

Estudio geoquímico de fuentes termales de la región de Atacama, norte de Chile

Yazmín Godoy^{*1}, Manuel Inostroza^{2,3}, María Donoso-Peña⁴, Franco Tassi^{5,6}, Felipe Aguilera^{1,2}, Francesco Capecchiacci^{5,6,7}, Andrea Luca Rizzo^{8,9}

¹Departamento de Geología, Universidad de Atacama, Chile. (E-mail: yazmin.godoy.cruz@gmail.com)

²Millennium Institute on Volcanic Risk Research - Ckelar Volcanoes, Chile. (E-mail: manuel.inostroza@ckelar.org, felipe.aguilera@unab.cl)

³Universidad Andres Bello, Facultad de Ingeniería, Chile.

⁴Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias de la Tierra, Universidad Austral de Chile, Chile. (E-mail: fernanda.pena.donoso@gmail.com)

⁵Department of Earth Sciences, University of Florence, Italy. (E-mail: franco.tassi@unifi.it, francesco.capecchiacci@unifi.it)

⁶Institute of Geosciences and Earth Resources, National Research Council (CNR-IGG), Italy.

⁷Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Sezione di Napoli, Osservatorio Vesuviano, Italy.

⁸Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e della Terra, Università degli Studi di Milano-Bicocca, Italy. (E-mail: andrealuca.rizzo@unimib.it)

⁹Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) Sezione di Milano, Italy.

Palabras claves: Fluidos hidrotermales, Juncalito, Laguna Verde, región de Atacama

Resumen:

Este estudio analiza la composición química e isotópica de fluidos termales en cinco zonas de la región de Atacama (Chile): Laguna Verde (LV), Juncalito (JUN), Termas de Río Negro (TRN), Panteón de Aliste (PA) y Salar de Piedra Parada (SPP), incluyendo gases burbujeantes en Juncalito (JUN). Se tiene como objetivos: (i) precisar el origen y los procesos fisicoquímicos que controlan la composición química e isotópica de los fluidos y (ii) estimar las temperaturas de equilibrio de los reservorios hidrotermales. Los resultados indican que las aguas provienen de origen meteórico y su química está dominada por interacción agua-roca con materiales volcánicos y volcano-sedimentarios. Las razones $^3\text{He}/^4\text{He}$ y la isotopía de carbono en CO_2 indican una significativa influencia cortical y una débil contribución magmática en los gases descargados

en Juncalito. Mientras que termas de Río Negro y Laguna Verde son las que alcanzan mayores temperaturas de reservorio (~ 90 °C). Se recomienda profundizar con estudios geofísicos y estructurales en Laguna Verde, dada su cercanía con el volcán Ojos del Salado.

1. Introducción

Se ha reconocido un importante potencial geotérmico relacionado con el vulcanismo del Cenozoico en diversas áreas de la Zona Volcánica Central (ZVC), entre ellas El Tatio y Pampa Apacheta, en el norte de Chile [1]. Para Laguna Verde, en la región de Atacama, se han reportado hasta veinte manantiales termales con temperaturas de hasta 47 °C, las cuales han sido relacionadas con la actividad holocénica y desgaseificación permanente del volcán Ojos del Salado, ubicado 25 km al SW del área [2]. En la zona de LV, geotermómetros de sílice han reportado temperaturas de reservorio de hasta 140 °C [2]. Adicionalmente, se han identificado dos zonas termales, llamadas Termas del Río Negro y Juncalito, donde los mismos geotermómetros han determinado temperaturas de reservorio hasta 160 °C [3]. Consecuentemente, la región de Atacama representa una zona con potencial para el estudio de reservorios geotérmicos a través de técnicas geoquímicas y geofísicas.

2. Metodología

La composición química e isotópica de las aguas termales fue determinada mediante técnicas de titulación, cromatografía iónica, ICP-OES y espectroscopía de anillo de cavidad descendente ($\delta^{18}\text{O}$ - δD). Estas técnicas permitieron determinar la alcalinidad, la concentración de iones mayores, y la concentración de sílice. Por otro lado, la composición química e isotópica de los gases burbujeantes fue determinada vía cromatografía gaseosa, espectroscopía de anillo de cavidad descendente ($\delta^{13}\text{C}$ - CH_4 y $\delta^{13}\text{C}$ - CO_2), y espectrometría de masa para gases nobles (He, Ne, y Ar).

3. Resultados y discusión

Las aguas termales presentaron rangos entre 304-5020 mg/L de Cl^- , 343-2407 mg/L de SO_4^{2-} y 350-3616 mg/L de Na^+ . La mayoría de las aguas corresponde a una composición $\text{Cl}^-(\text{SO}_4^{2-})\text{-Na}^+$, típico de manantiales ubicados en entornos volcánicos, lo que sugiere una contribución de un sistema hidrotermal profundo [4]; puede descartarse una fuente magmática, dado que los valores de $\delta\text{D-H}_2\text{O}$ ($-94,5\text{‰}$ a $-75,0\text{‰}$) y $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$ ($-12,9\text{‰}$ a $-8,6\text{‰}$) estarían indicando una fuente meteórica predominante [5]. Las aguas de JUN presentaron SO_4^{2-} como anión dominante, posiblemente debido a (i) interacción con rocas hidrotermalmente alteradas, avalada por su cercanía con una intrusión porfídica alterada

hidrotermalmente y un domo de lava dacítico inmediatamente al oeste de las pozas burbujeantes [6] o (ii) interacción de gases hidrotermales que suelen ser ricos en H_2S y CO_2 — este último se evidencia por un aumento en la acidez de las aguas y mayores concentraciones de HCO_3^- . Mientras que PA muestra una concentración relativamente más alta en HCO_3^- y relativamente pobre en Cl^- , concordante con la posición periférica de este sitio respecto al sistema hidrotermal principal.

Los gases burbujeantes de JUN presentan razones de $^3\text{He}/^4\text{He}$ y $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ compatible con un componente atmosférico dominante, mezclado con una pequeña fracción de helio de origen mantélico y cortical [7,8]. La razón de $^3\text{He}/^4\text{He}$ ($\sim 1.5 \text{ Ra}$) es mucho menor que la esperada en volcanes activos de la ZVC (ZVC; $>7 \text{ Ra}$; [9]), pero relativamente cercana a las firmas encontradas en la caldera Cerro Blanco (1.1 y 2.1 Ra, a 70 km al este de LV; [10]) y en fluidos de baja temperatura de la ZVC [9]. Por su parte, los valores de $\delta^{13}\text{C}\text{--CO}_2$ (-12.9 a -10.7‰ vs. V-PDB) son levemente más ligeros que los asociados con una fuente mantélica ($-6.5 \pm 2.5\text{‰}$ vs. V-PDB; [11]), lo que sugiere una posible mezcla entre CO_2 magmático y CO_2 biogénico, este último incorporado desde las rocas con materia orgánica que conforman el basamento de JUN.

Geotermometría

El geotermómetro de calcedonia (por ejemplo, [12]) arrojó temperaturas estimadas $<55^\circ\text{C}$ para JUN y SPP, entre 71 y 72°C para PA, entre 85 y 91°C en TRN, y 88°C en los sitios más calientes de los manantiales de LV. Sin embargo, estas temperaturas deben considerarse como valores mínimos, ya que pueden estar afectadas por dilución y precipitación de sílice dentro de los conductos hidrotermales. Además, estos resultados en TRN son inconsistentes con los valores de $140\text{--}160^\circ\text{C}$ reportados Mayorga [3].

5. Conclusiones.

Las vertientes termales de la región de Atacama están alimentadas principalmente por aguas meteóricas que son infiltradas, calentadas, y luego ascienden a través del medio rocoso hasta emerger en las vertientes de JUN, TRN, LV, PA y SPP. Se evidencian procesos de moderada interacción agua-roca, interacción con rocas afectadas por alteración hidrotermal, y absorción de gases profundos que contienen CO_2 y H_2S . Estos procesos ocurren a temperaturas de hasta 90°C , sin embargo, estas deben ser consideradas como temperaturas mínimas de interacción agua-roca.

La composición isotópica de los gases burbujeantes de JUN demuestran una limitada contribución mantélica. Al mismo tiempo, los valores de $\delta^{13}\text{C}\text{--CO}_2$

parecen estar controlados por litologías locales constituidas por secuencias volcano-sedimentarias con materia orgánica.

Se recomienda aplicar técnicas geoquímicas y geofísicas adicionales para delimitar mejor la fuente de calor en el área de LV, la cual probablemente esté relacionada con el volcán activo Ojos del Salado.

Referencias:

- [1] Tassi, F., Aguilera, F., Darrah, T., Vaselli, O., Capaccioni, B., Poreda, R.J., Huertas, A.D. (2010). Fluid geochemistry of hydrothermal systems in the Arica-Parinacota, Tarapacá and Antofagasta regions (northern Chile). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 192(1-2), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.02.006>
- [2] Alam, M. A., Muñoz, A. (2024). A critical evaluation of the role of a geothermal system in lithium enrichment of brines in the salt flats: A case study from Laguna Verde in the Atacama Region of Chile. *Geothermics*, 119, 102970. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.102970>
- [3] Mayorga, C. 2011. Geoquímica de Fluidos del área de Juncalito. Proyecto Juncalito. Energía Andina S.A. (Unpublished), 26p. Chile.
- [4] Nicholson, K. (1993). *Geothermal fluids: chemistry and exploration techniques*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-77844-5>
- [5] Inostroza, M., Godoy, Y., María Donoso-Peña, Tassi, F., Aguilera, F., Capecciacci, F., Rizzo, A. L. (2025). Geochemical survey of thermal springs from the Atacama region, northern Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 467, 108411. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2025.108411>
- [6] Clavero, J., Mpodozis, C., Gardeweg, M., Valenzuela, M. (2012). Geología de las áreas Laguna Wheelwright y Paso San Francisco, Región de Atacama.
- [7] Oxburgh, E.R., O'nions, R.K., Hill, R.I. (1986). Helium isotopes in sedimentary basins. *Nature*, 324(6098), 632-635. <https://doi.org/10.1038/324632a0>
- [8] Graham, D.W. (2002). Noble gas isotope geochemistry of mid-ocean ridge and ocean island basalts: Characterization of mantle source reservoirs. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 47(1), 247-317. <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.47.8>
- [9] Robidoux, P., Rizzo, A. L., Aguilera, F., Aiuppa, A., Artale, M., Liuzzo, M., Nazzari, M., Zummo, F. (2020). Petrological and noble gas features of Lascar and Lastarria volcanoes (Chile): Inferences on plumbing systems and mantle characteristics. *Lithos*, 370, 105615. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105615>
- [10] Chiodi, A., Tassi, F., Báez, W., Filipovich, R., Bustos, E., Galli, M. G., Suzaño, N., Ahumada, M., Viramonte, J., Giordano, G., Pecoraino, G., Vaselli, O. (2019). Preliminary conceptual model of the Cerro Blanco caldera-hosted geothermal system (Southern Puna, Argentina): Inferences from geochemical investigations. *Journal of South American Earth Sciences*, 94, 102213. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102213>
- [11] Sano, Y., Marty, B. (1995). Origin of carbon in fumarolic gas from island arcs. *Chemical Geology*, 119(1-4), 265-274. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00097-R](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00097-R)
- [12] Arnórsson, S., Gunnlaugsson, E., Svavarsson, H. (1983). The chemistry of geothermal waters in Iceland. III. Chemical geothermometry in geothermal investigations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47(3), 567-577. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(83\)90278-8](https://doi.org/10.1016/0016-7037(83)90278-8)