Proceedings of the
Latin-American Geothermal Congress 2025
LGC 2025
San Salvador, El Salvador
22–26 Sept. 2025

Li (y otros elementos estratégicos) en fluidos geotermales andinos: una opción de economía circular y minería verde para un futuro sustentable

Diego Morata*[1], Santiago Maza[1] y Diego Aravena[2]

[1, 2] Departamento de Geología y Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA). Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Plaza Ercilla 808, Santiago, Chile (E-mail: dmorata@ing.uchile.cl; santiagomaz@gmail.com)

[2] Departamento de Geología y Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA). Universidad de Atacama. Copiapó, Chile. (E-mail: djaravena@gmail.com)

ABSTRACT:

La transición energética hacia un futuro más sustentable debiese apuntar hacia un mayor y mejor desarrollo de la geotermia. Varias iniciativas de instituciones internacionales sugieren un esfuerzo de todos los actores para un impulso hacia el desarrollo de la geotermia, tanto para la generación de electricidad como para el uso directo. Numerosos países europeos están implementando sistemas de calefacción distrital con geotermia y existen programas internacionales impulsando el desarrollo de invernaderos geotérmicos para favorecer el cultivo de hortalizas y verduras. Pero la transición energética también necesita elementos estratégicos como el Li, cuya explotación está principalmente concentrada en yacimientos asociados a granitos y en salares del norte de Chile, de Argentina y sur de Bolivia (el “triángulo del Li”). Estas son las grandes reservas de Li, que involucran un gran consumo de energía y agua para su explotación. Sin embargo, el Li, junto a otros elementos estratégicos, está presente en los fluidos geotermales ubicados a gran profundidad y desconectados de los ecosistemas superficiales. Hay experiencias en Europa y EEUU encaminadas a extraer Li desde salmueras geotérmicas, dando un valor agregado a la geotermia. En el caso de los sistemas geotermales andinos, y en particular los ubicados en el norte de Chile, Argentina y sur de Bolivia, los contenidos en Li de fluidos geotermales varían desde <1 ppm hasta varias decenas de ppm, valores que, si bien son inferiores a los de, por ejemplo, Cornwell en UK, permitirían generar un valor agregado a la generación de electricidad con geotermia. Y no es sólo Li. La recuperación de elementos estratégicos supone un reto científico para hacerlo sustentable y económicamente viable con el desarrollo de una planta geotérmica. Pero, por otro lado, se convertiría en un perfecto ejemplo de economía circular y minería

verde, reduciendo el impacto ambiental que la minería extractivista tradicional conlleva.

Keywords: Andes, economía circular, Li, metales críticos, salmueras geotermales.

1. Introducción

La transición energética encaminada a un escenario futuro más sustentable, y con menor dependencia de combustibles fósiles, ha promovido fuertemente el desarrollo de la geotermia a nivel mundial. Y no sólo con miras a la generación de electricidad a partir de recursos geotermales de alta temperatura, sino también a aprovechar aquellos sistemas geotermales de baja o media entalpía que permitan el uso directo de los mismos para implementar sistemas de calefacción distrital o el uso de la bomba de calor geotérmica. Es decir, la geotermia no sólo provee electricidad limpia, autónoma y sustentable, sino que también aporta calor. Y una nueva derivada del uso eficiente de la geotermia se ha puesto en la agenda de varios países en donde existen recursos geotermales de alta temperatura, ya que en estas salmueras son frecuentes la presencia de elementos en disolución que, mediante diferentes procesos ingenieriles, pueden ser recuperados para su comercialización. De hecho, las salmueras geotérmicas están normalmente enriquecidas en algunos de los llamados elementos críticos [1], que son los que están siendo llamados a gobernar la transición energética. Hasta hace algunos años las altas concentraciones de elementos en las salmueras geotérmicas eran considerado un problema, pero hoy día se está viendo la oportunidad de recuperar de estas salmueras, antes de su reinyección al reservorio, algunos de estos elementos en disolución, cuyo impacto en el modelo de negocios de la planta pudiese ser económicamente muy favorable. De entre estos elementos destaca el Li, elemento cuya explotación está principalmente concentrada en yacimientos asociados a granitos y en salares del norte de Chile, de Argentina y sur de Bolivia (el “triángulo del Li”). Son varias las iniciativas encaminadas tanto en Europa como en USA a realizar un catastro sistemático de las concentraciones de Li y otros elementos críticos en sistemas geotermales [2], [3], como una base necesaria para poder valorizar desde un punto de vista económico la posibilidad de su recuperación mediante diferentes tecnologías [4]. Y los sistemas geotermales andinos no son una excepción, lo que podría ser un valor agregado al desarrollo de la geotermia en nuestros países y un motor extra para le desarrollo nacional mediante una extracción mucho más sustentable del Li (entre otros elementos) encaminada a lo que podría denominarse como una minería verde en el marco del concepto de economía circular.

2. Li (y otros elementos críticos) en sistemas geotermales de Chile

Durante los últimos años, el avance de la investigación de diferentes sistemas geotermales de alta temperatura en Los Andes de Chile, ha permitido poder disponer de una base de datos geoquímicos que podría permitir generar un mapeo de Li (y otros elementos críticos) en los diferentes sistemas geotermales como lo mapeado en USA [3]. Un primer intento de identificar la potencialidad de extracción de Li (y otros elementos químicos) pudiese ser recuperados desde las salmueras termales fue publicado en [7] haciendo una estimación económica de esta posible recuperación de elementos críticos en [6]. Los contenidos en Li más altos registrados corresponden a los medidos en El Tatio (61 mg/l) y lo reportado en pozos de producción de Cerro Pabellón (62 mg/l), ambos sistemas ubicados en el norte de Chile (ver figura 1). Elementos como el B, Cs, Br y K también presentan sus máximos contenidos en sistemas geotermales del norte del país [6]. Estos contenidos en Li son sustancialmente inferiores a los reportados en sistemas geotermales de Italia, Alemania, Francia y UK [2], en donde las concentraciones varían desde 125 a 480 mg/l. No obstante estas relativamente bajas concentraciones de Li (y otros elementos críticos), aplicando un simple cálculo que permite evaluar el potencial económico de las salmueras geotermales del sistema geotermal de Cerro Pabellón (el único sistema andino con una planta de generación de electricidad instalada) conociendo las concentraciones de cada elemento, la tasa de flujo de los pozos productores, el factor de planta y la eficiencia de la recuperación de estos elementos, [6] concluye que la recuperación de Li podría suponer beneficios económicos de unos US$195 millones/año y Cs de unos US$615 millones/año.

3. Discusión y principales conclusiones

Varias son las barreras que está sufriendo el desarrollo masivo de la generación de electricidad con geotermia en nuestros países andinos. Incluso en Chile, en donde la planta Cerro Pabellón (81 MWe) ha permitido demostrar que es posible generar electricidad con geotermia, hay una gran incertidumbre sobre el desarrollo futuro de la geotermia y sobre la posibilidad de que un nuevo campo geotermal pase del estado de exploración al de explotación. En el caso de Chile, el modelo económico imperante hace que la generación de electricidad con geotermia no sea “económicamente competitiva” respecto a otras fuentes de energía renovables (solar y eólica). Sin embargo, los resultados presentados en [5] y [6] muestran cómo, incluso bajo condiciones conservadoras respecto al coeficiente de recuperación de elementos críticos desde salmueras geotérmicas

(caso de Cerro Pabellón y, muy posiblemente, el de numerosos sistemas geotermales del norte de Chile, norte de Argentina y suroeste de Bolivia), se podrían generar beneficios de varias centenas de millones de dólares/año, lo que supondría un valor agregado al beneficio de la geotermia. Es cierto que aún quedan desarrollos tecnológicos por resolver para poder optimizar la recuperación eficiente de esos elementos críticos sin afectar mayormente la sustentabilidad del reservorio geotermal. Pero eso se resuelve con programas de I+D+i que apunten hacia una economía circular y a un aprovechamiento efectivo de la energía geotérmica, no sólo como generación de electricidad, sino como una fuente de elementos críticos que permitan, de este modo, la flotabilidad económica de un proyecto geotérmico.

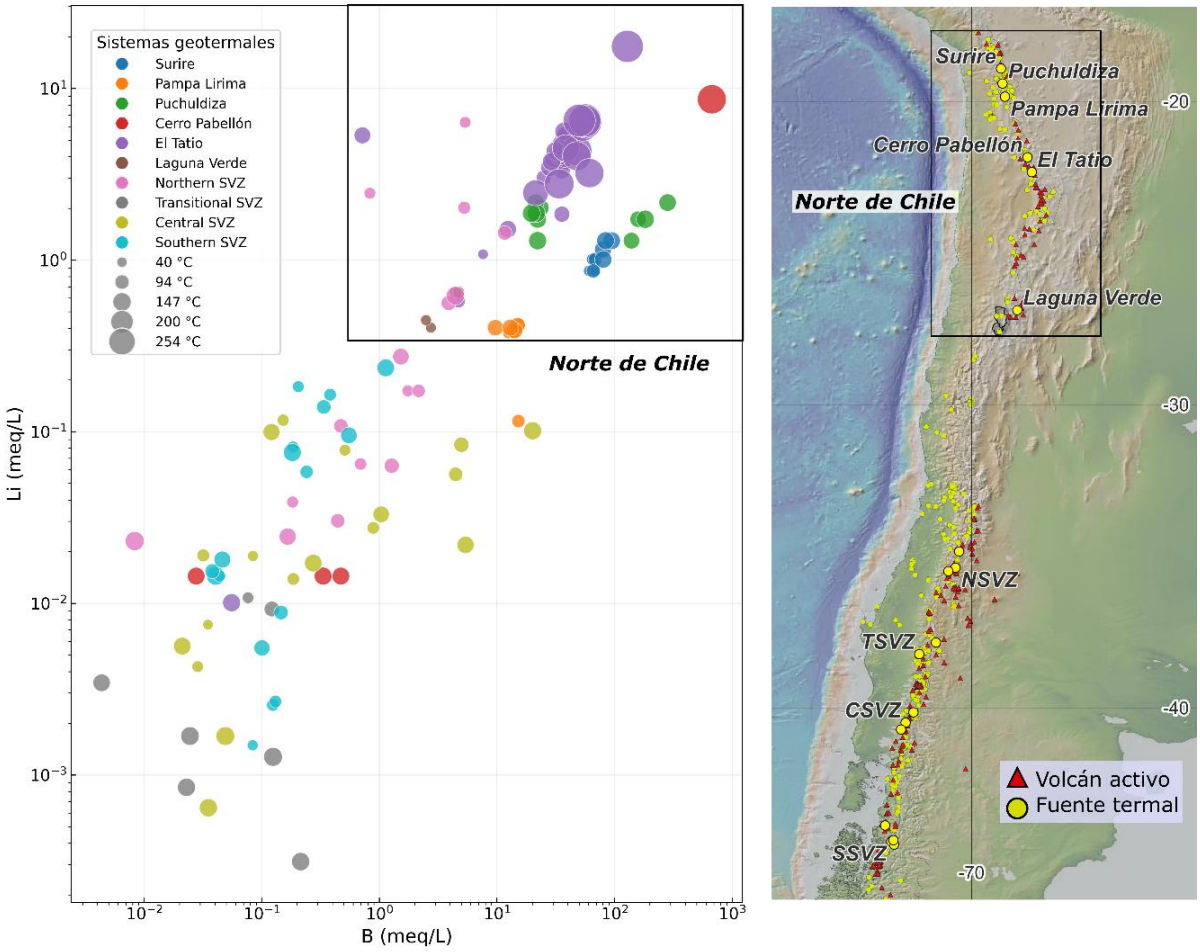


Figura 1. Concentración de Litio y Boro en sistemas geotermales del norte y sur de Chile (meq/L). El tamaño de los símbolos indica la temperatura del sistema geotermal analizado.

Agradecimientos. Este trabajo es una contribución al Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), al Proyecto Fondecyt Regular 1250080 *"Andean Li-rich clays: genesis and evolution during diagenesis"* y a la beca ANID de doctorado nacional en Chile 21253193 (DA).

Referencias:

[1] Reich, M., Simon, A.C.: Critical Minerals. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2025, 53: 141-168. https://doi.org/10.1146/annurev-earth-040523-023316

[2] Sanjuan, B., Gourcerol, B., Millot, R., Rettermaier, D., Jeandel, E., Rombaut, A.: Lithium-rich geothermal brines in Europe: An up-date about geochemical characteristics and implications for potential Li resources. Geothermics, 2022, 101, https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102385

[3] Neupane, G., Wendt, D.S.: Assessment of Mineral Resources in Geothermal Brines in the US. Proceedings, 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, 2017, Stanford University, Stanford, California, February 13-15, 2017, SGP-TR-212

[4] Goldberg, V., Kluge, T., Nitschke, F.: Challenges and Opportunities for Lithium Extraction from Geothermal Systems in Germany: Part 1: A Literature Review of Existing Extraction Technologies. In: A. Ch. Braun et al. (eds.), Eco-Industrial Development as an Industrial Strategy, Green Energy and Technology, 2025, 321-358, https://doi.org/10.1007/978-3-031-73576-9_17

[5] Goldberg, V., Winter, D., Nitschke, F., Rath, N., Held, S., Spitzmüller, L., Budach, I., Pavez, M., Morata, D., Koschikowski, J., Kohl, T.: The potential of raw material extraction from thermal brines – Successful milestones of the BrineMine project. Oil Gas European Magazine, 2021, DOI 10.19225/210306

[6] Pérez, I., Goldberg, V., Nitschke, F-, Morata, D., Koschikowski, J., Kohl, T.: Raw Material Potential of Geothermal Systems in Chile. In: A. Ch. Braun et al. (eds.), Eco-Industrial Development as an Industrial Strategy, Green Energy and Technology, 2025, 381-398, https://doi.org/10.1007/978-3-031-73576-9_19

[7] Goldberg, V., Nitschke, F., Kluge, T.: Challenges and Opportunities for Lithium Extraction from Geothermal Systems in Germany: Part 2: Potential and Production Scenarios in Germany. In: A. Ch. Braun et al. (eds.), Eco-Industrial Development as an Industrial Strategy, Green Energy and Technology, 2025, 359-380, https://doi.org/10.1007/978-3-031-73576-9_18