

# Análisis Multiespectral y temporal para la Caracterización del Potencial Geotérmico del Volcán Azufral en su Contexto Estructural

Delgado M.\*

Gestión Catastral, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, COLOMBIA.

(E-mail: maria.delgadog@igac.gov.co, mariajo19977@gmail.com)

## RESUMEN

La integración de técnicas de teledetección multiespectral (SAM, índices NDVI, VIBS y el índice compuesto GMP) junto con el análisis estructural de fallas y lineamientos geológicos, permitió caracterizar la distribución espacial de alteraciones hidrotermales en el Volcán Azufral (SW de Colombia). Esta aproximación facilitó la delimitación preliminar de zonas con potencial geotérmico tanto de baja ( $<70^{\circ}\text{C}$ ) como de alta temperatura ( $>70^{\circ}\text{C}$ ), resaltando el control tectónico sobre los flujos hidrotermales superficiales.

**Palabras clave:** Volcán Azufral, exploración geotérmica, multitemporal, sensores remotos, multiespectral, alteraciones hidrotermales.

## Introducción

El Volcán Azufral (4.070 msnm), ubicado en el altiplano nariñense, forma parte del arco volcánico andino del SW colombiano. Su evolución está controlada por la intersección del Sistema de Fallas Cauca-Patía (NE–SW) con estructuras transversales NW–SE, generando un entorno favorable para la migración de fluidos geotérmicos. Presenta una caldera somital con domos de lava que albergan la Laguna Verde, y un edificio compuesto por depósitos piroclásticos, flujos lávicos y unidades volcánico-sedimentarias del Neógeno, enmarcadas por rocas ígneas del Paleógeno y Cretácico (Olvera-García, y otros, 2023; Matiz-León, Rodríguez-Rodríguez, & Alfaro-Valero, 2019).

Las manifestaciones geotérmicas incluyen fumarolas, fuentes termales y zonas de alteración hidrotermal entre los 3.000 y 4.000 msnm, con temperaturas superficiales de hasta  $76,6^{\circ}\text{C}$ . A través del análisis estructural sobre modelos digitales de elevación (DEM) y realce de imágenes satelitales, se identificaron lineamientos activos, los cuales fueron validados mediante cartografía del Servicio Geológico Colombiano (SGC) y clasificados por edad y cinemática estructural

según García, (2023), para evaluar su influencia sobre el sistema geotérmico (Gonzales, Zapata, & Montoya, 2002).

## Metodología

El análisis de imágenes multitemporales Sentinel-2 (2017, 2020 y 2024), se enfocó en bandas del infrarrojo cercano y de onda corta (B8A, B11, B12). Se calcularon índices espectrales asociados a procesos de alteración hidrotermal superficial, incluyendo NDVI1–4, vegetación, óxidos de hierro y silicatos, como precursores de mineralización tipo alunita, caolinita y sílice (San, Sumer, & Gurcay, 2004; Meer, Wer, & Ruitenbeek, 2022; van der Werff & van der Meer, 2016).

Para la clasificación espectral se importaron las firmas espectrales desde la biblioteca espectral del USGS (alunita y caolinita), procesadas mediante el algoritmo SAM (Spectral Angle Mapper) y paralelamente, se empleó el índice VIBS (Vegetation Index-Based Separation) para caracterizar estrés vegetal inducido por actividad geotérmica. El índice GMP (Geothermal Manifestation Potential) se construyó integrando los índices anteriores. Finalmente, los resultados fueron correlacionados con cartografía geológica y lineamientos estructurales basado en modelos digitales de elevación (DEM), con el fin de evaluar el control tectónico sobre la distribución de zonas alteradas (Kubo, Gonnokami, Hawu Hede, & Koike, 2023; Tompolidi, Sykoti, Koutroumbas, & Parcharidis, 2020).

## Resultados

El análisis multitemporal evidenció variaciones espaciales en la alteración hidrotermal del Volcán Azufral, reflejadas en la respuesta espectral a caolinita y alunita mediante el algoritmo SAM (Figura 1). Las zonas con mayor similitud espectral (valores bajos) de vegetación coincidieron con manifestaciones geotérmicas reportadas (fumarolas, fuentes termales), lo que sugiere actividad sostenida, mientras que la caolinita presentó distribución más amplia (alteración argílica intermedia) y la alunita mayor concentración puntual (condiciones ácidas) (Gizdavec, y otros, 2022).

La integración con el índice VIBS permitió identificar estrés vegetativo en zonas también ricas en minerales alterados. Esta correlación, visible en la Figura 2, confirma la utilidad de una interpretación espectral combinada. Finalmente, los patrones de alteración mostraron alineación con estructuras regionales como la falla Cali-Patía y lineamientos Azufral-Sapuyes y Guachucal, destacando el control tectónico en la circulación de fluidos.

## Discusión

Las zonas con valores altos de GMP coinciden con intersecciones estructurales de fallas NE–SW (Cali-Patía) y lineamientos NW–SE, definiendo probables zonas de alta permeabilidad que favorecen la migración de fluidos hidrotermales, señalando sectores activos, incluso en áreas densamente vegetadas (Ver Figura 2).

Las imágenes de 2020 y 2024 indican mayor correspondencia espectral, posiblemente por condiciones atmosféricas más estables o mejoras en la resolución. La metodología aplicada demostró su eficacia para mapear alteración hidrotermal superficial en ambientes complejos, integrando respuesta mineralógica y vegetativa.

## Conclusiones

El índice VIBS, derivado de NDVI2 y NDVI4, evidenció estrés vegetal asociado a actividad hidrotermal, mientras que el algoritmo SAM, aplicado sobre firmas de alunita y caolinita, permitió mapear zonas alteradas en áreas expuestas. La combinación de ambos insumos permitió construir el índice GMP, útil para priorizar sectores con potencial geotérmico, en concordancia con estructuras tectónicas activas y manifestaciones conocidas. Aunque no reemplaza la validación en campo, GMP ofrece una herramienta eficiente para orientar exploraciones preliminares.

Figura 1. Linear Spectral Unmixing (LSU) para el año 2017. (a). Separación de áreas con vegetación y sin vegetación. (b) y (c). Distribuciones de reflectancia espectral de Alunita y Caolinita indicando zonas de alto peso que coincide con manifestaciones geotérmicas superficiales

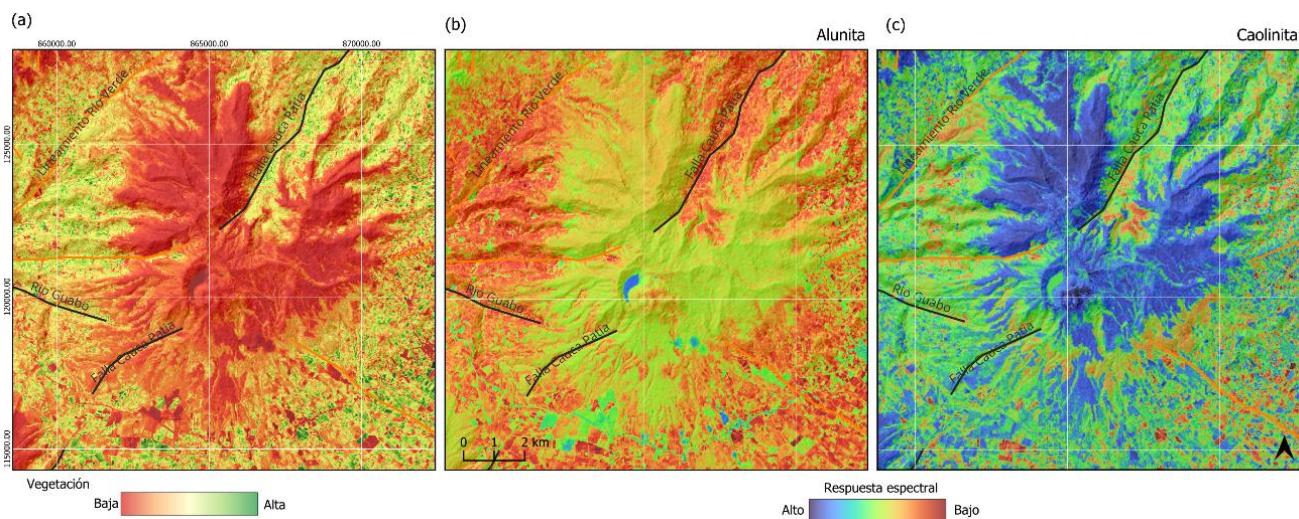
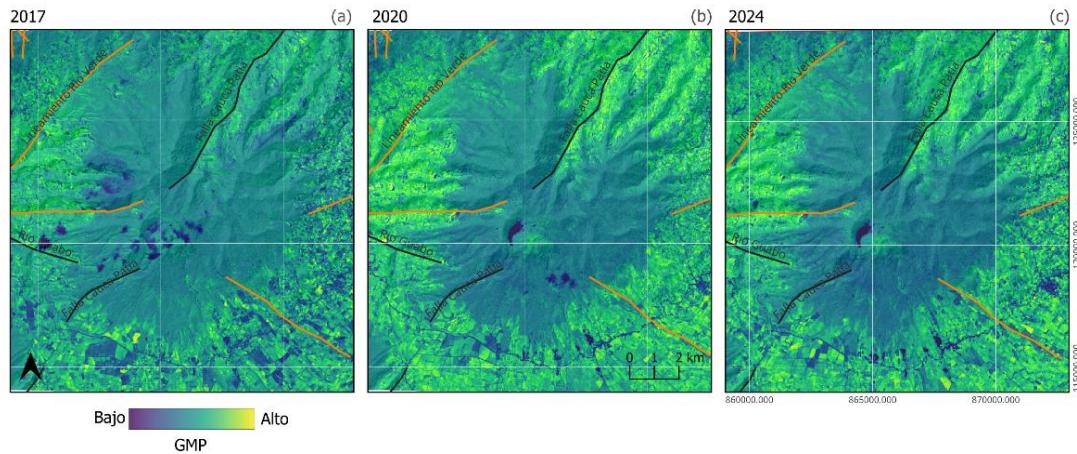


Figura 2. Distribución del índice GMP en tres temporalidades en el área de estudio, obtenido combinando los valores de VIBS (calculados en píxeles con vegetación) con los

**pesos de caolinita y alunita obtenidos a partir de los cálculos de LSU**



**Referencias**

- Gizdavec, N., Gašparovic, M., Miko, S., Lužar-Oberiter, B., Ilijanic, N., & Peh, Z. (2022). Discrimination of Rock Units in Karst Terrains Using Sentinel-2A Imagery. *Remote Sensing*.
- Gonzales, H., Zapata, G., & Montoya, D. (2002). Geología y geomorfología de la plancha 428 Túquerres. *Ingeominas*.
- Kubo, T., Gonnokami, H., Hawu Hede, A., & Koike, K. (2023). Combining vegetation index with mineral identification for detection of high-geothermal-potential zones using hyperspectral satellite data. *Elsevier Ltd.*
- Matiz-León, J., Rodríguez-Rodríguez, G., & Alfaro-Valero, C. (2019). Modelos de temperatura del suelo a partir de sondeos superficiales de temperatura y sensores remotos para el área geotérmica del volcán Azufral. *Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, Vol. 29(1).
- Meer, F., Wer, H., & Ruitenbeek, F. (2022). Potential of ESA's Sentinel-2 for geological applications. *Department of Earth Systems Analysis, Faculty for Geo-Information Science and Earth Observation, University of Twente, Enschede, 7500 AE, The Netherlands*.
- Olvera-García, E., Bridget F, A., Rueda-Gutierrez, J., Morales Rivera, A., Rodríguez-Rodríguez, G., Malo, J., . . . Alfaro-Valero, C. (2023). Expert-driven play Fairway Analysis applied to the Azufral Volcano Geothermal Area in southwestern Colombia. *Elsevier Ltd.*, 115.
- San, B., Sumer, O., & Gürçay, B. (2004). Comparison of band ratioing and spectral indices methods for detecting alunite and kaolinite minerals using aster data in Biga Region, Turkey. *Remote Sensing Center, Ankara, Turkey*.
- Tompoldi, A., Sykioti, O., Koutroumbas, K., & Parcharidis, I. (2020). Spectral Unmixing for Mapping a Hydrothermal Field in a Volcanic Environment Applied on ASTER, Landsat-8/OLI, and Sentinel-2 MSI Satellite Multispectral Data: The Nisyros (Greece) Case Study. *Remote Sensing*.
- van der Werff, H., & van der Meer, F. (2016). Sentinel-2A MSI and Landsat 8 OLI Provide Data Continuity for Geological Remote Sensing. *Remote sensing*.