

Manifestaciones geotermales en Salar Laguna Verde y Salar de Maricunga: caracterización fisicoquímica y perspectivas de uso.

Camila Alfaro Ramírez¹, Camila Alfaro Castillo*¹, Camila Guzmán Donoso¹, Diego Aravena Noemí^{1,2}

¹Departamento de Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad de Atacama, Chile.

(camila.alfaro.r.15@alumnos.uda.cl, camila.alfaro.19@alumnos.uda.cl,

camila.guzman.15@alumnos.uda.cl)

²Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA), Universidad de Chile, Chile.

(diego.aravena@uda.cl)

Resumen:

El presente trabajo se centra en las cuencas del Salar de Maricunga (SdM) y Salar de Laguna Verde (LV), ubicadas en la Región de Atacama, comuna de Copiapó, dentro de la cuenca endorreica entre la Frontera y la Vertiente del Pacífico. Ambas se localizan en la Cordillera de los Andes, a más de 3.800 m s.n.m., en un entorno de clima de tundra de Alta Montaña. En el borde suroeste de LV se documentaron manantiales de flujo difuso que emergen por debajo de afloramientos de ignimbrita, mezclándose con el agua de la laguna a lo largo de una franja de ~800 m. En ambos lugares, se registraron temperaturas superiores a 14°C con respecto a la temperatura promedio ambiental, alcanzando temperaturas que van desde los 18°C para SdM y sobre 25 °C para LV generando pequeñas piscinas termales conocidas en el ámbito turístico, surgencias. La distribución espacial de estas surgencias sugiere un control estructural, con una fuente de calor profunda, posiblemente asociado al volcanismo activo del Ojos del Salado.

Los resultados permiten identificar potenciales usos geotérmicos directos, como calefacción, balneología o secado de productos agrícolas, así como oportunidades para el turismo científico en un entorno protegido. Sin embargo, la presencia de concesiones de litio sobre estas cuencas representa una amenaza a la sostenibilidad del sistema hidrotermal y salino.

Palabras claves: Cordillera de Andes, Geotermia, Laguna Verde, Salar de Maricunga, Surgencias termales, Volcán Ojos del Salado.

1. Introducción

Las condiciones geológicas de Chile, situado en una de las zonas de subducción más activas del planeta y con la mayor concentración de volcanes activos, son prueba del enorme potencial geotérmico existente en los Andes chilenos (Lahsen *et al.*, 1986; Aravena *et al.*, 2016). En particular, el norte del país se caracteriza por una sucesión de cordilleras con orientación norte-sur que delimitan cuencas ocupadas por numerosos lagos salinos y costras de sal, conocidos como salares (Chong, 1984; Risacher *et al.*, 2003). Estas últimas corresponden a depósitos salinos continentales ubicados en cuencas endorreicas, formados debido a un balance hídrico negativo en el que la evaporación supera a la precipitación (Figura 1) (Eugster y Hardie, 1978). Este trabajo busca evaluar la propiedades fisicoquímicas y potencial de usos directos de estas áreas geotermales.

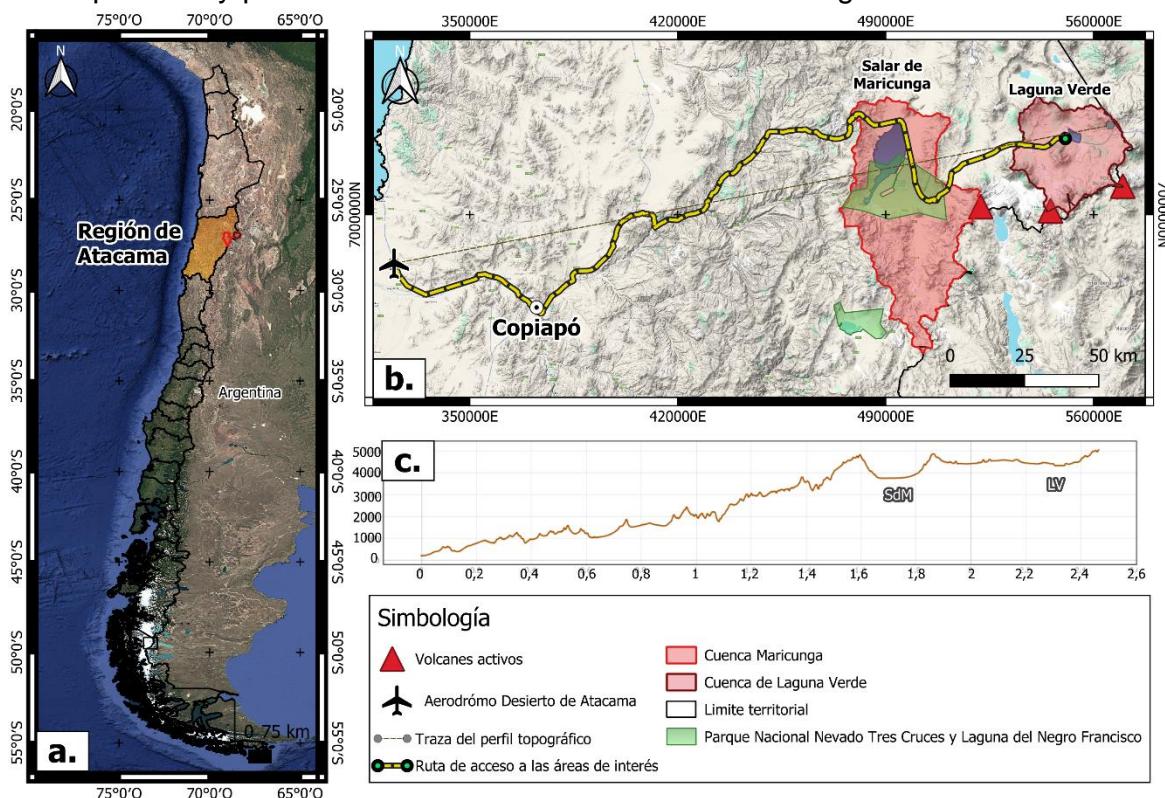


Figura 1. a. Ubicación de área de estudio respecto a Chile. b. Ubicación y accesos desde el Aeropuerto Desierto de Atacama (CPO) y la ciudad de Copiapo hasta las áreas de estudio. c. Perfil de elevación desde CPO hasta las cuencas Salar de Maricunga (SdM) y Laguna Verde (LV) en la Puna de la Región de Atacama. (Fuente: elaboración propia mediante QGIS 10.3).

2. Metodología

Durante el 12 de abril y 4 de agosto de 2023; 11 de diciembre de 2024 y el 28 de enero de 2025 se llevaron a cabo cuatro campañas de terreno en la zona de estudio. El objetivo de estas campañas fue la caracterización *in situ* de surgencias termales, definidas como aquellas con temperaturas superiores a los 14 °C. Se midieron un total de 36 muestras de agua, distribuidas en puntos georreferenciados del Salar de Maricunga y el borde suroeste de Laguna Verde. En cada punto de muestreo se efectuaron mediciones de parámetros fisicoquímicos mediante una sonda multiparámetros HANNA HI7698194. Los parámetros evaluados incluyeron: temperatura (°C); acidez del agua (pH); conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$). Los datos obtenidos fueron procesados mediante sistemas de información geográfica (SIG), utilizando el software QGIS versión 10.3. A través de este análisis, se generaron mapas que permiten visualizar su distribución.

3. Resultados

Las temperaturas en las surgencias termales varían de 10,59°C a 26,9°C (Figura 2) y de 13,1°C a 44,5°C (Figura 3) en SdM y LV. El valor máximo se registró en una surgencia termal localizada en el Salar de Laguna Verde, en una calicata acondicionada para fines turísticos. La conductividad eléctrica presenta una alta variabilidad en ambas cuencas, alcanzando hasta 214.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 195.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en SdM y LV. Por último, el pH de las muestras varía de 6,1 a 9,43 y de 6,73 a 8,94 en SdM y LV.

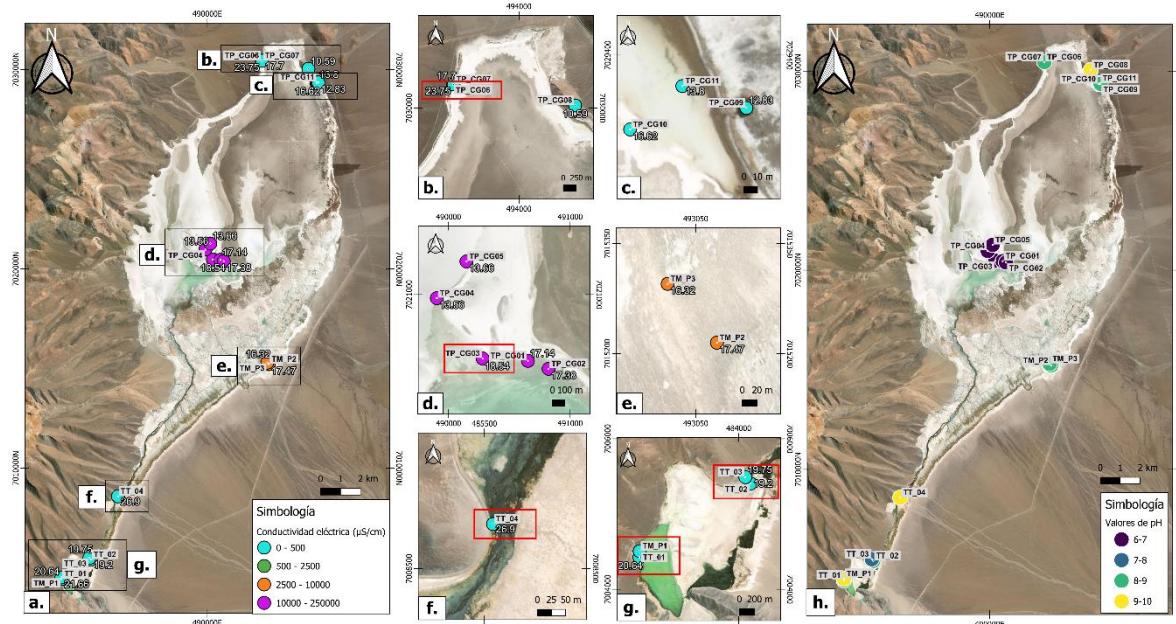


Figura 2. a. Ubicación de los puntos de medición de conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y temperatura en la cuenca SdM. Las figuras insertas (b–g) muestran ampliaciones de zonas específicas de a. con detalle de valores medidos. Los rectángulos rojos indican sitios de temperaturas asumibles a

surgencias termales. **h.** Ubicación de los puntos de medición de pH: morado (6-7), azul (7-8), verde (8-9) y amarillo (9-10). (Fuente: elaboración propia mediante QGIS 10.3)

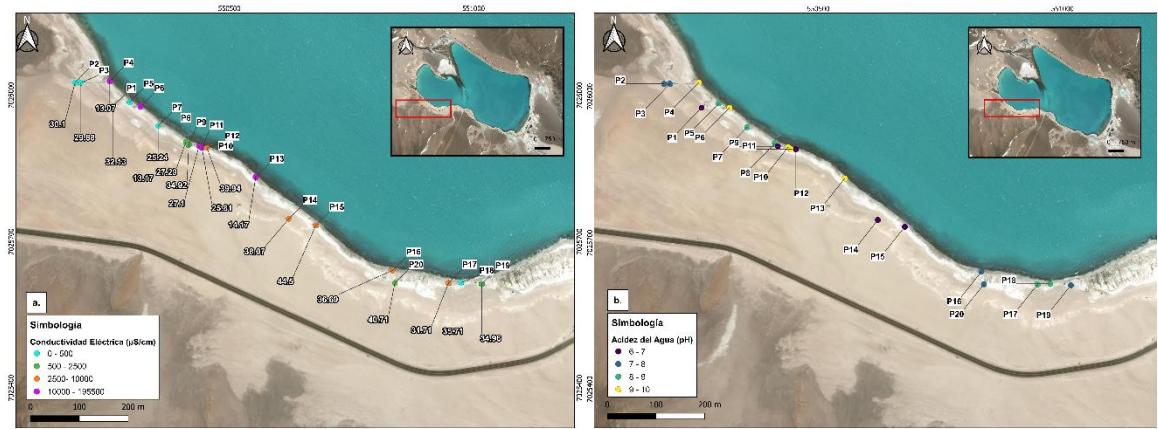


Figura 3. a. Distribución espacial de los puntos de medición de conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y temperatura en margen SW de Cuenca LV. **b.** Ubicación de los puntos de medición de pH. (Fuente: elaboración propia mediante QGIS 10.3)

4. Discusión

En el SdM las termas están distribuidas en distintos sectores y asociadas a intersección entre estructuras, lo que podría indicar la existencia de reservorios complejos como los observados en las termas del Tatio (Letelier *et al.*, 2021). Por el contrario, en LV las surgencias están estrictamente alineadas, lo que podría indicar un ascenso más directo de los fluidos y justifica su mayor temperatura, similar a lo observado en algunos segmentos de fallas corticales en el sur de Chile (Daniele *et al.*, 2020). Además, la distribución y caudal homogéneo de las termas en LV sugieren esfuerzos extensivos, capaces de permitir el ascenso de fluidos a lo largo de planos de falla. El lineamiento que controla la ubicación de las termas sigue una dirección WNW-ESE. El volcanismo activo del Volcán Ojos del Salado sugiere la existencia de una fuente de calor profunda de alta entalpía (Alam y Muñoz., 2024), lo que refuerza el potencial geotérmico del área.

La zona de estudio tiene un enorme potencial turístico, lo que se refleja en sectores con diversos grados de protección: Sitio Ramsar, Parque Nacional, Zona de Interés turístico (ZOIT) y Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP). Además, las cuencas se ubican a los pies del Volcán Ojos del Salado, volcán activo más alto del mundo. Paradójicamente, ambas cuencas se encuentran en procesos de adjudicación de concesiones para la explotación de Litio, lo que pone en peligro la sostenibilidad de los sistemas salinos.

5. Conclusiones

El estudio de las áreas geotermales del Salar de Maricunga (SdM) y Laguna Verde (LV) permitió caracterizar sus propiedades fisicoquímicas y evaluar su potencial para usos directos. En el SdM se observa una distribución heterogénea de las surgencias termales, mientras que en LV, se encuentran en el borde suroeste en forma de alineación, lo que sugiere un control estructural.

En los parámetros fisicoquímico medidos, se observa los valores de conductividad eléctrica que van alcanzan hasta 214.500 µS/cm y 195.500 µS/cm en SdM y LV. Asimismo, las temperaturas registradas en las aguas muestreadas en la zona indican la presencia de numerosas surgencias termales, con valores que alcanzan hasta 26.9 y 44,5 °C en SdM y LV que confirman la presencia activa de sistemas hidrotermales. No obstante, los valores de pH y la CE deben ser evaluados cuidadosamente para identificar potenciales dificultades al utilizar el agua.

En conjunto, el contexto geológico y los parámetros fisicoquímicos medidos, indican que ambas zonas presentan un entorno con potencial significativo para usos directos de la geotermia, tales como la calefacción de cabañas, aplicaciones en balneología e incluso procesos de secado de productos agrícolas. La disposición geométrica de las surgencias refuerza la hipótesis de un control estructural del transporte de fluidos y una fuente magmática de calor para ambos sistemas.

Referencias:

- 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.
- Aravena, D., Muñoz, M., Morata, D., Lahsen, A., Parada, M. Á., y Dobson, P. (2016). Evaluación de recursos geotérmicos de alta entalpía y áreas prometedoras de Chile. *Geothermics*, 59, 1-13.
- Chong, G. 1984. Die Salare in Nordchile-Geologie, Struktur und Geochimie-Geotecktonische Forschung, Vol. 67, 146 p. Stuttgart.
- Hardie, L. A., Smoot, J. P., & Eugster, H. P. (1978). Saline lakes and their deposits: a sedimentological approach. *Modern and ancient lake sediments*, 7-41.
- Lahsen, A. (1988). Chilean geothermal resources and their possible utilization. *Geothermics*, 17(2-3), 401-410.
- Letelier, JA, O'Sullivan, J., Reich, M., Veloso, E., Sánchez-Alfaro, P., Aravena, D., ... & Morata, D. (2021). Modelo de arquitectura de yacimientos y modos de transferencia de calor en el sistema geotérmico El Tatio-La Torta, Andes centrales del norte de Chile. *Geotermia*, 89 , 101940.
- Risacher, F.; Alonso, H.; Salazar, C. 2003. The origin of brines and salts in Chilean salars: a hydrochemical review. *Earth-Science Reviews* 63 (3-4): 249-293.
- Taucare Toro, M., Viguier, B., Daniele, L., Heuser, G., Arancibia, G., & Leonardi, V. (2020). Connectivity of fractures and groundwater flows analyses into the Western Andean Front by means of a topological approach (Aconcagua Basin, Central Chile).