	0.29	7.40	2.40	261	5.10	0.003	19	0.015	0.60	0.030	n.d.	5.61
3	Arroyo Peñón	Aguas de escorrentía	Forte et al. (en prensa)	16/03/2015	24	5.90	n.a.	308	893	222	0.57	224	39	203	214	9.68	57	0.15	n.a.	0.30	0.41	-
3	Arroyo Peñón	Aguas de escorrentía	Forte et al. (en prensa)	05/03/2016	7	7.70	390	34	130	4.54	0.20	8.90	2.40	35	14	2.41	15	2.05	n.a.	n.d.	0.35	-
3	Arroyo Peñón	Aguas de escorrentía	Forte et al. (en prensa)	19/02/2018	9	7.47	230	10	79	4.30	0.14	5.90	1.50	18	8.20	1.00	n.a.	0.038	n.a.	0.006	0.21	-
3	Arroyo Peñón	Aguas de escorrentía	Forte et al. (en prensa)	28/12/2018	n.a.	4.10	267	n.d.	103	4.60	0.88	4.50	2.00	27	5.10	0.028	7.46	3.23	n.a.	n.d.	0.22	-
6	Cascada sur	Aguas de escorrentía	Forte et al. (en prensa)	01/03/2016	7	4.01	160	n.d.	124	2.38	0.048	3.30	2.20	11	2.90	10	25	12	0.032	n.d.	0.19	-
6	Cascada sur	Aguas de escorrentía	Forte et al. (en prensa)	22/02/2018	10	4.18	520	n.d.	380	103	n.a.	6.10	1.40	36	7.00	43	n.a.	23	0.007	0.009	0.62	-
6	Cascada sur	Aguas de escorrentía	Forte et al. (en prensa)	28/12/2018	n.a.	3.40	362	n.d.	118	1.50	0.41	3.20	1.70	20	3.60	0.14	9.80	5.26	n.a.	n.d.	0.23	-
7	Cascada norte	Aguas de escorrentía	Forte et al. (en prensa)	16/03/2015	10	5.6	n.a.	16	34	42	0.65	30	1.50	17	3.30	3.50	n.a.	1.07	n.a.	n.d.	n.d.	-
7	Cascada norte	Aguas de escorrentía	Forte et al. (en prensa)	01/03/2016	12	5.48	90	13	46	2.57	1.34	3.60	1.60	15	4.90	4.47	18	5.76	n.a.	n.d.	0.38	-
7	Cascada norte	Aguas de escorrentía	Forte et al. (en prensa)	22/02/2018	12	5.81	120	19	45	5.3	0.090	2.30	1.40	11	2.70	0.080	n.a.	0.25	0.003	0.001	0.15	-
7	Cascada norte	Aguas de escorrentía	Forte et al. (en prensa)	28/12/2018	n.a.	4.80	141	n.d.	44	6.10	0.38	2.20	5.70	13	2.10	0.011	7.93	0.67	n.a.	n.d.	0.090	-
9	Puente arroyo de los Baños	Aguas de escorrentía	Forte et al. (en prensa)	01/03/2016	7	5.20	150	n.d.	100	3.11	n.a.	6.00	2.60	16	5.90	12	20	9.06	0.099	n.d.	0.22	-
9	Puente arroyo de los Baños	Aguas de escorrentía	Forte et al. (en prensa)	21/02/2017	12	6.02	425	n.d.	99	2.35	0.18	3.60	1.60	9.60	3.20	2.97	n.a.	0.44	0.38	0.020	0.097	-
9	Puente arroyo de los Baños	Aguas de escorrentía	Forte et al. (en prensa)	19/02/2018	15	4.73	270	n.d.	184	4.20	n.a.	3.90	1.60	17	4.30	14	n.a.	5.95	0.038	0.006	0.30	-
9	Puente arroyo de los Baños	Aguas de escorrentía	Forte et al. (en prensa)	28/12/2018	n.a.	3.80	231	n.d.	77	2.20	0.37	3.90	1.80	15	3.80	0.061	7.93	0.66	0.047	n.d.	0.16	-

11	Río Valenzuela	Aguas de escorrentía	Forte et al. (en prensa)	03/03/2016	12	7.61	370	60	169	9.49	0.32	14	3.40	54	17	12	18	7.52	0.12	0.015	0.30	-	
11	Río Valenzuela	Aguas de escorrentía	Forte et al. (en prensa)	21/02/2017	12	7.42	847	125	319	20	0.64	23	3.60	130	28	0.11	n.a.	n.d.	0.48	n.d.	0.037	-	
11	Río Valenzuela	Aguas de escorrentía	Forte et al. (en prensa)	17/02/2018	17	7.60	900	128	377	33	0.27	22	3.30	107	30	0.056	n.a.	0.012	0.070	0.025	0.041	-	
11	Río Valenzuela	Aguas de escorrentía	Forte et al. (en prensa)	28/12/2018	n.a.	7.40	696	74	249	13	0.17	12	1.80	102	20	0.028	8.86	0.020	0.073	0.020	n.d.	-	
-	Pet5	Lagunas cratéricas	Tassi et al. (2016)	-/03/2011	43	1.49	n.a.	n.d.	3300	44	5.20	82	130	220	140	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-
-	Pet9	Lagunas cratéricas	Tassi et al. (2016)	-/03/2011	19	2.73	n.a.	n.d.	3000	200	9.90	180	42	330	380	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-
-	Pet10	Lagunas cratéricas	Tassi et al. (2016)	-/03/2011	7	2.91	n.a.	n.d.	2000	660	39	140	34	520	180	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-
-	Pet5	Lagunas cratéricas	Tassi et al. (2016)	-/03/2012	31	1.50	n.a.	n.d.	2800	92	2.40	63	16	180	95	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-

siendo controladas por los mismos procesos (Nogués 2019). Dicho patrón presenta relaciones relativamente similares entre elementos alcalinos y alcalinos térreos. El resto de las concentraciones absolutas de los elementos trazas analizados (Cuadro 2) son similares en las termas muestreadas, a excepción del B<sup>3+</sup>.

Las aguas de escorrentía presentan valores normalizados de los elementos alcalinos y alcalinos térreos menores a los de las termas descritas. A su vez, las muestras Cascada sur y Puente arroyo de los Baños presentan altas concentraciones absolutas de todos los elementos trazas (Cuadro 2). El Ba, Ti, Zr, Y, Hf y Th presentan contenidos empobrecidos en todas las muestras por ser elementos muy inmóviles

Los resultados de las REE se observan en el cuadro 3, donde se reconoce que las aguas de las termas de ambos valles poseen concentraciones bajas de REE (<0.0001 – 0.11 ppb) mientras que las aguas de escorrentía presentan mayores concentraciones de estos elementos (<0.0001 – 7.6 ppb). Las concentraciones de REE obtenidas en las aguas y la muestra de tefra MS-07 datada de 1050 ± 90 años AP (Durán et al. 2016) fueron normalizadas respecto a la condrita de McDonough y Sun (1995) en la figura 9, donde se reconocen patrones casi horizontales para todas las muestras. La muestra de las termas del valle del Peñón se presenta marcadamente empobrecida respecto a la condrita, a la tefra de referencia e incluso a las aguas de escorrentía. Las aguas de escorrentía presentan un menor empobrecimiento que las aguas de las termas.

## DISCUSIÓN

### Iones mayoritarios

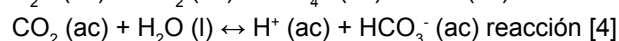
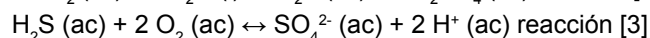
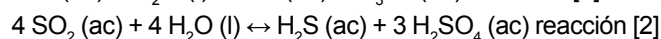
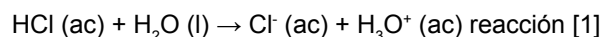
En función de los contenidos relativos de iones mayoritarios (Cuadro 1 y Fig. 5) que presentan las aguas muestreadas, sumadas a las presentadas por otros autores (Tassi et al. 2016, Forte et al. 2022), se las puede clasificar en cuatro grupos distintos: a) aguas sulfato-cloruradas ácidas, con relaciones intermedias de cationes y un rango de temperatura amplio (7 - 42 °C), pH ácido (1.5 - 3) y conductividades eléctricas altas (5000 - 6500 µS/cm) pertenecientes a las lagunas cratéricas; b) aguas levemente sulfatadas a intermedias y relaciones catiónicas intermedias, con temperaturas ligeramente mayores a la temperatura ambiente (25 - 27 °C), pH levemente ácido a neutro (5.8 – 6.3) y conductividades eléctricas medias a altas (2800 - 3800 µS/cm) que corresponden a las muestras Gen 1 y Gen 2 de las termas del valle del Peñón; c) aguas bicarbonatadas magnesio-sódicas con temperaturas

**Cuadro 2.** Concentraciones en ppb de los elementos traza para las muestras tomadas en febrero de 2018. (n.d.: no detectado).

N.º de sitio	Sitio de muestreo	Grupo	Autor	Fecha	As	Ba	Co	Cr	Cs	Hf	Ni	Rb	Sr	Th	Ti	V	Y	Zn	Zr
1	Gen 1	Termas valle del Peñón	Este trabajo	19/02/2018	3.33	15.4	2.74	0.030	.05	n.d.	3.07	76.4	805	n.d.	8.97	0.18	0.040	34.4	0.070
2	Gen 2	Termas valle del Peñón	Este trabajo	19/02/2018	3.47	14.1	2.20	0.015	0.96	0.002	3.25	72.7	789	n.d.	7.45	0.20	0.029	7.90	0.037
3	Arroyo Peñón	Aguas de escorrentía	Este trabajo	19/02/2018	0.14	2.82	2.17	0.039	0.031	0.004	1.86	3.66	48.8	0.006	1.44	0.15	0.18	10.4	0.066
4	Curicó	Termas valle de los Baños	Este trabajo	17/02/2018	0.27	75.5	0.060	n.d.	10.1	n.d.	n.d.	101	154	n.d.	10.9	0.19	n.d.	n.d.	0.034
6	Cascada sur	Aguas de escorrentía	Este trabajo	22/02/2018	6.21	52.1	10.7	5.94	0.31	0.030	10.7	8.87	128	0.64	126	68.6	15.73	65.4	1.02
7	Cascada norte	Aguas de escorrentía	Este trabajo	22/02/2018	0.070	4.83	0.38	0.067	0.039	0.001	0.50	3.06	26.1	0.002	3.82	0.52	0.67	22.5	0.045
8	Agua del Hierro	Aguas de escorrentía	Este trabajo	22/02/2018	0.29	4.57	0.32	0.076	0.047	0.001	0.27	4.83	103	n.d.	6.32	5.39	0.47	4.08	0.024
9	Puente arroyo de los Baños	Aguas de escorrentía	Este trabajo	19/02/2018	4.32	34.4	2.74	0.82	0.15	0.045	2.51	5.43	54.6	0.21	92.5	9.97	6.37	32.7	1.63
10	Cueva del Sulfato	Aguas de escorrentía	Este trabajo	17/02/2018	1.45	10.5	0.47	0.10	0.40	0.001	0.47	9.12	1385	0.018	12.2	11.0	0.096	17.1	0.058
11	Río Valenzuela	Aguas de escorrentía	Este trabajo	17/02/2018	0.67	7.81	0.43	0.053	0.24	n.d.	6.49	7.14	667	0.002	3.01	10.3	0.026	4.37	0.008

cercanas a los 40 °C, pH neutro (6.1 – 6.6) y conductividades eléctricas entre 1400 y 2500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , en las que se incluyen las piletas burbujeantes del valle de los Baños, correspondientes a las muestras de Curicó y Pelambre; d) aguas de escorrentía sulfatadas cálcicas, frías (3.5 - 17 °C), ácidas a neutras (3.4 – 7.9) y con conductividades eléctricas bajas a medias (21 - 1100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

De esta manera, se pueden interpretar algunos de los procesos que controlan la composición de las aguas analizadas. Las aguas de las lagunas cratéricas provienen principalmente de aguas superficiales meteóricas generadas a partir de la fusión de los glaciares y nieves de la cima del edificio volcánico. Estas se enriquecen en  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  por la solubilización del HCl (ecuación 1) y la dismutación del  $\text{SO}_2$  gaseoso (ecuación 2) cuando los gases volcánicos alcanzan el ambiente hidrotermal superficial, donde también se produce la solubilización y oxidación del  $\text{H}_2\text{S}$  gaseoso de la ecuación 3 (Giggembach 1987, Symonds et al. 1994, Nogués 2019). La acidez de estas aguas favorece el escape a la atmósfera del  $\text{CO}_2$ . El anión  $\text{HCO}_3^-$  se encuentra ausente, debido a que la reacción 4 que controla los contenidos de este anión se mantiene inhibida mientras las lagunas presentan condiciones de pH inferiores a 4 (Stumm y Morgan 1996). Esta composición es similar a las lagunas cratéricas que se encuentran en otros sistemas volcánicos con similares características en la región (e.g. Agosto et al. 2012, Agosto y Varekamp 2016, Benavente et al. 2016) y el mundo (e.g. Rouwet et al. 2009, Inguaggiato et al. 2015, Varekamp 2015).



En el caso de las aguas termales de ambos valles, la composición está controlada mayormente por la interacción del agua superficial con el  $\text{CO}_2$  que burbujea en estas piletas (ecuación 4). La disolución de  $\text{CO}_2$  en las piletas burbujeantes genera un enriquecimiento en  $\text{HCO}_3^-$  con respecto a la composición sulfatada de las aguas superficiales que drenan y alimentan las piletas de ambos valles. Así, las aguas termales del valle de los Baños son bicarbonatadas, mientras que las del valle del Peñón se mantienen sulfatadas a intermedias. Si bien se ha reconocido que los gases emanados en dichas piletas burbujeantes son muy similares composicionalmente (Tassi et al. 2016, Nogués 2019), esto no se observa en la temperatura, conductividad eléctrica y composición de las aguas.

Los glaciares que dan origen a las aguas de escorrentía

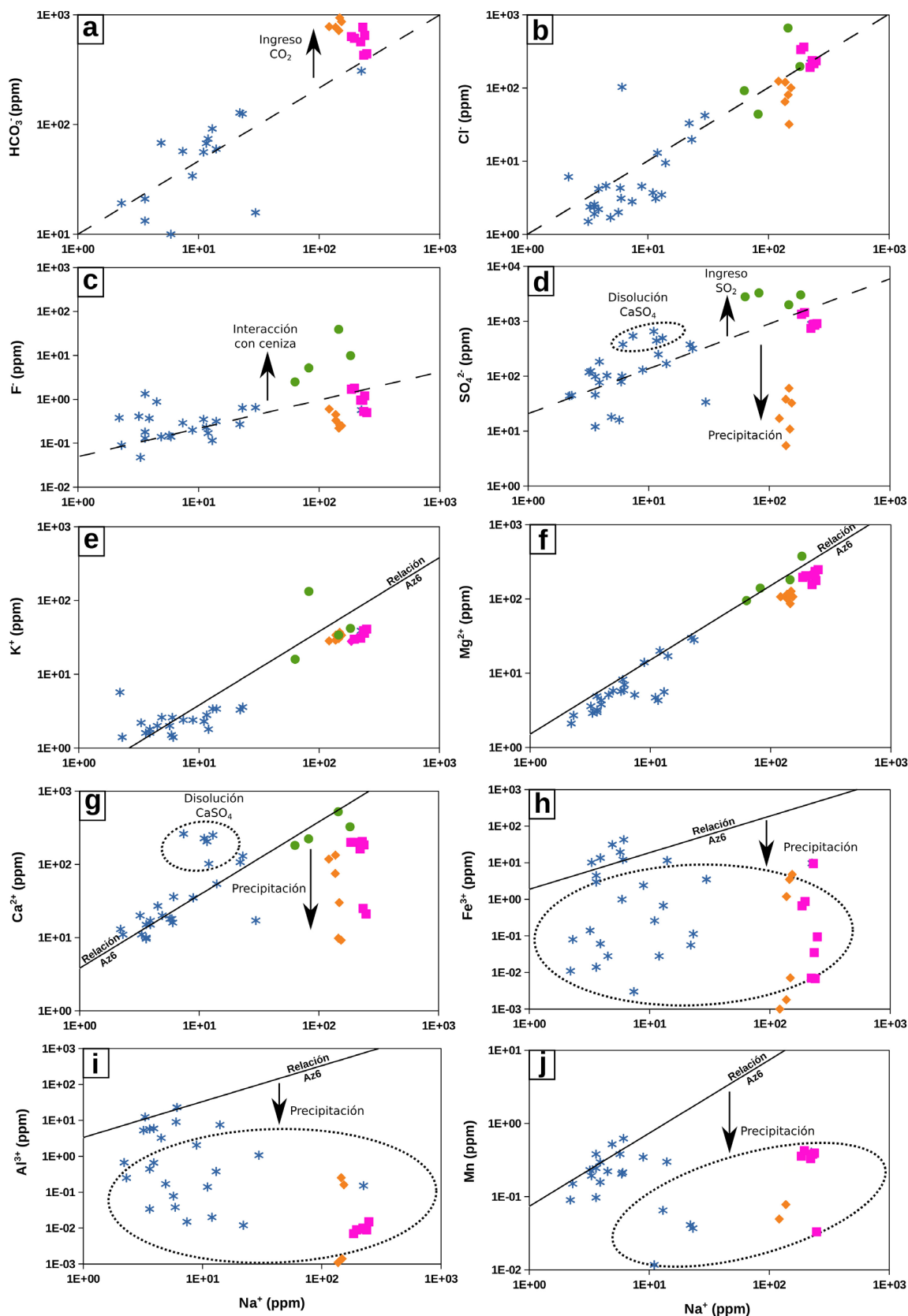
**Cuadro 3.** Concentraciones en ppb de los elementos de tierras raras para las muestras tomadas en febrero de 2018. (n.d.: no detectado).

-N.º de sitio	Sitio de muestreo	Grupo	Autor	Fecha	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
1	Gen 1	Termas valle del Peñón	Este trabajo	19/02/2018	0.11	0.022	0.002	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.003	n.d.	0.003	n.d.	0.004	n.d.
2	Gen 2	Termas valle del Peñón	Este trabajo	19/02/2018	0.071	0.014	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.001	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
3	Arroyo del Peñón	Aguas de escorrentía	Este trabajo	19/02/2018	0.14	0.20	0.026	0.13	0.025	0.005	0.024	0.003	0.020	0.005	0.012	n.d.	n.d.	n.d.
6	Cascada sur	Aguas de escorrentía	Este trabajo	22/02/2018	3.32	7.62	1.10	5.23	1.43	0.32	1.87	0.33	2.07	0.50	1.50	0.22	1.38	0.22
7	Cascada norte	Aguas de escorrentía	Este trabajo	22/02/2018	0.17	2.30	0.040	0.25	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.060	n.d.	n.d.	n.d.
8	Agua del Hierro	Aguas de escorrentía	Este trabajo	22/02/2018	0.22	0.19	0.022	0.10	0.026	0.006	0.037	0.006	0.034	0.010	0.031	0.004	0.028	0.004
9	Puente arroyo de los Baños	Aguas de escorrentía	Este trabajo	19/02/2018	1.19	2.76	0.38	1.82	0.48	0.10	0.67	0.12	0.81	0.20	0.60	0.088	0.57	0.091
10	Cueva del Sulfato	Aguas de escorrentía	Este trabajo	17/02/2018	0.32	0.25	0.031	0.12	0.028	0.005	0.022	0.003	0.016	0.003	0.007	n.d.	0.008	0.001
11	Río Valenzuela	Aguas de escorrentía	Este trabajo	17/02/2018	0.16	0.038	0.005	0.019	n.d.	0.001	n.d.	0.0005	n.d.	0.001	n.d.	n.d.	0.002	n.d.

se encuentran tapados con capas de cenizas intercaladas, emitidas por el volcán Peteroa en distintos eventos. Por lo tanto, su derretimiento y la interacción con dicha ceniza induciría la carga con iones sulfatos y la acidificación de estas aguas (Nogués 2019, Forte et al. 2022). Esto es evidenciado en dichas aguas también por el contenido de  $F^-$  que se reconoce en su composición. Otro proceso que aporta iones sulfatos a este grupo de aguas es la interacción con yeso y anhidrita de la Formación Auquico, mucho más significativo en el caso de las muestras del río Valenzuela y la cueva del Sulfato, ya que la mayoría de estas muestras se presentan subsaturadas con respecto a estos minerales (índice de saturación  $< -1.5$ , Cuadro 4).

La concentración de cationes en la composición de las aguas responde fundamentalmente a los elementos removidos de las rocas circundantes a partir de la interacción de estas con las aguas meteóricas y fluidos de origen profundo (Stumm y Morgan 1996). El proceso de lixiviación de los minerales formadores de roca es mucho más intenso en el caso de las lagunas cratéricas debido a sus condiciones de temperatura y acidez.

La diferencia en la fisicoquímica y composición entre las aguas de las termas de ambos valles se debe a dos procesos diferentes. Por un lado, Lamberti et al. (2020) sugirieron que los mecanismos de transporte de fluidos termales son diferentes entre ambos valles a partir del estudio del flujo de  $CO_2$  difuso emitido a través del suelo. La desgasificación difusa de  $CO_2$  anómala en el valle del Peñón tiene lugar mayormente en un área lateral del valle, desconectada de la posición de las piletas termales Gen 1 y Gen 2. Mientras que en el valle de los Baños esta emisión tiene lugar mediante una estructura de desgasificación difusa cuya ubicación espacial coincide efectivamente con la ubicación de la totalidad de las piletas termales del valle, incluidas los sitios de muestreo Curicó y Pelambre. Esta correlación espacial entre el flujo anómalo de  $CO_2$  del suelo y la posición de las piletas burbujeantes sugiere un aporte de fluidos de proveniencia profunda relativamente mayor en el valle de los Baños respecto al valle del Peñón. Por otro lado, esta diferencia se puede deber al posible aporte que hagan las aguas de escorrentía a las termas, según el caudal del curso que alimenta a la terma muestreada. Las termas del valle de los Baños podrían tener menor aporte de aguas de escorrentía hacia ellas, por lo que son más calientes y tienen mayores concentraciones de  $HCO_3^-$  (700 a 1100 ppm). En cambio, las termas del valle del Peñón tendrían un aporte mayor de cursos fluviales someros presentes en este sector del valle, por lo que son más frías y más conductivas eléctricamente, con menores concentraciones de  $HCO_3^-$  (400 a 650 ppm) pero mayores concentraciones del resto de los



**Figura 6.** Diagramas binarios de concentración de aniones mayoritarios, cationes mayoritarios y cationes minoritarios en función de la concentración de Na<sup>+</sup>. Círculos verdes son lagunas cratéricas; cuadrados magenta son termas del valle del Peñón; rombos naranjas son termas del valle de los Baños; asteriscos azules son aguas de escorrentía. Línea punteada es línea de tendencia estimativa para la zona de estudio; línea completa es la relación catiónica de la roca de caja.

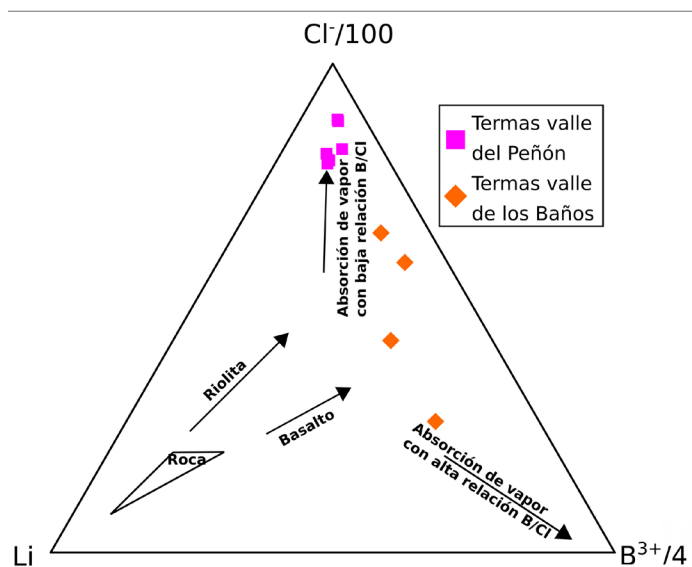
**Cuadro 4.** Valores de índices de saturación de las muestras presentadas en el trabajo y de Forte et al. (2022) para los minerales calcita, aragonita, yeso y anhidrita. (n.d. es no determinado).

N.º de sitio	Sitio de muestreo	Grupo	Autor	Fecha	IS Calcita	IS Aragonita	IS Yeso	IS Anhidrita
1	Gen 1	Termas valle del Peñón	Este trabajo	05/03/2016	-1.80	-2.01	-1.63	-1.92
1	Gen 1	Termas valle del Peñón	Este trabajo	19/02/2018	-0.38	-0.77	-0.54	-0.83
1	Gen 1	Termas valle del Peñón	Este trabajo	28/12/2018	-0.50	-0.93	-0.8	-1.11
2	Gen 2	Termas valle del Peñón	Este trabajo	23/03/2015	-0.52	-0.67	-1.28	-1.76
2	Gen 2	Termas valle del Peñón	Este trabajo	20/02/2017	-0.37	-0.49	-0.71	-0.99
2	Gen 2	Termas valle del Peñón	Este trabajo	19/02/2018	-0.62	-0.77	-0.56	-0.85
2	Gen 2	Termas valle del Peñón	Este trabajo	28/12/2018	-0.51	-0.82	-0.73	-1.03
4	Curicó	Termas valle de los Baños	Este trabajo	16/03/2015	-0.84	-1.02	-3.25	-3.37
4	Curicó	Termas valle de los Baños	Este trabajo	03/03/2016	-0.44	-0.57	-3.24	-3.37
4	Curicó	Termas valle de los Baños	Este trabajo	21/02/2017	0.46	0.21	-2.99	-3.11
4	Curicó	Termas valle de los Baños	Este trabajo	17/02/2018	0.27	0.09	-2.47	-2.6
5	Pelambre	Termas valle de los Baños	Este trabajo	16/03/2015	-1.21	-1.34	-2.9	-3.05
5	Pelambre	Termas valle de los Baños	Este trabajo	03/03/2016	-0.42	-0.55	-2.27	-2.43
8	Agua del Hierro	Aguas de escorrentía	Este trabajo	01/03/2016	n.d.	n.d.	-2.55	-2.81
8	Agua del Hierro	Aguas de escorrentía	Este trabajo	22/02/2018	-3.07	-3.22	-2.68	-2.94
8	Agua del Hierro	Aguas de escorrentía	Este trabajo	28/12/2018	-3.56	-3.74	-2.91	-3.24
10	Cueva del Sulfato	Aguas de escorrentía	Este trabajo	03/03/2016	-0.91	-0.99	-0.72	-0.93
10	Cueva del Sulfato	Aguas de escorrentía	Este trabajo	21/02/2017	-0.77	-0.83	-0.61	-0.84
10	Cueva del Sulfato	Aguas de escorrentía	Este trabajo	17/02/2018	-0.69	-0.75	-0.50	-0.75
3	Arroyo Peñón	Aguas de escorrentía	Forte et al. (2022)	16/03/2015	-0.91	-1.13	-1.53	-1.77
3	Arroyo Peñón	Aguas de escorrentía	Forte et al. (2022)	05/03/2016	-1.56	-1.70	-1.99	-2.23
3	Arroyo Peñón	Aguas de escorrentía	Forte et al. (2022)	19/02/2018	-1.88	-2.03	-2.11	-2.37
3	Arroyo Peñón	Aguas de escorrentía	Forte et al. (2022)	28/12/2018	n.d.	n.d.	-2.20	-2.45
6	Cascada sur	Aguas de escorrentía	Forte et al. (2022)	01/03/2016	n.d.	n.d.	-2.11	-2.34
6	Cascada sur	Aguas de escorrentía	Forte et al. (2022)	22/02/2018	n.d.	n.d.	-1.44	-1.69
6	Cascada sur	Aguas de escorrentía	Forte et al. (2022)	28/12/2018	n.d.	n.d.	-2.30	-2.52
7	Cascada norte	Aguas de escorrentía	Forte et al. (2022)	16/03/2015	-3.11	-3.30	-2.90	-3.14
7	Cascada norte	Aguas de escorrentía	Forte et al. (2022)	01/03/2016	-3.07	-3.25	-2.69	-2.91
7	Cascada norte	Aguas de escorrentía	Forte et al. (2022)	22/02/2018	n.d.	n.d.	-2.51	-2.76
7	Cascada norte	Aguas de escorrentía	Forte et al. (2022)	28/12/2018	n.d.	n.d.	-2.57	-2.81
9	Puente arroyo de los Baños	Aguas de escorrentía	Forte et al. (2022)	01/03/2016	n.d.	n.d.	-2.45	-2.70
9	Puente arroyo de los Baños	Aguas de escorrentía	Forte et al. (2022)	21/02/2017	n.d.	n.d.	-2.39	-2.66
9	Puente arroyo de los Baños	Aguas de escorrentía	Forte et al. (2022)	19/02/2018	n.d.	n.d.	-1.89	-2.14
9	Puente arroyo de los Baños	Aguas de escorrentía	Forte et al. (2022)	28/12/2018	n.d.	n.d.	-2.60	-2.77
11	Río Valenzuela	Aguas de escorrentía	Forte et al. (2022)	03/03/2016	-0.27	-0.43	-1.33	-1.50
11	Río Valenzuela	Aguas de escorrentía	Forte et al. (2022)	21/02/2017	0.14	-0.01	-1.08	-1.32
11	Río Valenzuela	Aguas de escorrentía	Forte et al. (2022)	17/02/2018	0.10	-0.05	-0.99	-1.24
11	Río Valenzuela	Aguas de escorrentía	Forte et al. (2022)	28/12/2018	-0.22	-0.40	-1.16	-1.39

iones mayoritarios debido a la interacción de las aguas de escorrentía con las cenizas, muy evidenciado en el caso de las concentraciones de  $F^-$ . Sin embargo, esta segunda propuesta debería corroborarse y abordarse con mayor detalle y precisión con datos de caudal o de cálculos de porcentaje de mezcla a partir de datos isotópicos.

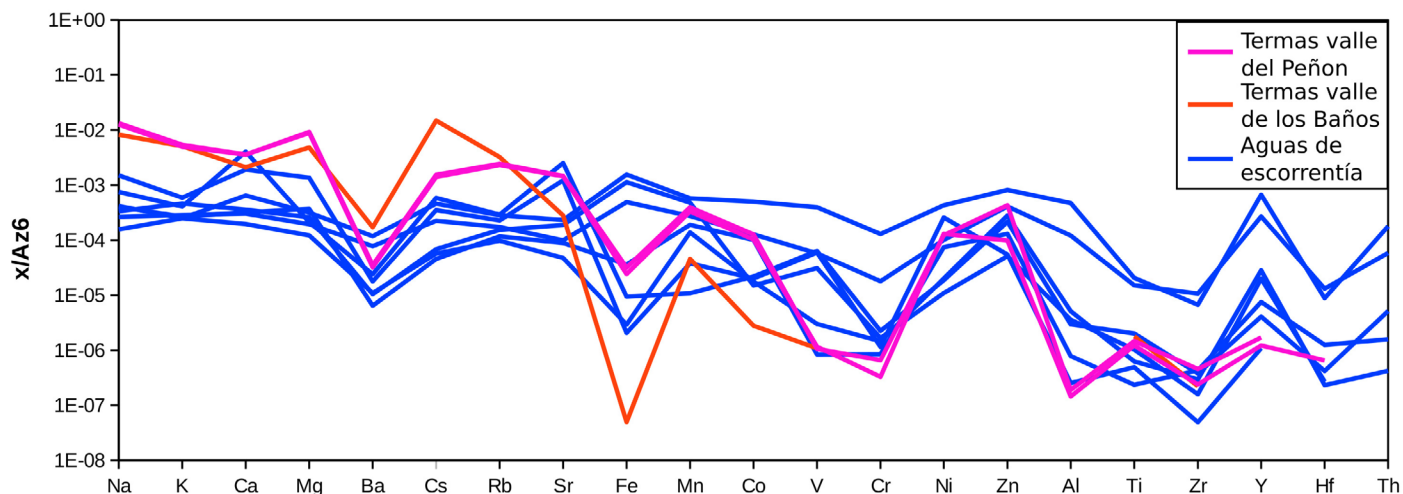
Lo mencionado previamente indica a su vez la diferencia reconocida en las relaciones de  $HCO_3^-$  de la figura 6a. Para la figura 6b, en el caso de las lagunas cratéricas el incremento en los valores de  $F^-$  estaría directamente relacionado con la interacción con el gas volcánico HF más la eventual lixiviación de cenizas que aportan este ión. La lixiviación de cenizas también aportaría  $F^-$  en las aguas de escorrentía que presentan este enriquecimiento, proceso descrito por Gammons et al. (2005) y Llano et al. (2020) en el Complejo Volcánico Copahue–Caviahue. En el caso del  $SO_4^{2-}$  (Fig. 6d), diferentes procesos estarían controlando su composición. Las lagunas cratéricas se encuentran enriquecidas en  $SO_4^{2-}$  por el aporte del gas magmático  $SO_2$ , lo cual no sucede en las termas ya que el burbujeo en las mismas no está alimentado por la misma fuente magmática que el área cratérica del volcán Peteroa (Tassi et al. 2016, Nogués 2019). A su vez, las muestras de las termas del valle de los Baños presentan un empobrecimiento en las concentraciones de  $SO_4^{2-}$  por la posible precipitación de dicho anión formando parte de minerales secundarios, analizado con mayor detalle más adelante. Por último, algunas muestras de aguas de escorrentía presentan enriquecimiento en este anión por la disolución de yeso o anhidrita de la Formación Auquilco.

Las relaciones similares de  $K^+$  y  $Mg^{2+}$  con respecto al  $Na^+$  (Fig. 6e y f) indican la inexistencia de una reacción secundaria que involucre de manera significativa a estos elementos. En cambio, el empobrecimiento del  $Ca^{2+}$  con respecto al  $Na^+$  en

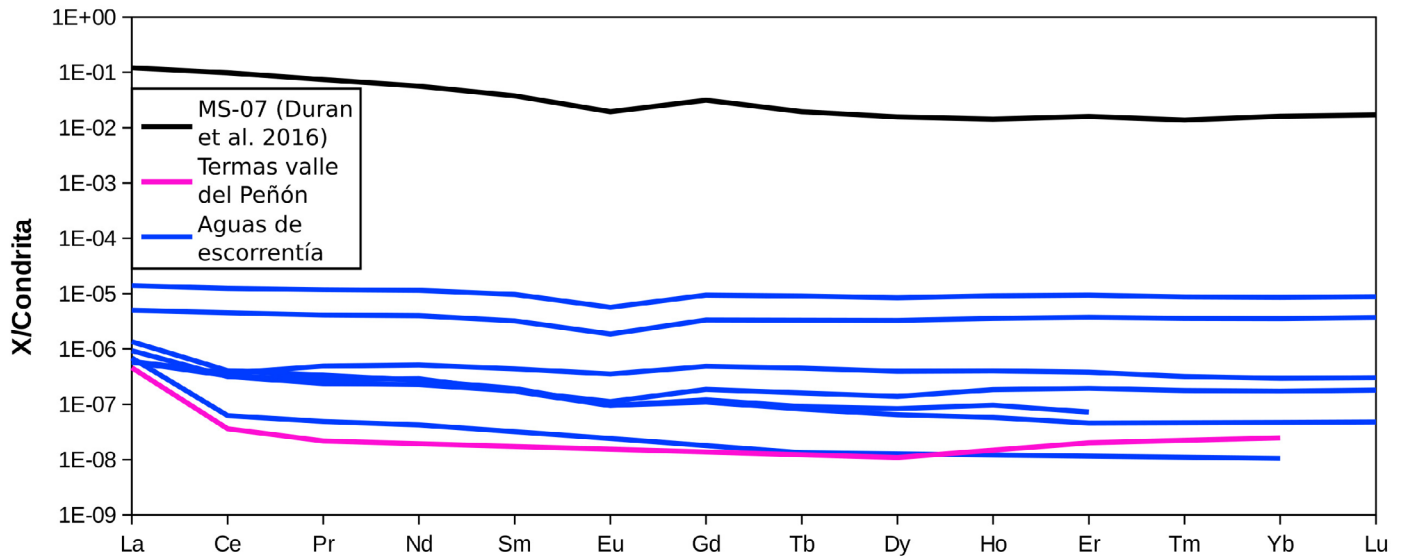


**Figura 7.** Diagrama ternario de elementos conservativos, donde se reconoce una separación entre las muestras pertenecientes a las termas de cada valle.

las termas del valle de los Baños (Fig. 6g) estaría controlado por un proceso de precipitación de mineralogía secundaria, que, vinculado con el empobrecimiento de  $SO_4^{2-}$ , podría corresponder a los minerales yeso y/o anhidrita. Sin embargo, estas muestras se encuentran subsaturadas en ambos minerales y más cerca del equilibrio en minerales como calcita y aragonita (Cuadro 4), similares a lo presentado por Sanci et al. (2010), lo cual podría indicar la combinación de precipitados de  $Ca^{2+}$  que involucren como anión principal tanto al  $SO_4^{2-}$  como al  $HCO_3^-$ . Por otro lado, si bien en algunas de las muestras de las termas del valle del Peñón se reconoce un empobrecimiento en el  $Ca^{2+}$ , es mucho menor en el caso del  $SO_4^{2-}$ , pero a pesar de esto, el índice de saturación en minerales como yeso, anhidrita, calcita o aragonita se encuentran le-



**Figura 8.** Concentraciones de elementos trazas normalizadas por la muestra de roca Az6 (Tormey et al. 1995).



**Figura 9.** Concentraciones de elementos de tierras raras normalizadas por condrita (McDonough y Sun 1995).

vemente por debajo del equilibrio en estas muestras de aguas (Cuadro 4). Así, no se reconoce que en estas muestras del valle del Peñón domine un proceso de precipitación, el mismo se podría desarrollar dependiendo del cambio en las composiciones y condiciones fisicoquímicas de las aguas.

En las figuras 6h, i y j el empobrecimiento de los elementos Fe, Al y Mn se debe a la precipitación de los mismos como hidróxidos en aguas neutras (Stumm y Morgan 1996). A su vez, se reconoce que las aguas de escorrentía con valores de pH ácido a levemente ácido son las que poseen concentraciones más elevadas de estos elementos, similares a las relaciones con el  $\text{Na}^+$  de la roca de caja. Esto último se debe a que la precipitación de hidróxidos que contienen a estas especies no se desarrolla en condiciones de acidez.

La similitud en relaciones de  $\text{Li}^+$  en la figura 7 entre los grupos de termas señala que la interacción con la roca de caja se ha desarrollado de manera similar en cada sitio. Sin embargo, la diferencia reconocida entre los valores de  $\text{B}^{3+}/\text{Cl}^-$  indicaría un mayor aporte de gas  $\text{H}_3\text{BO}_3$  en las manifestaciones termales del valle de los Baños. Esto podría deberse: por un lado, a la posible existencia de dos reservorios magmáticos o hidrotermales que estén alimentando al sistema en superficie (Tassi et al. 2016); y por otro, a una mayor madurez del reservorio en la zona geotermal más cercana al edificio volcánico (Giggenbach 1991, Wrage et al. 2017). Sin embargo, ambas propuestas deberían ser discutidas en mayor profundidad con más datos complementarios.

### Elementos trazas

El proceso principal que involucra la presencia de elementos trazas en las aguas naturales es la interacción agua-roca. Sin embargo, en ambientes volcánicos, el aporte de elemen-

tos traza a partir de gases volcánicos hacia los cuerpos de agua puede ser considerable, sobre todo en elementos como el As, B, Bi, Cd, Se y Tl, además de la incorporación de los mismos por la caída de cenizas (Aiuppa et al. 2000, Calabrese et al. 2011, Llano et al. 2020).

Los altos valores de As, Cr y V en algunas aguas de escorrentía confirman la abundante presencia de ceniza volcánica intercalada dentro del glaciar que da origen a algunos cauces (Llano et al. 2020, Forte et al. 2022). Por su parte, el empobrecimiento de elementos como Ba, Ti, Zr, Y, Hf y Th (Fig. 8) indica la posible precipitación de estos elementos como minerales secundarios, de similar manera que el  $\text{Fe}^{3+}$  y el  $\text{Al}^{3+}$ , mientras que el Cr y V suelen estar adsorbidos sobre estos minerales en aguas de pH neutro (Galván et al. 2018). De todas maneras, en las muestras ácidas a levemente ácidas dichos procesos no se desarrollan en abundancia, lo que explica encontrar mayores concentraciones de estos elementos en las muestras de pH 4-5,5 de las aguas de escorrentía.

### Elementos de tierras raras

A partir de los contenidos de las REE, se reconoce una correlación inversa entre los valores de pH y concentraciones de dichos elementos, un proceso común en los ambientes volcánicos e hidrotermales (Michard 1989, Lewis et al. 1997, Inguaggiato et al. 2015).

A su vez, el empobrecimiento general de los patrones para la mayoría de las muestras (Fig. 9) indica que las REE se encuentran adsorbidas o formando parte de minerales que precipitaron en el sistema (Lewis et al. 1997, Inguaggiato et al. 2015). Sin embargo, algunas aguas de escorrentía presentan menores empobrecimientos, lo que implica una mayor concentración de REE posiblemente debido a su pH levemente



te ácido a ácido (Inguaggiato et al. 2015). A su vez, algunas de estas muestras tienen patrones similares a la tefra MS-07, sobre todo en las tierras raras pesadas, lo que sustenta la propuesta de una interacción importante entre el glaciar que da origen a los cursos de agua y las capas de cenizas acumuladas dentro del mismo. Por último, se reconoce un pico levemente negativo en Eu lo que podría indicar: por un lado, una mayor lixiviación en vidrios de la roca de caja que poseen bajas concentraciones de Eu y una pobre lixiviación de plagioclasa (Moller et al. 2003, Shakeri et al. 2015), o por otro lado, la herencia de dicho rasgo desde las rocas de caja (Tormey et al. 1995).

## CONCLUSIONES

Se realizó un estudio exhaustivo del sistema hídrico del Complejo Volcánico Planchón-Peteroa, considerando a las aguas tanto termales, presentes en el volcán Peteroa y en sus periferias, como a las aguas de escorrentía y de vertientes frías. El estudio de más de once sitios de muestreo durante 4 años fue llevado a cabo por medio del análisis de parámetros fisicoquímicos *in situ*, y de la composición química de cationes y aniones mayoritarios, elementos traza y tierras raras. Estas aguas pertenecientes al sistema hídrico del Complejo volcánico Planchón-Peteroa fueron divididas en cuatro grupos. Las aguas ácidas y calientes de las lagunas cratéricas tienen una vinculación directa con los gases ácidos provenientes del cuerpo magmático profundo, con composiciones sulfato-cloruradas y relaciones intermedias de cationes. De manera periférica al volcán Peteroa se presentan dos grupos de aguas termales. Por un lado, las termas del valle del Peñón, que se ubican en la base del edificio volcánico, son aguas neutras con temperaturas entorno a los 25 °C y composiciones sulfatadas a intermedias y relaciones catiónicas intermedias. Por otro lado, las termas del valle de los Baños, más alejadas al edificio volcánico, son aguas bicarbonatadas magnésico-sódicas y más calientes que el primer grupo de termas. Por último, las aguas frías de escorrentía son sulfatadas cálcicas, debido a su origen a partir del derretimiento de los glaciares y su interacción con cenizas emitidas desde el centro eruptivo, más la contribución dada por la interacción con yesos y anhidrita de la Formación Auquenco.

La diferencia en temperatura, conductividad y composición entre los dos grupos de las áreas termales periféricas se debe a tres principales procesos involucrados y relacionados entre sí: al flujo de CO<sub>2</sub> emitido en las aguas burbujeantes desde el sistema magmático-hidrotermal profundo, siendo mayor este en el valle de los Baños; al posible distinto grado de contri-

bución de las aguas de escorrentía de bajo caudal hacia las termas estudiadas, tendiendo a ser mayor en el valle del Peñón; y a la posible precipitación de sulfatos y carbonatos de calcio en las termas del valle de los Baños. Las relaciones de Cl<sup>-</sup>/B<sup>3+</sup> de las aguas sugieren la posible presencia de distintos reservorios que estén alimentando a los gases que se emiten en los valles, y, a su vez, que la madurez del reservorio hidrotermal que alimenta las termas del valle del Peñón es mayor que el de las termas del valle de los Baños. Sin embargo, más análisis que profundicen ambas propuestas son necesarios.

Los contenidos y distribución de los elementos trazas en las termas de ambos valles indican que las composiciones están controladas por procesos de interacción agua-roca con características muy similares. Por su parte, algunas de las aguas de escorrentía presentan altas relaciones de elementos como Cr y V, evidenciando una interacción directa con las cenizas volcánicas en la zona de las cabeceras del sistema. Los resultados de REE indican una correlación inversa entre valores de pH y concentración de estos elementos, lo que evidencia un ataque ácido y disolución parcial de la roca que enriquece la composición de las aguas. Los valores de pH de las aguas termales hacen que estos procesos sean relativamente de menor intensidad, respecto a los que se desarrollan en las lagunas cratéricas del volcán.

De esta manera, los resultados obtenidos en el presente trabajo contribuyen a establecer una línea de base ambiental para futuros trabajos de impacto de la actividad volcánica en la región. De la misma forma, los procesos identificados que controlan la composición de las aguas incrementan el conocimiento sobre el comportamiento del sistema contribuyendo a la interpretación en futuros trabajos de monitoreo de un volcán activo, potencialmente peligroso para la provincia de Mendoza y parte del territorio argentino.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por los proyectos UBACyT 20020150200230BA, UBACyT 20020170200221BA, PICT-2015-3110, PICT-2016-2624 y Proyecto de Unidad Ejecutora (IDEAN) 22920160100051. Este trabajo es la contribución R-405 del Instituto de Estudios Andinos "Don Pablo Groeber" (IDEAN, UBA-CONICET).

## REFERENCIAS

- Aguilera, F., Benavente, O., Gutiérrez, F., Romero, J., Saltori, O., González, R., Agosto, M., Caselli, A. y Pizarro, M. 2016. Eruptive activity of Planchón-Peteroa volcano for period 2010-2011, Southern Andean Volcanic Zone, Chile. *Andean geology* 43(1): 20-46

- Agusto, M., Caselli, A., Tassi, F., Dos Santos Afonso, M. y Vaselli, O. 2012. Seguimiento geoquímico de las aguas ácidas del sistema volcán Copahue-Río Agrio: Posible aplicación para la identificación de precursores eruptivos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 69: 481-495.
- Agusto, M. y Varekamp, J. 2016. The Copahue Volcanic-Hydrothermal System and Applications for Volcanic Surveillance. En: Tassi, F., Vaselli, O. y Caselli, A. (eds.), *Copahue Volcano. Active Volcanoes of the world Book Series*, Springer, 1999-238, Berlin-Heidelberg.
- Agusto, M. y Velez, L. 2017. Avances en el conocimiento del sistema volcánico-hidrotermal del Copahue: a 100 años del trabajo pionero de don Pablo Groeber. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 74(1): 109-124.
- Aiuppa, A., Allard, P., D'Alessandro, W., Michel, A., Parello, F., Treuil, M. y Valenza, M. 2000. Mobility and fluxes of major, minor and trace metals during basalt weathering at Mt. Etna volcano (Sicily). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64: 1827-1841.
- Badi, G., Carbajal, F., Elissondo, M., García, S., Kaufman, J.F., Olivera Craig, V.H., Sruoga, P. y Tejedo, A. 2018. Complejo Volcánico Planchón-Peteroa, Erupción Diciembre de 2018. Disponible en: <https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/2635>
- Benavente, O. 2010. Actividad hidrotermal asociada a los complejos volcánicos Planchón-Peteroa y Descabezado Grande-Quizapu- Cerro Azul, 36°S y 37°S, Zona volcánica sur, Chile. Tesis de licenciatura, Universidad de Chile (inérita), 206 p., Santiago.
- Benavente, O. 2016. Origen y naturaleza de los fluidos en los sistemas volcánicos e hidrotermales activos de los Andes de Chile central (32,5-36°S). Tesis de doctorado, Universidad de Chile (inérita), 274 p., Santiago.
- Benavente, O., Tassi, F., Reich, M., Aguilera, F., Capecciacchi, F., Gutiérrez, F., Vaselli, O. y Rizzo, A. 2016. Chemical and isotopic features of cold and thermal fluids discharged in the Southern Volcanic Zone between 32.5S and 36S: Insights into the physical and chemical processes controlling fluid geochemistry in geothermal systems of Central Chile. *Chemical geology* 420: 97-113.
- Calabrese, S., Aiuppa, A., Allard, P., Bagnato, E., Bellomo, S., Brusca, L., D'Alessandro, W. y Parello, F. 2011. Atmospheric sources and sinks of volcanogenic elements in a basaltic volcano (Etna, Italy). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75(23): 7401-7425.
- Casas, J.A., Badi, G., Manassero, M.C., Gomez, P., Draganov, D. y Ruzante, J. 2014. Characterization of seismo-volcanic activity in Peteroa Volcano, central Andes Argentina-Chile. *Earth Science Research Journal* 18: 335-336.
- Casas, J.A., Mikesell, T.D., Draganov, D., Lepore, S., Badi, G.A., Franco, L. y Gomez, M. 2018. Shallow S-Wave Velocity Structure from Ambient Seismic Noise at Planchón-Peteroa Volcanic Complex, Argentina-Chile. *Bulletin of the Seismological Society of America* 108(4): 2183-2198.
- Casas, J.A., Draganov, D., Badi, G.A., Manassero, M.C., Olivera Craig, V O., Marín, L.F., Gómez, M. y Ruigrok, E. 2019. Seismic interferometry applied to local fracture seismicity recorded at Planchón-Peteroa Volcanic Complex, Argentina-Chile. *Journal of South American Earth Sciences* 92: 134-144.
- Casas, J.A., Badi, G.A., Franco, L. y Draganov, D. 2020. Seismic interferometry applied to regional and teleseismic events recorded at Planchón-Peteroa Volcanic Complex, Argentina-Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 393: 106805.
- Chiodi, A.L., Báez, W.A., Filipovich, R.E., Ahumada, M.F. y Viramonte, J.G. 2016. Modelo conceptual preliminar del sistema geotermal El Sauce (Salta) a partir de estudios de geoquímica de fluidos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 73(1): 94-103.
- Daga, R., Castro, A., de La Rosa, J., Riberiro Guevara, S., Sánchez, M.L. y Arribére, M. 2012. Heterogeneidades texturales y composicionales en productos piroclásticos de la erupción de 1960 del sistema del Cordón Caulle (40°30'S, 72°10'O). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 69(4): 496-507.
- Daga, R., Caselli, A., Ribeiro Guevara, S. y Agosto, M. 2017. Tefras emitidas durante la fase inicial hidromagmática (julio de 2012) del ciclo eruptivo 2012-actual (2016) del volcán Copahue (Andes del sur). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 74(2): 191-206.
- Durán, V.A., Winocur, D.A., Stern, C., Garvey, R., Barberena, R., Peña Monné, J.L. y Benitez, A.A. 2016. Impacto del volcanismo y glaciarrismo holocénicos en el poblamiento humano de la cordillera sur de Mendoza (Argentina): una perspectiva geoarqueológica. *Intersecciones en antropología*, volumen especial 4: 33-46.
- D'Alessandro, W., Federico, C., Longo, M. y Parello, F. 2004. Oxygen isotope composition of natural waters in Mt Etna area. *Journal of hydrology* 296: 282-299.
- Elissondo, M. y Villegas, D. 2011. Evaluación de Peligrosidad Volcánica en Argentina. Sesión 10a, Volcanes activos evolución y monitoreo. XVIII Congreso Geológico Argentino, Actas CD, Neuquén
- Elissondo, M., Farías, C., Collini, E., 2016. Volcanic Risk Assessment in Argentina. *Cities on Volcanoes* 9, Puerto Varas, Chile.
- Fennell, L.M., Naipauer, M. y Folguera, A. 2017. El movimiento interseñoniano de Pablo Groeber en el norte de Neuquén y sur de Mendoza: bases de la primera orogenia andina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 74(1): 59-73.
- Forte, P., Dominguez, L., Bonadonna, C., Gregg, C.E., Bran, D., Bird, D. y Castro, J.M. 2018. Ash resuspension related to the 2011–2012 Cordón Caulle eruption, Chile, in a rural community of Patagonia, Argentina. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 350: 18-32.
- Forte, P., Ramires, A., De Abrantes, L., Llano, J., Dominguez, L., Carbajal, F., García, S., Sruoga, P. y Bonadonna C. 2022. La erupción no será transmitida: características, impactos y asistencia durante el ciclo eruptivo 2018-2019 del volcán Peteroa, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 79(1): 47-71.
- Galván, F., Murray, J., Chiodi, A., Pereyra, R. y Kirschbaum, A. 2018. Drenaje ácido natural en la caldera Negra Muerta y su influencia en las

- nacientes del río Calchaquí, provincia de Salta, NO Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 75(1): 80-94.
- Gammons, C.H., Wood, S.A., Pedrozo, F., Varekamp, J., Nelson, B.J., Shope, C. y Baffico, G. 2005. Hydrogeochemistry and rare earth element behavior in a volcanically acidified watershed in Patagonia, Argentina. *Chemical Geology* 222: 249-267.
- Gaviria Reyes, M.A., Agosto, M., Trinelli, M.A., Caselli, A., dos Santos Afonso, M. y Calabrese, S. 2016. Estudio hidrogeoquímico de las áreas termales del complejo volcánico Copahue-Caviahue. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 73(2): 256-269.
- Giggenbach, W.F. 1987. Redox processes governing the chemistry of fumarolic gas discharges from White Island, New Zealand. *Applied Geochemistry* 2: 143-161.
- Giggenbach, W.F. 1991. *Chemical techniques in geothermal exploration. Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development*. UNITAR, 253-273, New York.
- Haller, M., Ostera, H., Pesce, A., Gardini, M. y Folguera, A. 1994. Vulcanoesstratigrafía reciente y eruptividad del Volcán Peteroa. 7mo Congreso Geológico Chileno, Actas 2: 319-323. Concepción.
- Haller, M.J. y Coscarella, M. 2011. Análisis probabilístico del riesgo de erupción del volcán Peteroa mediante la aplicación de mezclas de distribuciones exponenciales. 18° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 564-565, Neuquén.
- Haller, M. y Risso, C. 2011. La erupción del volcán Peteroa (35°15'S, 70°18'O) del 4 de Septiembre de 2010. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 68: 295-305.
- Hildreth, W., Grunder, A. y Drake, R. 1984. The Loma Seca Tuff and the Calabozos caldera: A major ash-flow and caldera complex in the southern Andes of central Chile. *Geological Society of American Bulletin* 95: 45-54.
- Inguaggiato, C., Censi, P., Zuddas, P., Londono, J.M., Chacon, Z., Alzate, D., Brusca, L. y D'Alessandro, W. 2015. Geochemistry of REE, Zr and Hf in a wide range of pH and water composition: The Nevado del Ruiz volcano-hydrothermal system (Colombia). *Chemical geology* 417: 125-133.
- Lamberti, M.C., Agosto, M., Llano, J., Nogués, V., Venturi, S., Vélez, M.L., Albite, J.M., Yiries, J., Chiodini, G., Cardellini, C. y Tassi, F. 2020. Soil CO<sub>2</sub> flux baseline in Planchón–Peteroa Volcanic Complex, Southern Andes, Argentina-Chile. *Journal of South American Earth Sciences* 105: 102930.
- Lemus Hernández, M.G. 2010. Análisis termal del complejo volcánico Descabezado Grande y Planchon Peteroa mediante sensores remotos. Tesis de licenciatura, Universidad de Chile (inédita), 195 p., Santiago.
- Lewis, A.J., Palmer, M.R., Sturchio, N.C. y Kemp, A.J. 1997. The rare earth element geochemistry of acid-sulphate and acid-sulphate-chloride geothermal systems from Yellowstone National Park, Wyoming, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61(4): 695-706.
- Llano, J., Agosto, M., Trinelli, M.A., Tufo, A., García, S., Velásquez, G., Bucarey-Parra, C., Delgado Huertas, A. y Litvak, V. 2020. Procesos hidrogeoquímicos vinculados a un ambiente volcánico activo: el caso del sistema río Agrío-Volcán Copahue. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 77(4): 490-504
- Mas, G.R., Mas, L.C. y Bengochea, L. 1996. Alteración ácido-sulfática en el Campo Geotérmico Copahue, Provincia del Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 51: 78-86.
- McDonough, W.F. y Sun, S. 1995. The composition of the earth. *Chemical Geology* 120: 223-253.
- Mescua, J.F., Giambiagi, L. y Ramos, V.A. 2017. Los movimientos andinos de Groeber y la evolución tectónica de los andes centrales del sur. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 74(1): 49-58.
- Michard, A. 1989. Rare earth element systematics in hydrothermal fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 53(3): 745-750.
- Möller, P. 2002. Rare earth elements and yttrium in geothermal fluids. *Water Science and Technology Library* 40: 97-125.
- Naranjo, J., Haller, M., Ostera, H., Pesce, A. y Sruoga, P. 1999. Geología y Peligros del Complejo Volcánico Planchon–Peteroa, Andes del Sur (35°15'S), Región del Maule, Chile—Provincia de Mendoza, Argentina. 52. Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile.
- Naranjo, J. y Haller, M. 2002. Erupciones principalmente explosivas del volcán Planchón, Andes del sur (35°15'S). *Revista Geológica de Chile* 29: 93-113
- Nogués, V. 2019. Geología del flanco oriental del volcán Peteroa, provincia de Mendoza, y geoquímica de las emisiones fluidas del sistema volcánico hidrotermal. Tesis Final de Licenciatura, Universidad de Buenos Aires (inédito), 132 p, Buenos Aires.
- Nullo, F.E., Stephens, G., Combina, A., Dimieri, L., Baldauf, P. y Bouza, P. 2005. Hoja Geológica 3569-III /3572-IV Malargüe, Provincia de Mendoza. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 346, 85 p., Buenos Aires.
- OAVV-SEGEMAR, Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica – Servicio Geológico Minero Argentino. 2019. Reporte de Actividad Volcánica del CV Planchón-Peteroa, 1-15 agosto 2019. Disponible en: [https://oavv.segemar.gov.ar/show\\_reporte.php?id=3&m=8&a=2019](https://oavv.segemar.gov.ar/show_reporte.php?id=3&m=8&a=2019)
- OVDAS-SERNAGEOMIN, Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur - Servicio Nacional de Geología y Minería. 2018a. Reporte de Actividad Volcánica (RAV) N°6 Región del Maule, Año 2018 Junio, Volumen 6. Disponible en: [http://sitiohistorico.sernageomin.cl/reportesVolcanes/20180706044841783RAV\\_Maule\\_Junio\\_2018\\_N%C2%B06.pdf](http://sitiohistorico.sernageomin.cl/reportesVolcanes/20180706044841783RAV_Maule_Junio_2018_N%C2%B06.pdf)
- OVDAS-SERNAGEOMIN, Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur - Servicio Nacional de Geología y Minería. 2019. Reporte de Actividad Volcánica (RAV) N°15 Región del Maule, Año 2019 Agosto, Volumen 15. Disponible en: [http://sitiohistorico.sernageomin.cl/reportesVolcanes/20190823105217560RAV\\_Maule\\_Agosto\\_2019\\_N%C2%B015.pdf](http://sitiohistorico.sernageomin.cl/reportesVolcanes/20190823105217560RAV_Maule_Agosto_2019_N%C2%B015.pdf)
- Panarello, H. 2002. Características isotópicas y termodinámicas de reservorio del campo geotérmico Copahue-Caviahue, provincia de Neu-

- quén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 57: 182-194.
- Parkhurst, D. y Appelo, C. 2013. Description of input and examples for PHREEQC version 3-A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport and inverse geochemical calculations. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6, 497 p., Denver.
- Petrinovic, I., D'Elía, L., Páez, G., Balbis, C., Guzmán, S., Villarosa, G. y Carniel, R. 2014a. Depósito de corriente piroclástica reciente (1963-64 AD? - 1976 AD?) del volcán Copahue (I): evidencias geológicas de campo y edad radiocarbónica. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 71(1): 139-142.
- Petrinovic, I., Villarosa, G., D'Elía, L., Guzman, S., Páez, G., Outes, V., Manzoni, C., Delménico, A., Balbis, C., Carniel, R. y Hernando, I. 2014b. La erupción del 22 de diciembre de 2012 del volcán Copahue, Neuquén, Argentina: Caracterización del ciclo eruptivo y sus productos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 71(2): 161-173.
- Ramos, V.A. y Folguera, A. 2005. Tectonic evolution of the Andes of Neuquén: constraints derived from the magmatic arc and foreland deformation. En: Veiga, G.D., Spalletti, L.A., Howell, J.A. y Schwarz, E. (eds.) *The Neuquén Basin, Argentina: A case Study in Sequence Stratigraphy and Basin Dynamics*. Geological Society, London, Special Publications 252: 15-35.
- Romero, J.E., Aguilera, F., Delgado, F., Guzmán, D., Van Eaton, A.R., Luengo, N., Caro J., Bustillos, J., Guevara, A., Holbik, S., Tormey, D. y Zegarra, I. 2020. Combining ash analyses with remote sensing to identify juvenile magma involvement and fragmentation mechanisms during the 2018/19 small eruption of Peteroa volcano (Southern Andes). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 402: 106984.
- Rouwet, D., Bellomo, S., Brusca, L., Inguaggiato, S., Jutzeler, M., Mora, R., Mazon, A., Bernard, R., Cassidy, M. y Taran, Y. 2009. Major and trace element geochemistry of El Chichón volcano-hydrothermal system (Chiapas, México) in 2006-2007: implications for future geochemical monitoring. *Geofísica internacional* 48(1): 55-72.
- Rouwet, D., Hidalgo, S., Joseph, E.P. y González-llama, G. 2017. Fluid geochemistry and volcanic unrest: dissolving the haze in time and space. En: Gottsmann, J., Neuberg, J., Sheu, B. (eds), *Advances in volcanology*. Springer, 221-239, Berlin-Heidelberg
- Sanci, R., Panarello, H.O. y Osters, H.A. 2010. Flujo de dióxido de carbono en el flanco oriental del volcán Peteroa, Andes del Sur. *Revista mexicana de ciencias geológicas* 27(2): 225-237.
- Shakeri, A., Ghoreyshinia, S., Mehrabi, B. y Delavari, M. 2015. Rare earth elements geochemistry in springs from Taftan geothermal area SE Iran. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 304: 49-61.
- Sruoga, P., Schonwandt, D., Castro Godoy, S., Urai, M. y Kaku, M. 2004. Recent unrest at Peteroa volcano (35°15' S). Application of ASTER Imagery. IAVCEI Meeting, Pucón, Chile.
- Sruoga, P. 2008. El Volcán Planchón-Peteroa. Un modelo para armar. Disponible en: <https://repositorio.segemar.gob.ar/handle/308849217/1328>
- Stern, C.R. 2004. Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista Geológica de Chile* 31: 161-206.
- Stern, C.R., Moreno, H., López-Escobar, L., Clavero, J.E., Lara, L.E., Naranjo, J.A., Parada, M.A. y Skewes M.A. 2007. En: Moreno, T., Gibbons, W. (eds), *Chilean Volcanoes, The Geology of Chile*. Geological Society of Chile, 156-157, London.
- Stumm, W. y Morgan, J. 1996. *Aquatic Chemistry. Chemical equilibria and rates in natural waters*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Symonds, R.B., Rose, W.I., Bluth, W.I., Gerlach, T.M. 1994. Volcanic-gas studies: methods, results and applications. En: Carrol, M.R., Holloway, J.R. (eds), *Volatiles in magmas*. Rev. Mineral, 1-66, Washington, D.C.
- Taran, Y., Rouwet, D., Inguaggiato, S. y Aiuppa, A. 2008. Major and trace element geochemistry of neutral and acidic thermal springs at El Chichón volcano, Mexico: implications for monitoring of the volcanic activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 178(2): 224-236.
- Tassi, F., Aguilera, F., Benavente, O., Paonita, A., Chiodini, G., Caliro, S., Agosto, M., Gutierrez, F., Capaccioni, B., Vaselli, O., Caselli, A. y Sattori, O. 2016. Geochemistry of fluid discharges from Peteroa volcano (Argentina-Chile) in 2010–2015: Insights into compositional changes related to the fluid source region (s). *Chemical geology* 432: 41-53.
- Tormey, D., Frey, F. y Lopez-Escobar, L. 1989. Geologic history of the active Azufre-Planchon-Peteroa volcanic center (35°15'S), with implications for the origin of compositional gaps. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 44: 420-430.
- Tormey, D.R., Frey, F.A. y López, L. 1995. Geochemistry of the Active Azufre-Planchón-Peteroa Volcanic Complex, Chile (35°15' S): Evidence for Multiple Sources and Processes in a Cordilleran Arc Magmatic System. *Journal of Petrology* 36(2): 265-298.
- Trombotto Liaudat, D., Penas, P. y Aloy, G. 2014. Impact of volcanic processes on the cryospheric system of the Peteroa Volcano, Andes of southern Mendoza, Argentina. *Geomorphology* 208: 74-87.
- Varekamp, J.C. 2015. The chemical composition and evolution of volcanic lakes. En: Rouwet, D., Christenson, B., Tassi, F., Vandemeulebrouck, J. (Eds.), *Volcanic Lakes*. *Advances in Volcanology*, Springer-Verlag, 93-123, Berlin-Heidelberg.
- Vigide, N., Yagupsky, D., Barcelona, H., Agosto, M. y Caselli, A. 2020. Structural analysis of the Planchón-Peteroa Volcanic Complex: Insights for the geothermal system. *Journal of South American Earth Sciences* 104: 102856
- Watt, S.F., Pyle, D.M., Mather, T.A., Martin, R.S. y Matthews, N.E. 2009. Fallout and distribution of volcanic ash over Argentina following the May 2008 explosive eruption of Chaitén, Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114 (B4).
- Wrage, J., Tardani, D., Reich, M., Daniele, L., Arancibia, G., Cembrano, J., Sánchez-Alfaro, P., Morata, D. y Pérez-Moreno, R. 2017. Geochemistry of thermal waters in the Southern Volcanic Zone, Chile – Implications for structural controls on geothermal fluid composition. *Chemical Geology* 466: 545-561.