

Identificación de zonas de alteración hidrotermal en la Puna de Atacama mediante Google Earth Engine y clasificación supervisada

Valentina Giovanetti *¹, Diego Aravena ^{1,2}

¹ Universidad de Atacama, Departamento de Geología, Chile.

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

*E-mail: valentina.giovanetti@ug.uchile.cl

Keywords: Alteración hidrotermal, Google Earth Engine, Puna de Atacama, Random Forest

ABSTRACT:

La Puna de Atacama se ubica en el margen sur de la Zona Volcánica Central, un arco volcánico activo que alimenta decenas de sistemas geotermales y cientos de manifestaciones superficiales. Al ser una zona a gran altitud y de difícil acceso, la obtención de datos hidrogeológicos es difícil. En este contexto, la exploración remota es una opción eficiente para identificar correlaciones espaciales entre indicadores de potencial geotermal. En este trabajo se estudiará la correlación entre estructuras geológicas, fuentes geotermales y zonas de alteración. Estas últimas, son identificadas mediante Google Earth Engine y clasificación supervisada. Se implementó un clasificador Random Forest para la clasificación de cobertura el que fue entrenado con puntos de control a partir de hojas geológicas regionales y locales. Los resultados muestran que las surgencias termales y volcanes activos, ubicados en el margen oriental y central de la Puna de Atacama, se correlacionan estrechamente con la ocurrencia de alteración hidrotermal localizada, con un claro control estructural y topográfico.

Introducción

Los sistemas geotermales se emplazan en regiones de alto flujo de calor cortical que pueden estar asociados a cuerpos ígneos jóvenes o a roca a altas temperaturas de la corteza ([1], [2]). El norte de Chile, engloba el segmento sur de la Zona Volcánica Central (ZVC), un arco volcánico activo que alimenta decenas de sistemas geotermales y cientos de manifestaciones superficiales [3]. Entre los 25.3 °S y 27.7 °S, se ubica la Puna de Atacama, el segmento terminal de la ZVC. Esta provincia se caracteriza por la presencia de cuencas endorreicas y altas tasas de evaporación, lo que ha dado pie a la formación de sistemas salinos compuestos por lagunas hipersalinas y salares [4]. En estas cuencas es posible encontrar abundantes manifestaciones geotermales como termas, travertinos y fumarolas ([3], [5], [6]). Además, se ha identificado un rol crucial de los sistemas de fallas en sistemas geotermales del norte de Chile [7]. En la puna de Atacama, sobre los 3.700 msnm, la adquisición de datos es difícil. Existe abundante exploración minera, pero escasa investigación disponible sobre manifestaciones geotermales.

En este contexto, la exploración remota es una opción eficiente para identificar correlaciones espaciales entre indicadores de potencial geotermal. Para ello, en este trabajo se estudiará la correlación entre estructuras geológicas, fuentes geotermales y zonas de alteración. Estas últimas, son identificadas mediante Google Earth Engine y clasificación supervisada.

Metodología

Para la clasificación de cobertura de suelo usamos imágenes multi espectrales de la colección Landsat 8 OLI/TIRS [8]. Las imágenes fueron obtenidas y procesadas mediante Google Earth Engine (GEE) [9]. Se filtraron imágenes con más de 5% de nubosidad, imágenes que no contengan las bandas termales y dejamos solo imágenes de diciembre. Se incorporaron índices para las distintas clases de cobertura: agua, nieve/hielo, vegetación (vegas y bofedales), tapete microbiano, roca volcánica, sedimento/roca sedimentaria, alteración hidrotermal, sulfato y hierro. Se incluyó un Modelo de Elevación Digital (DEM), ALOS PALSAR [10], para incorporar los efectos de la elevación y pendiente. Se entrenó un clasificador de cobertura Random Forest (RF) [11] con 200 árboles de decisión. Se derivaron puntos de control a partir de las hojas Geológicas en escala 1:1.000.000 y 1:100.000 del Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN), divididos en un 70% para entrenamientos y un 30% para validación. Evaluamos los resultados mediante el algoritmo de precisión de GEE [9] y el coeficiente Kappa [12].

Resultados

El modelo alcanzó una precisión del 92.0% y un Kappa de 0.909, indicando una concordancia casi perfecta según los umbrales de [12]. Los resultados muestran que la alteración hidrotermal se concentra principalmente en el sector occidental del área de estudio, aunque también aparece, en menor proporción y de forma dispersa, en los sectores central y oriental, sectores que además contiene todos los volcanes activos y surgencias termales, por lo que se infiere que posee un mayor potencial geotermal. En este dominio de mayor potencial, los índices de sulfato y hierro muestran una alternancia entre los sectores norte, centro-norte, centro-sur y sur respectivamente (Fig 1). Además, se identifican múltiples fuentes eruptivas que presentan un alto índice de hierro en su cráter, los que están rodeados por zonas concéntricas con un alto índice de sulfatos.

Discusión

Se identifica una correlación espacial fuerte entre la ubicación de los volcanes activos, fuentes termales y lineamientos regionales. A escala local, la mayoría de las surgencias termales se ubican alrededor de estructuras menores, se correlacionan fuertemente con la presencia localizada de alteración hidrotermal.

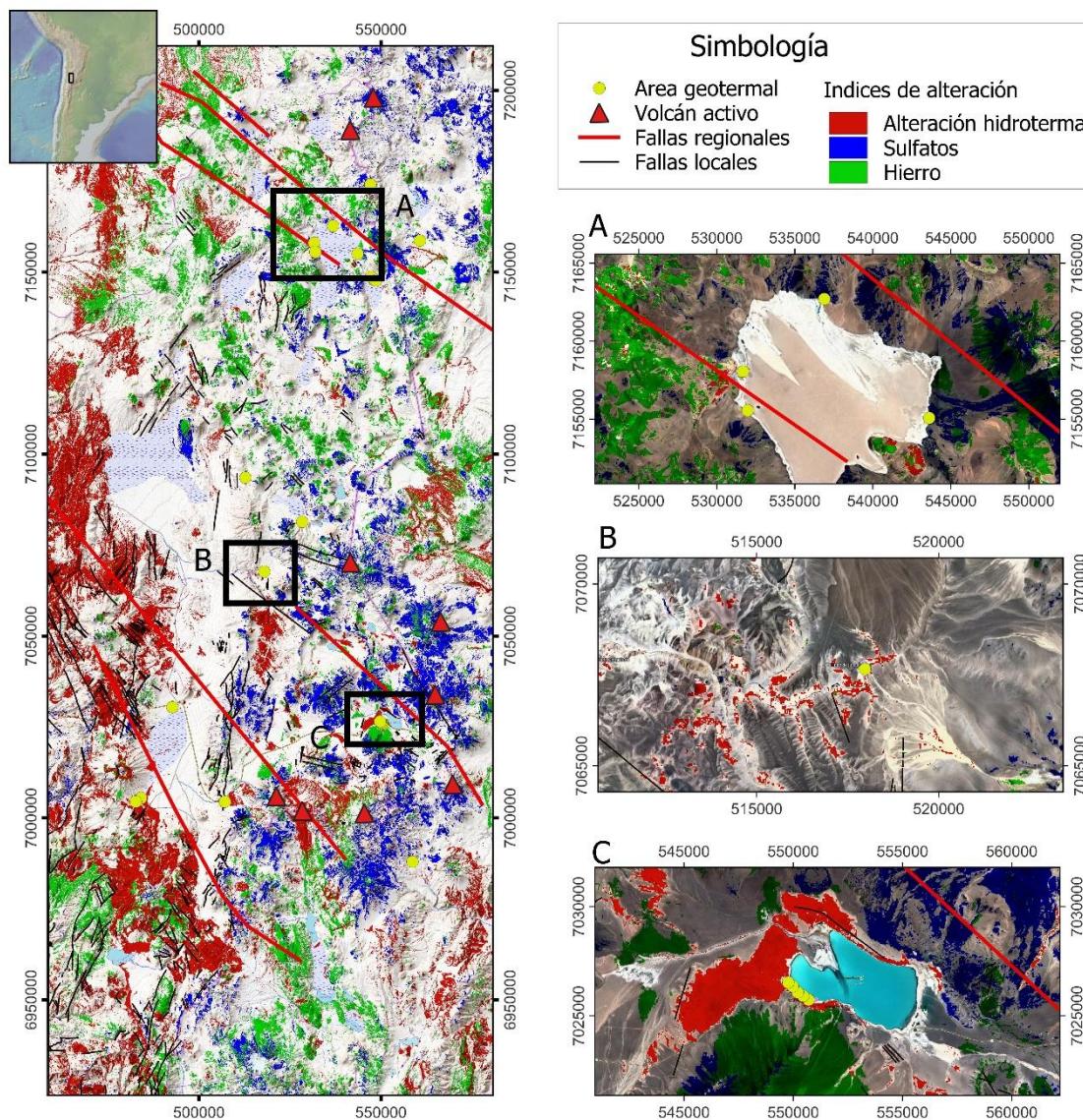


Figura 1. Volcanes activos, fallas geológicas, fuentes termales e índices de alteración identificados en la Puna de Atacama.

El levantamiento de antecedentes permitió identificar que existe una gran cantidad de manifestaciones geotermales que no han sido documentadas, ubicadas en los bordes de los salares y alineadas sobre lineamientos de escala regional, en zonas topográficamente bajas. Los siguientes pasos de esta investigación deben incluir el muestreo y análisis espectral de minerales en puntos de control, así como una evaluación estructural que permita elucidar el mecanismo de almacenamiento en potenciales reservorios.

Conclusiones

En este trabajo, se identificaron valiosas correlaciones espaciales entre fallas geológicas, fuentes geotermicas y zonas de alteración identificadas mediante Google Earth Engine y clasificación supervisada. Se identificó un dominio de alto potencial geotermal en el centro y oriente de la Puna de Atacama, donde se reconoce una amplia presencia de rocas con altos índices de sulfato y hierro. Sin embargo, las manifestaciones geotermicas se correlacionan de forma localizada con áreas de alteración hidrotermal.

Agradecimientos: este trabajo es financiado por el Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA), el Observatorio de Gobernanza de Cuencas de la Universidad de Atacama y la beca ANID de doctorado en Chile, año académico 2025, folio 21253193.

Referencias:

- [1] DiPippo, R.: 'Geothermal power plants: principles, applications, case studies and environmental impact', Butterworth-Heinemann, 2012, 1st edn.
- [2] Jolie, E., Scott, S., Faulds, J., et al.: 'Geological controls on geothermal resources for power generation', *Nat. Rev. Earth Environ.*, 2021, 2, (5), pp. 324–339
- [3] Chong Diaz, G., Demergasso, C., Urrutia Meza, J., et al.: 'The saline domain of northern Chile and its industrial mineral deposits', *Bol. Soc. Geol. Mex.*, 2020, 72, (3)
- [4] Lahsen, A.: 'Chilean geothermal resources and their possible utilization', *Geothermics*, 1988, 17, (2-3), pp. 401–410
- [5] Hauser, Y.: 'Catastro y caracterización de las fuentes de aguas minerales y termales de Chile', 1997
- [6] García, K., Díaz, D.: 'Three-dimensional geo-electrical structure in Juncalito geothermal prospect, northern Chile', *Geothermics*, 2016, 64, pp. 527–537
- [7] Veloso, E. E., Tardani, D., Elizalde, D., et al.: 'A review of the geodynamic constraints on the development and evolution of geothermal systems in the Central Andean Volcanic Zone (18–28 Lat. S)', *Int. Geol. Rev.*, 2020, 62, (10), pp. 1294–1318
- [8] Earth Resources Observation and Science (EROS) Center: 'Landsat 8-9 Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor Level-1, Collection 2', U.S. Geol. Surv., 2020
- [9] Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., et al.: 'Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone', *Remote Sens. Environ.*, 2017
- [10] Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA): 'ALOS World 3D - 30m (AW3D30) Version 3.2', Earth Obs. Res. Cent., 2021
- [11] Breiman, L.: 'Random forests', *Mach. Learn.*, 2001, 45, pp. 5–32
- [12] Landis, J. R., & Koch, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 1977, 159–174.