

Research article

Reconocimiento de un Sistema Hidrotermal Propilítico-Skarn Mediante Teledetección y Geoquímica para la Prospectividad mineral en La Salina, Casanare, Colombia.

Recognition of a Propylitic-Skarn Hydrothermal System through Remote Sensing and Geochemistry for Mineral Prospectivity in La Salina, Casanare, Colombia.

Manuel Guillermo Zafra Dulcey, , Landterra Consultores SAS, Bogotá D.C., Colombia.

Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo delimitar zonas de alteración hidrotermal asociadas con potencial mineral en el municipio de La Salina (Casanare, Colombia), mediante la integración de imágenes ASTER, procesamiento en *Google Earth Engine* (GEE), análisis espectral avanzado y validación geoquímica. Para ello se procesaron imágenes ASTER Level-1T mediante composiciones multitemporales, cálculo de índices espectrales de alteración, estimación de temperatura superficial (LST) y normalización estadística. Posteriormente, se aplicaron los algoritmos Spectral Angle Mapper (SAM) y Mixture Tuned Matched Filtering (MTMF) empleando firmas espectrales de la biblioteca USGS, cuyos resultados fueron integrados con análisis geoquímicos obtenidos mediante fluorescencia de rayos X portátil (FRX) y un modelo de ponderación multicriterio para construir un mapa de prospectividad mineral. Los resultados permitieron identificar una zonación hidrotermal bien definida, caracterizada por alteración argílica avanzada en el sector noroccidental y alteración propilítica hacia el noreste, con alta correspondencia espacial entre las respuestas espectrales, las anomalías geoquímicas de estaño (Sn), antimonio (Sb), Plata (Ag) y zinc (Zn), los controles estructurales y la presencia de cuerpos gabroideos. La integración de la información espectral, térmica, geoquímica y geológica evidencia la superposición de un halo propilítico regional con eventos metasomáticos tipo skarn, permitiendo delimitar zonas prioritarias para exploración. La metodología propuesta constituye un procedimiento reproducible y de bajo costo para la prospección temprana de sistemas hidrotermales en ambientes vulcano-sedimentarios y fortalece el uso integrado de la teledetección y la geoquímica en la exploración mineral.

Palabras clave: Sensores remotos; Alteración hidrotermal; Google Earth Engine; Skarn; Validación geoquímica; MTMF/SAM.

Abstract

This study aimed to delineate hydrothermal alteration zones associated with mineral potential in the municipality of La Salina (Casanare, Colombia) through the integration of ASTER imagery, processing in Google Earth Engine (GEE), advanced spectral analysis, and geochemical validation. ASTER Level-1T images were processed using multitemporal composites, alteration spectral indices, land surface temperature (LST) estimation, and statistical normalization. Subsequently, the Spectral Angle Mapper (SAM) and Mixture Tuned Matched Filtering (MTMF) algorithms were applied using spectral signatures from the USGS library, and the results were integrated with geochemical analyses obtained by portable X-ray fluorescence (XRF) and a multicriteria weighting model to generate a mineral prospectivity map. The results identified a well-defined hydrothermal zonation characterized by advanced argillic alteration in the northwestern sector and propylitic alteration toward the northeast, with a high spatial correspondence among spectral responses, geochemical anomalies of tin (Sn), antimony (Sb), silver (Ag), and zinc (Zn), structural controls, and the presence of gabbroic bodies. The integration of spectral, thermal, geochemical, and geological information provides evidence for the superposition of a regional propylitic halo with skarn-type metasomatic events, allowing the delineation of priority exploration targets. The proposed methodology constitutes a reproducible and relatively low-cost procedure for the early-stage prospecting of hydrothermal systems in volcano-sedimentary environments and reinforces the integrated use of remote sensing and geochemistry in mineral exploration.

Keywords: Remote sensing; Hydrothermal alteration; Google Earth Engine; Skarn; Geochemical validation: MTMF/SAM

Citación: Zafra, M., 2026. Reconocimiento de un sistema hidrotermal propilítico - skarn mediante teledetección y geoquímica para la prospectividad mineral en La Salina, Casanare, Colombia. Boletín Geológico, 53(1). <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.53.1.2026.761>

1. INTRODUCCIÓN

Colombia es un país con vastas áreas geológicamente inexploradas y otras tantas con escaso nivel de detalle en estudios previos. La actividad minera se ha concentrado históricamente en distritos con tradición extractiva, mientras que muchas zonas con potencial permanecen subestimadas debido a barreras topográficas, falta de infraestructura y complejidades socio territoriales. En este contexto, las metodologías de teledetección y los métodos de aprendizaje profundo se consolidan como herramientas para la exploración temprana de recursos minerales, gracias a su bajo costo relativo, cobertura amplia y capacidad para detectar indirectamente procesos geológicos y alteraciones superficiales asociadas a mineralizaciones (Hosseinjani y Honarmand, 2017).

Actualmente, los sensores multispectrales como ASTER y Sentinel-2 permiten una detección eficiente de firmas espectrales asociadas a minerales de alteración (arcillas, FIL, sílice), particularmente útiles en ambientes vulcano-sedimentarios (Kokaly, 2012). La Figura 1 representa un modelo típico de alteraciones hidrotermales epitermales, donde la zonación litogeoquímica puede identificarse a través de combinaciones espectrales específicas.

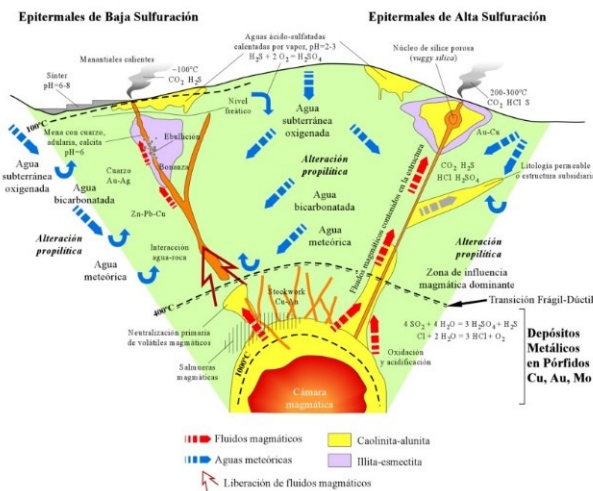


Figura 1 Modelo de alteraciones epitermales. Tomado de Camprubí *et al.*, 2003

Entre las técnicas más empleadas se destacan el Spectral Angle Mapper (SAM), que clasifica la similitud espectral entre píxeles y firmas de referencia mediante la medición del ángulo espectral, y el Mixture Tuned Matched Filtering (MTMF), una técnica de filtrado que combina la detección lineal (MF) con restricciones físicas basadas en la mezcla espectral. Este último

permite detectar objetivos a escala subpíxel con una mayor eficiencia frente al ruido, reduciendo falsos positivos (Khaleghi *et al.*, 2020). El algoritmo MTMF genera una imagen de coincidencia espectral (MF Score) y otra de inviabilidad, útil para discriminar anomalías falsas. Su aplicación junto a redes neuronales ha demostrado ser particularmente efectiva en ambientes tropicales, donde las condiciones atmosféricas y la vegetación limitan otras técnicas (Li *et al.*, 2023).

En paralelo, la combinación de bandas del rango VNIR y SWIR, especialmente con el sensor ASTER, permite discriminar unidades litológicas a partir de firmas como la absorción en 2,2 μm (filosilicatos) o el contraste entre bandas 4-6-8 (argilización intermedia y avanzada) (El-Desoky *et al.*, 2021).

El algoritmo SAM, por su parte, se basa en la similitud angular entre espectros normalizados, evaluando el ángulo α entre vectores espectrales. Su robustez frente a variaciones en la iluminación lo hace útil para comparar píxeles con espectros bibliográficos o firmas extraídas in situ. Un ángulo pequeño indica alta similitud espectral, lo que permite detectar zonas con firmas mineralógicas conocidas incluso bajo condiciones ambientales variables (Xi *et al.*, 2024).

Ecuación 1 Cálculo del algoritmo SAM

$$\alpha = \cos^{-1} \left| \frac{\sum_{i=1}^n e_1 e_2}{\{\sum_{i=1}^n e_1^2\}^{1/2} \{\sum_{i=1}^n e_2^2\}^{1/2}} \right|$$

Donde n es el número de bandas espectrales y e_1 y e_2 son los dos espectros que se están comparando. Un ángulo α pequeño indica elevada similitud entre los espectros, mientras que ángulos elevados indican baja similitud (García-Allende *et al.*, 2007).

Uno de los principales desafíos en zonas tropicales como Colombia es la cobertura vegetal densa, que puede ocultar o interferir con las firmas espectrales del sustrato geológico. Por esta razón, es indispensable la utilización de índices de vegetación como el NDVI, NDWI o SAVI para enmascarar áreas vegetadas y permitir una interpretación más precisa de los resultados. Estos índices, derivados de sensores ópticos, permiten además inferir condiciones ecológicas que pueden relacionarse indirectamente con procesos de alteración (Xue y Su, 2017).

Desde sus primeras aplicaciones (Rouse *et al.*, 1974), el índice NDVI se ha mantenido como una herramienta estándar por su sencillez, rango fijo (-1 a +1) y capacidad de correlacionarse con parámetros biofísicos como biomasa o cobertura. Nuevos enfoques híbridos han propuesto combinar índices espectrales con aprendizaje automático o análisis multivariado para mejorar la detección en entornos complejos (Hosseinjani *et al.*, 2025).

Adicionalmente, otros estudios como los de Ayoobi y Tangestani (2018) y Tavakolifar *et al.* (2023) destacan la importancia de detectar componentes espectrales parciales o subpíxel para identificar objetivos en mezclas espectrales complejas, donde la firma del mineral objetivo puede estar enmascarada por otros componentes. Esta capacidad es crucial para escenarios como alteraciones argílicas encajadas en matrices ferruginosas o arcillosas.

En este sentido, el uso integrado de métodos como SAM, MTMF e índices espectrales, combinado con validación geoquímica y análisis estadístico (componentes principales, clustering), representa una estrategia eficaz para priorizar blancos y ampliar el alcance de la exploración minera en Colombia.

El objetivo de este estudio es integrar herramientas de teledetección, análisis espectral en Google Earth Engine (GEE) y validación geoquímica mediante FRX portátil para mapear con precisión zonas de alteración hidrotermal en ambientes vulcano-sedimentarios. A partir del procesamiento de imágenes ASTER en GEE se aplican algoritmos avanzados (SAM, MTMF) y se calculan índices espectrales clave, cuya interpretación se contrasta con datos geoquímicos obtenidos en campo.

Esta metodología multitécnica busca identificar patrones espaciales consistentes y establecer la superposición, principalmente entre alteración propilítica y eventos metasomáticos tipo skarn, presentes en el área de La Salina, Casanare. Con ello, se pretende fortalecer la definición de blancos y optimizar los procesos de prospección mineral en regiones de complejidad geológica, mediante un enfoque replicable, de bajo costo relativo y alta capacidad predictiva.

1.1. Localización del área

El área escogida para el presente trabajo se encuentra localizada en el flanco E de la Cordillera Oriental, en el límite del departamento de Casanare y el departamento de Boyacá, en el municipio de La Salina (Figura 2).

La elección del municipio de La Salina, Casanare como área de estudio se fundamenta en la presencia de cuerpos ígneos alcalinos asociados a eventos geológicos de alto interés para la exploración mineral, los cuales no han sido completamente cartografiados en los mapas geológicos oficiales del país.

Esta condición sumada a la estructural sugiere un alto potencial para la concentración de elementos metálicos, en particular tierras raras y otros metales asociados a ambientes alcalinos. Además, el área cuenta con una disponibilidad de datos geoquímicos primarios obtenidos directamente por los autores, lo que permite integrar validación de campo con métodos de teledetección. La combinación de contexto geológico favorable, escasa exploración previa y respaldo de datos analíticos propios

convierte a La Salina en un laboratorio natural ideal para aplicar y contrastar diferentes metodologías de prospección mineral.

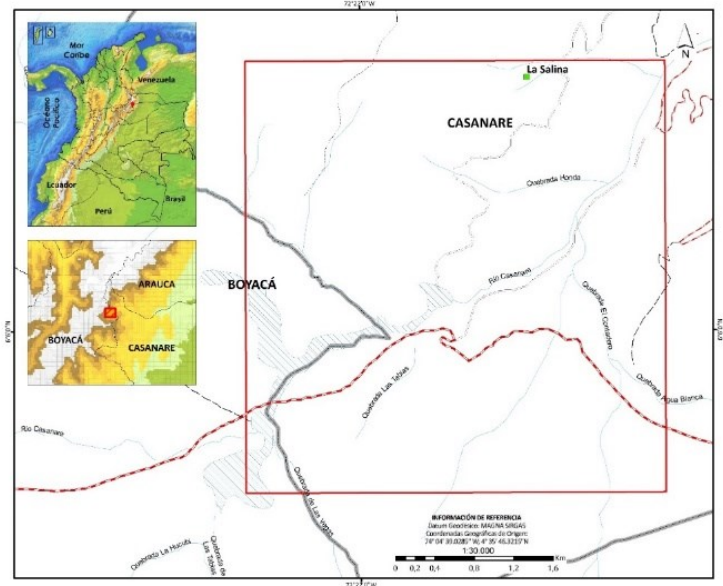


Figura 2 Localización del área de estudio.

2. MARCO GEOLÓGICO

Las rocas presentes en el área de estudio se limitan a la Formación Macanal y la Formación Las Juntas. Esta unidad fue descrita inicialmente por Ulloa y Rodríguez (2009), quienes propusieron el nombre Lutitas de Macanal para identificar una secuencia de lodolitas negras, micáceas, compactas con intercalaciones de areniscas cuarzosas, grises de grano fino y niveles de calizas. Está constituida por limolitas, limolitas carbonosas y arcillolitas de color gris oscuro, localmente con cemento calcáreo.

Presenta intercalaciones subordinadas de capas delgadas de arenitas de grano fino a muy fino. En algunos sectores es común la presencia de nódulos paralelos a la estratificación, pirita y mica en porcentaje menor al 5 %. En general, el buzamiento es inferior a 40°, con morfología suavemente ondulada en contraste con los escarpes altos de la Formación Areniscas de Las Juntas, que la suprayace. Según Etayo-Serna (1983) el espesor corresponde a 2935 m, pero en este sector estudiado, afloran menos de 1000 m de acuerdo con el corte geológico. La edad asignada es Titoniano a Valanginiano, de acuerdo con algunas amonitas que Bürgl (1973) colectó en el área del río Batá.

“Diana Gutiérrez colectó en la misma localidad una fauna que fue clasificada como del Berriasiano al Valanginiano. La Formación Macanal se depositó en un ambiente marino, de aguas

someras en una cuenca cerrada” (Ulloa y Rodríguez, 1976 en Ulloa y Rodríguez, 2009).

El área, se encuentra dentro de la denominada Cuenca Antepaís de los Llanos Orientales cuyas zonas limítrofes son: el borde Colombo-venezolano al norte, La Sierra de La Macarena y el Arco del Vaupés en el Sur, el Escudo de La Guayana al este y El Sistema de Fallas de Guaicáramo al oeste. En el interior de la cuenca se pueden distinguir dos zonas que difieren estructuralmente, la primera está comprendida por un área que topográficamente presenta un relieve quebrado denominado Piedemonte Llanero y una segunda zona de topografía casi plana, con relieve de llanura de gran extensión. El Piedemonte Llanero está controlado por un estilo estructural compresivo que da lugar a la formación de pliegues y fallas inversas de alto y bajo ángulo o de cabalgamiento, producto del evento de la Orogenia Andina (Montaña Cárdenas, 2015).

La reseña del Mapa Geológico preliminar de la plancha 153 – Chita INGEOMINAS (1984) hace la mención sobre las intrusiones en el área de estudio:

Rocas Ígneas: En la orilla derecha del río Casanare, a unos 2.5 km aguas arriba de La Salina, aflora un dique de microgabro que intruye la Formación Lutitas de Macanal. La roca está compuesta principalmente por hornblenda, plagioclasa (An65 %) y biotita. Además, debido a la actividad hidrotermal que acompañó la intrusión se observan minerales de alteración como epidota, clorita, tremolita, sericita, así como piritita. El análisis químico permite clasificar esta roca como un gabro alcalino. La edad K/Ar sobre roca total define una edad Aptiano/Albiano (ODIN, 1982), para la intrusión, mientras que las edades más recientes obtenidas sobre hornblenda y biotita significan probablemente que a actividad hidrotermal prosiguió después del momento de la intrusión. Este dique parece ser un testigo de la fase magmática que afectó durante el Cretáceo inferior las zonas más subsidentes

de la cuenca cretácea (FABRE y DELALOYE, 1983). Rodados de un microgabro similar se encontraron en el lecho del río Mundo Nuevo (SW de la Plancha 154, Hato Corozal)

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se realizó bajo una estructura que integra datos multiespectrales, procesamiento en plataformas en la nube y validación geoquímica para la delimitación de zonas de alteración hidrotermal. Se emplearon imágenes ASTER y Sentinel-2, herramientas de GEE y análisis espectral en ENVI® mediante firmas espectrales de la biblioteca del United States Geological Service (USGS), como se observa en la Figura 3.

Se realizó la elección de las imágenes ASTER Level-1T (L1T) correspondientes al área de estudio para un periodo anual. A través de GEE, se realiza una composición multitemporal usando la mediana espectral, lo que permite reducir el ruido radiométrico y minimizar interferencias atmosféricas o efectos de variabilidad estacional. Posteriormente, se aplica una máscara de nubes y sombras basada en bandas visibles e infrarrojas, junto con umbrales espectrales para eliminar píxeles contaminados. Esta etapa asegura una base espectral limpia sobre la cual construir los índices de alteración.

Se implementó el cálculo de múltiples índices espectrales derivados de las bandas VNIR/SWIR de ASTER, con sensibilidad a procesos de alteración hidrotermal. Los índices considerados son: el Índice de Alunita/Caolinita (banda 7 / banda 6), el FII (banda 5 / banda 2), el Índice de Sericita/Illita (banda 6 / banda 8) y el Índice de Humedad Mineral (NDMI), definido como $(\text{banda } 8 - \text{banda } 4) / (\text{banda } 8 + \text{banda } 4)$.

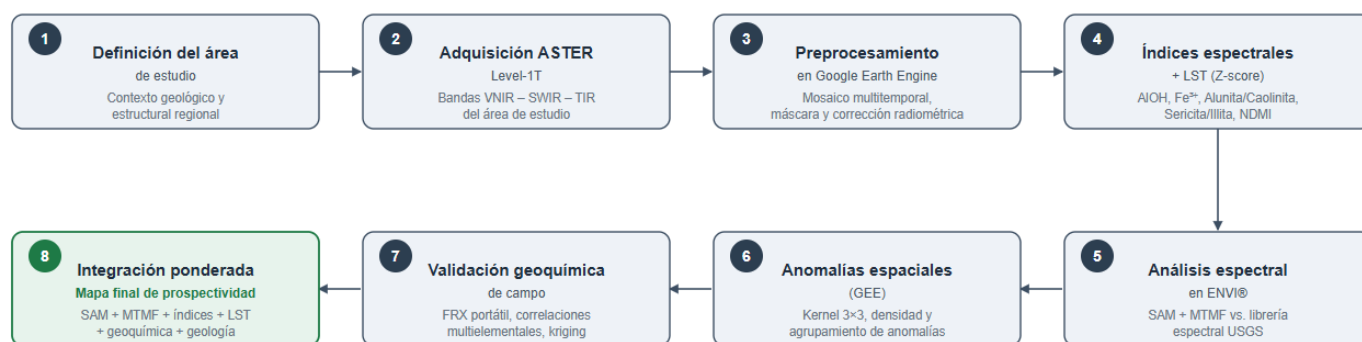


Figura 3 Flujo de trabajo utilizado

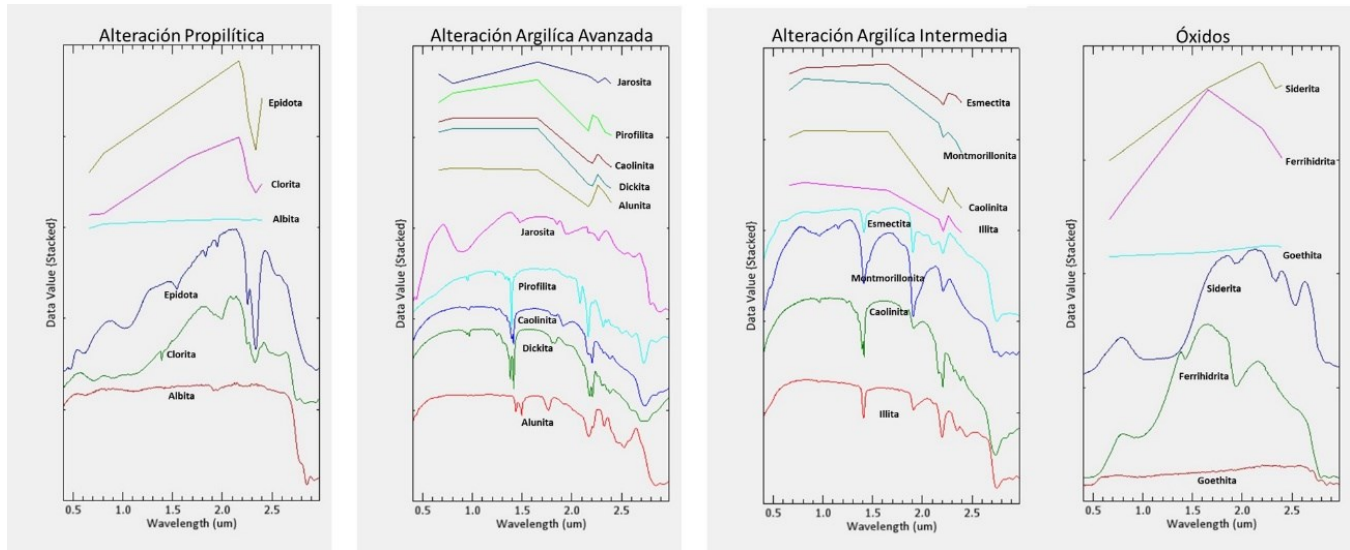


Figura 4 Firmas espectrales utilizadas (base y remuestreada).

Cada índice se estandariza posteriormente mediante normalización Z-score, lo que permite comparar capas con distintas escalas numéricas y facilita su integración en análisis posteriores.

Adicionalmente, se estima la Temperatura de Superficie Terrestre (LST) a partir de las bandas térmicas 10 a 14 de ASTER, aplicando modelos de conversión radiancia-temperatura de brillo (ecuación de Planck) y corrección de emisividad, con el fin de identificar anomalías térmicas asociadas a procesos de alteración hidrotermal activos o residuales. En la elaboración de este trabajo se han empleado índices vegetales para enmascarar la vegetación y la correcta construcción de las escenas utilizadas como insumos intermedios de procesamiento.

Una vez procesadas y exportadas las capas desde GEE, se continúa con el análisis espectral avanzado en ENVI®. Se utiliza el algoritmo SAM para identificar similitudes espectrales entre los píxeles de la imagen y firmas espectrales de minerales indicadores como caolinita, hematita, illita o sericita. En paralelo, se ejecuta el algoritmo MTMF, que permite detectar objetivos espectrales dominantes a nivel subpíxel, reduciendo la cantidad de falsos positivos mediante una imagen de inviabilidad espectral. Las respuestas más altas obtenidas con ambos métodos son consideradas anomalías espectrales y se seleccionan para análisis posterior.

Las librerías espectrales seleccionadas fueron las del USGS (Figura 4), de la que se escogieron: alunita, dickita, caolinita, pirofilita y jarosita para representar la alteración argilica avanzada; illita, caolinita, montmorillonita y esmeclita para la alteración argilica intermedia; albita, clorita y epidota para la

alteración propilítica; y goethita, ferrihidrita y siderita para la evaluación de óxidos férricos.

Esta biblioteca fue utilizada en ENVI® para la aplicación de los algoritmos SAM y MTMF debido a que proporciona firmas espectrales validadas en laboratorio bajo condiciones controladas, lo cual garantiza una comparación confiable con las respuestas espectrales obtenidas en las imágenes ASTER.

Posteriormente, se reimportan a GEE para su análisis espacial a través de filtros locales, empleando un kernel 3x3, se calculan densidades y conglomerados de anomalías, lo que permite definir áreas de mayor alteración. Estas zonas se comparan directamente con los datos geoquímicos disponibles obtenidos por los autores, evaluando la correspondencia espacial entre valores anómalos de elementos trazadores arsénico (As), estaño (Sb), plomo (Pb), estaño (Sn), y las firmas espectrales detectadas. La coincidencia espectral-geoquímica es cuantificada mediante mapas binarios y estadísticas de solapamiento, permitiendo una validación inicial de los resultados obtenidos por teledetección.

Finalmente, cada capa de información (SAM, MTMF, NDMI, LST, índices espectrales y geoquímica) se integró en un código Python mediante una ponderación temática basada en su capacidad predictiva (Jinru y Baofeng, 2017). Se asignaron pesos relativos de acuerdo con la relevancia de cada variable (ver Tabla 1) y posteriormente se aplicó una suma ponderada para generar un mapa de prospectividad mineral. Los valores más altos de la superficie integrada se interpretaron como zonas prioritarias para la exploración mineral.

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos se pueden evaluar desde diferentes perspectivas: su relación mineralógica con diferentes tipos de alteración mineral y desde el punto de la presencia de minerales y elementos en cada tipo de alteración evaluados en las secciones delgadas y muestras de mano. Para ello se analizaron los diferentes minerales agrupados de tal manera que sea posible valorar un potencial de mineralización, aunque la interpretación las secciones delgadas son consideradas clasificadas para Minería La Salina.

4.1. Alteración Argílica Avanzada

El análisis espacial de los índices minerales revela una clara tendencia en la distribución de caolinita, con una mayor concentración localizada en el sector noroeste (NW) del área de estudio. Este patrón se observa también para la alunita, que presenta acumulaciones significativas tanto en el NW como a lo largo del cauce del río Casanare, indicando posibles zonas de alteración hidrotermal asociadas en ambientes ácidos y oxidantes, típicamente por la acción de fluidos hidrotermales ricos en ácido sulfúrico. Estos ambientes se generan por la oxidación de gases volcánicos ricos en SO_2 y H_2S al interactuar con agua meteórica o magmática condensada (White y Hedenquist, 1995).

Por otro lado, el resultado del algoritmo SAM aplicado a la alteración argílica avanzada muestra una distribución más dispersa de las anomalías, lo que puede atribuirse a las variaciones de pH en el entorno geológico. Sin embargo, a pesar de esta dispersión, se destaca una mayor concentración de puntos anómalos en el sector NW, coincidiendo con las zonas de mayor presencia de caolinita y alunita (Figura 5).

4.2. Alteración Argílica Intermedia

El análisis espacial de la alteración indica un comportamiento anómalo en la distribución de montmorillonita y caolinita, con claras zonas de mayor concentración a lo largo del río Casanare, especialmente en la zona sur y en el sector noroeste (NW) del área de estudio. Esta acumulación coincide con áreas donde la alteración hidrotermal es más intensa y donde se han identificado brechas hidrotermales en el túnel exploratorio realizado por Minera La Salina.

El análisis espacial muestra que, en la zona sur, próxima al cauce del río Casanare, los valores de montmorillonita y caolinita alcanzan sus máximos, sugiriendo procesos de alteración argílica avanzada asociados a la dinámica hidrotermal local. En el sector NW, la concentración de estos minerales también es elevada, lo que refuerza la interpretación de un ambiente favorable para la mineralización.

En las zonas periféricas, la presencia de montmorillonita y caolinita es más tenue, indicando que la alteración afecta principalmente a las áreas cercanas al río Casanare mostrando una silicificación fuerte a moderada regional. Sin embargo, se identifican dos zonas específicas con anomalías intensas, contiguas a las brechas hidrotermales, donde la alteración es particularmente marcada (véase Figura 6).

Este patrón sugiere que la migración de fluidos hidrotermales ha favorecido la formación de montmorillonita y caolinita en estos sectores, superponiéndose sobre los componentes originales de las rocas y modificando su mineralogía de manera significativa. La coincidencia de estas anomalías con los principales corredores estructurales y zonas de silicificación muestra la importancia de estos sectores como áreas prioritarias para la exploración mineral.

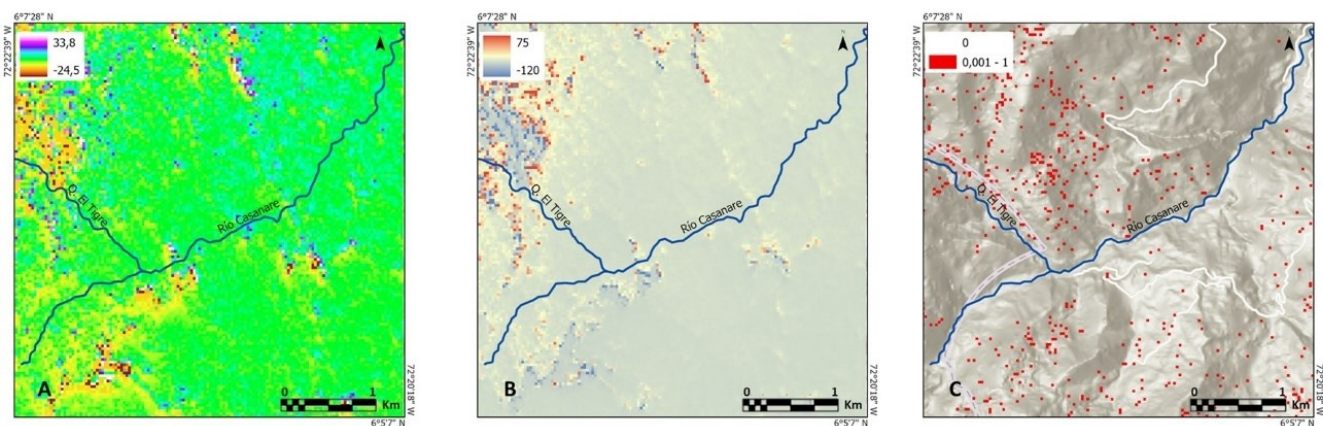


Figura 5 Resultados de alteración argílica avanzada. A. Distribución espacial de alunita identificada mediante análisis espectral; B. Índice espectral de arcillas; C. Resultado promedio de los algoritmos SAM y MTMF aplicados a bandas SWIR. En los tres casos, se observa una alta coincidencia espacial en las zonas de mayor respuesta espectral, concentradas principalmente en el sector sur y este del área, especialmente a lo largo de la Quebrada El Tigre y el río Casanare, posiblemente asociada a procesos hidrotermales intensos.

4.3. Alteración Propilitica y Evidencias en el Sector NE del Río Casanare

La propilitización es una alteración hidrotermal caracterizada por la escasa lixiviación de álcalis y alcalinotérreos, con incorporación de agua, dióxido de carbono y azufre a la roca huésped. Como resultado, se forman minerales como albita, calcita y pirita, reflejando un bajo grado de hidrólisis. Este tipo de alteración suele ubicarse en zonas marginales de los sistemas alterados, favorecida por soluciones de pH neutro a alcalino y temperaturas menores a 300 °C (Sillitoe, 2010).

Se registran valores altos del índice espectral de arcillas, lo que indica una mayor presencia de minerales arcillosos típicos de la alteración propilitica, como clorita, epidota y, en menor medida, calcita. Estos valores sugieren que la propilitización es significativa en esta zona, probablemente relacionada con la

circulación de fluidos hidrotermales a bajas temperaturas y pH neutro-alkalino (Thompson *et al.*, 1999).

El análisis SAM indica respuestas moderadas a altas para firmas espectrales asociadas a minerales propiliticos, especialmente en áreas donde el índice espectral de arcillas es elevado. Esto respalda la interpretación de que la alteración propilitica está bien desarrollada en el sector NE, con una distribución relativamente continua a lo largo de los márgenes del sistema hidrotermal.

El algoritmo MTMF identifica objetivos espectrales dominantes compatibles con minerales de alteración propilitica, aunque con menor intensidad que en zonas de alteración argílica o filica obtenida. Sin embargo, en el sector NE se observan anomalías localizadas de alta respuesta espectral, coincidiendo espacialmente con los máximos del índice espectral de arcillas y las áreas de mayor respuesta con SAM (Figura 7).

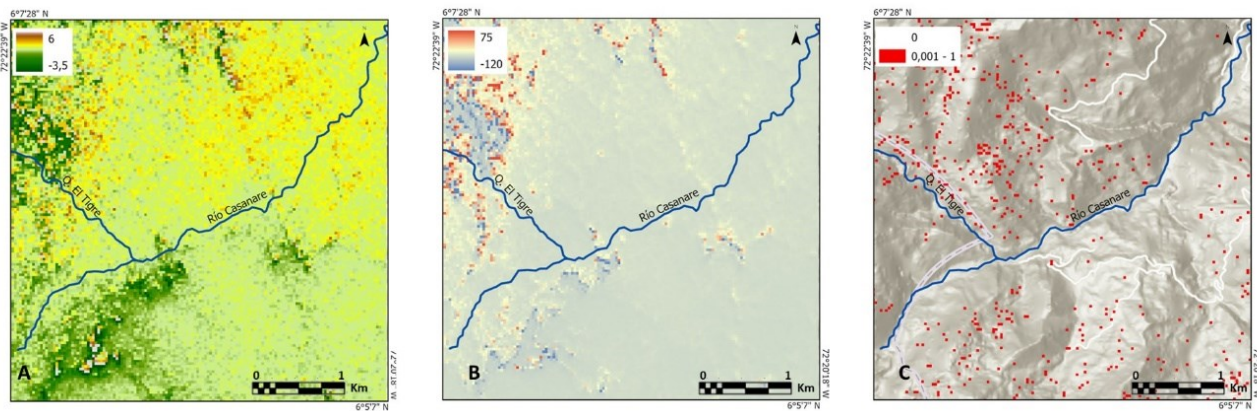


Figura 6 Resultados de detección espectral de alteración argílica intermedia en el área de estudio. A. Distribución de montmorillonita estimada mediante descomposición espectral; B. Concentración relativa de caolinita a partir de análisis de firmas espectrales SWIR; C) Composición promedio de alteración argílica intermedia obtenida mediante la integración de algoritmos SAM y MTMF. Los tres productos muestran patrones espaciales consistentes, con anomalías destacadas en el sector suroriental, particularmente a lo largo de la Quebrada El Tigre y márgenes del río Casanare, posiblemente vinculado a zonas de flujo hidrotermal.

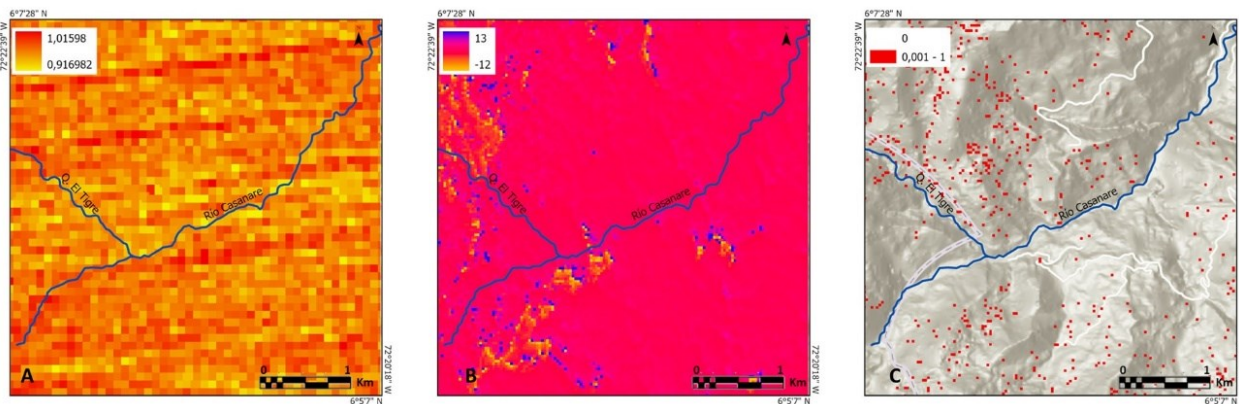


Figura 7 Resultados espectrales asociados a alteración propilitica en el área de estudio. A. Anomalías espectrales de cuarzo identificadas a partir de firmas diagnósticas en el rango VNIR-SWIR; B. Distribución de minerales arcillosos compatibles con fases propiliticas. C. Composición promedio de alteración propilitica derivada de los algoritmos SAM y MTMF. Las distribuciones obtenidas están posiblemente asociadas a halos periféricos de sistemas hidrotermales más intensos.

La presencia de fuchcita, una moscovita rica en cromo (Cr), es característica de ambientes hidrotermales donde fluidos interactúan con rocas ultramáficas o básicas, incorporando Cr^{3+} a la estructura del mineral (Souza-Neto *et al.*, 2023).

Moritz *et al.* (2021) explican que la presencia de fuchcita, una moscovita rica en cromo es característica de ambientes hidrotermales donde los fluidos interactúan con rocas ultramáficas o básicas, incorporando Cr^{3+} a la estructura del mineral. De forma adicional Zajacz *et al.* (2008) abordan el comportamiento del cromo en sistemas hidrotermales, explicando cómo su presencia en minerales como la fuchcita refleja interacciones entre fluidos hidrotermales y rocas máficas/ultramáficas. Se observa en las diferentes muestras de mano (Figura 8), una fuerte cloritización posiblemente como alteración de minerales ferromagnesianos originales como hornblenda, la presencia de carbonatos tendría en esencia dos factores principales la alteración de plagioclasas y la fuerte presencia de hidrotermalismo calco alcalino en la zona de estudio. La presencia de fuchcita es un marcador de alteración hidrotermal, especialmente en zonas donde los fluidos ricos en cromo han interactuado con rocas ultramáficas o básicas.

4.4. Relación entre el Índice de Hierro Férrico (FII) y la Temperatura superficial (LST)

Abdolmaleki *et al.* (2020) señalaron que la integración del FII con la temperatura superficial terrestre (LST) permite identificar zonas de alteración hidrotermal favorables para la exploración de depósitos tipo IOCG. En este enfoque, la relación espacial entre ambos parámetros constituye un criterio útil para delimitar áreas objetivo, ya que el índice refleja la distribución de minerales portadores de Fe^{3+} , como hematita y goethita, cuyas propiedades espectrales y térmicas difieren de las de las rocas circundantes.

Valores altos del FII suelen indicar zonas con mayor abundancia de minerales ricos en Fe^{3+} , donde la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro (III), como hematita (Fe_2O_3) y goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), es significativa. Estas zonas pueden estar asociadas a procesos de alteración hidrotermal y oxidación vinculados a la circulación de fluidos ricos en hierro (Figura 9). Halley *et al.* (2015) señalan que los minerales férricos, especialmente hematita y goethita, son comunes en zonas de alteración filica y propilitica oxidadas, y pueden representar remanentes de sulfuros oxidados o precipitados formados bajo condiciones de flujo de fluidos oxidantes.

Jiang *et al.* (2021), demostraron que la variación espectral y térmica registrada por sensores hiperspectrales revela que las áreas con mayores contenidos de óxidos de hierro presentan menor absorción térmica y mayor reflectancia, traducéndose en temperaturas superficiales más bajas en comparación con suelos

de composición distinta. Los autores también resaltan que la presencia de ciertos minerales de alteración puede modificar el balance energético superficial y la dinámica térmica diaria, afectando tanto el calentamiento durante el día como el enfriamiento nocturno. Su aplicación ayuda a identificar áreas con potencial por procesos redox que involucran hierro y agua, y propone a la LST como herramienta estratégica de primera aproximación en campañas integrales de prospección en otros campos como el hidrógeno natural.

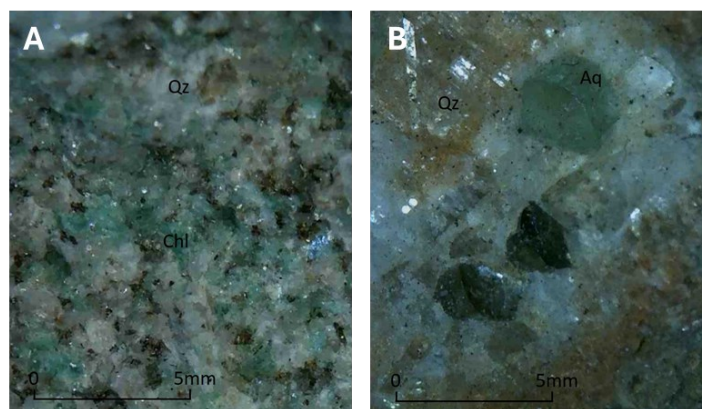


Figura 8 Muestra de mano de la zona con fuerte cloritización con alto contenido de Cr (fuchcita (Chl)) y cuarzo (Qz). Localización: confluencia río Casanare – Quebrada El Tigre. B. Muestra de mano de alteración propilitica con cuarzo (Qz), aguamarina (Aq) y carbonatos. Localización: túnel exploratorio, río Casanare

4.5. Análisis geoquímico

Se realizaron análisis elementales para 33 muestras recolectadas a lo largo del río Casanare durante una campaña de exploración geoquímica (Figura 10), mediante el equipo de FRX Niton® para la campaña de exploración de para depósitos hidrotermales en una parte del área estudiada. De la estadística descriptiva se obtuvo:

- Plata (Ag), Antimonio (Sb), Cadmio (Cd), Hierro (Fe), Azufre (S) y Titanio (Ti) muestran una alta dispersión en los datos (desviaciones estándar elevadas), lo que sugiere la presencia de valores atípicos o zonas con enriquecimiento geoquímico significativo.
- Bismuto (Bi), Plomo (Pb) y Zinc (Zn) presentan menor variabilidad relativa, indicando una distribución más homogénea en las muestras.

Se realizaron los análisis de dispersión y correlación para todas las concentraciones de elementos analizados por FRX, de los cuales se eligieron aquellos cuyas anomalías fueron determinadas.

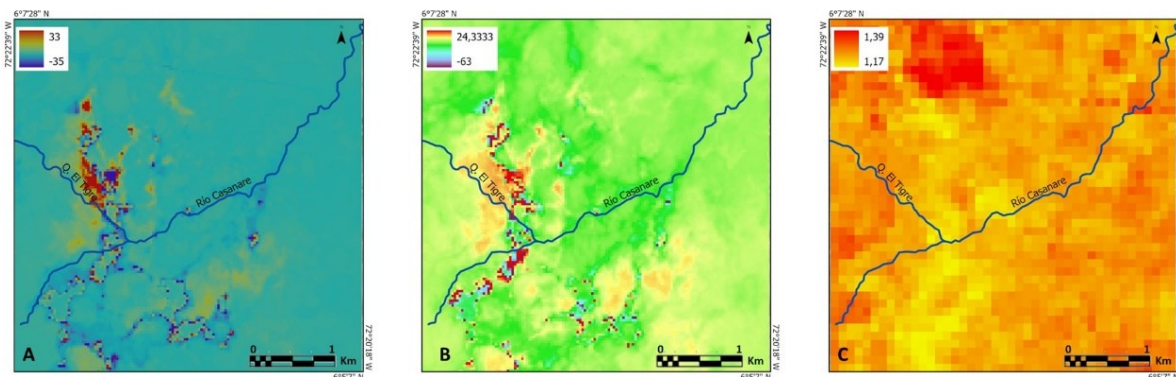


Figura 9 Indicadores espectrales de alteración férrica y temperatura superficial (LST) en el área de estudio. A. Distribución espacial de hematita identificada mediante firmas espectrales en el rango VNIR–SWIR, con fuerte concentración en la zona de la Quebrada El Tigre, lo que sugiere procesos de oxidación intensa; B. Índice espectral de hierro férrico (Fe^{3+}), superpone la alteración férrica y hematita y se muestra en el extremo suroccidental (SW); C. Temperatura superficial terrestre (LST) a partir de bandas térmicas ASTER con un patrón inverso, valores más altos en el norte y noreste del área, asociados a presencia de aguas termales salobres.

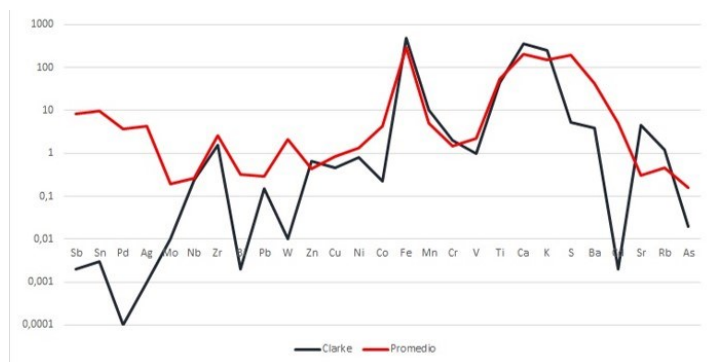


Figura 10 Análisis comparativo entre el Clarke y los resultados promedio obtenidos del análisis químico multielemental a las muestras recolectadas en campo.

Los valores anómalos de antimonio (Sb), estaño (Sn), bismuto (Bi) y otros elementos traza, cuando son significativamente mayores que el valor Clarke, pueden estar relacionados con mineralizaciones polimetálicas ligadas a sistemas hidrotermales. En la Figura 10 se observa que las concentraciones promedio de antimonio (Sb), estaño (Sn), paladio (Pd), plata (Ag), molibdeno (Mo), niobio (Nb), plomo (Pb), wolframio (W), cobre (Cu), níquel (Ni), cobalto (Co), titanio (Ti), potasio (K), azufre (S), bario (Ba) y arsénico (As) superan sus respectivos valores Clarke, mientras que hierro (Fe), manganeso (Mn), cromo (Cr), vanadio (V), calcio (Ca), estroncio (Sr) y rubidio (Rb) presentan concentraciones cercanas o inferiores a dichos valores de referencia.

El enriquecimiento relativo de varios elementos trazadores, en conjunto con las evidencias de alteración hidrotermal identificadas mediante teledetección y durante el trabajo de campo, la presencia de manifestaciones hidrotermales superficiales asociadas a las aguas salinas del área y el contexto geológico local respaldan la interpretación de un sistema

hidrotermal con potencial para albergar mineralización polimetálica.

Ning *et al.* (2025) utilizaron interpolación por kriging para evaluar la distribución espacial de estos elementos y se complementó con análisis espectral por técnicas como MTMF, permitiendo mejorar la interpretación de zonas con potencial económico. En concordancia, se realizó un análisis por medio de interpolación por Kriging, previa evaluación del error medio cuadrático y comparando los resultados del filtrado MTMF de las diferentes anomalías (Figura 11).

4.6 Ponderación y Resultados del Mapa de Probabilidad de Anomalía. La aplicación de una matriz de ponderación a los índices minerales permitió construir un mapa de probabilidad de anomalía geoquímica, facilitando la identificación de zonas prioritarias para la exploración.

Se asignaron valores de relevancia a cada índice mineral, de acuerdo con su asociación con mineralización

:

Tabla 1 Valores de ponderación utilizados y su justificación.

Índice / Mineral	Ponderación	Justificación / Asociación con la alteración
Alunita	3	Indicador de alteración argílica avanzada, frecuente en sistemas epitermales de alta sulfuración. Su presencia refleja fluidos ácidos y procesos intensos de lixiviación.
Calcita	1	Mineral característico de alteración propilítica y carbonatización. Se forma en medios de pH neutro a ligeramente alcalino y generalmente corresponde a zonas distales o tardías del sistema hidrotermal.
Carbonato	1	Indica ambientes de alteración desarrollados bajo condiciones de pH neutro a alcalino, asociados con procesos de carbonatización y halos periféricos de sistemas hidrotermales.
Arcilla	2	Indicadora de alteración argílica intermedia; suele desarrollarse en zonas transicionales con relevancia moderada para la exploración mineral.
Hematita	2	Óxido de hierro (III) (Fe_2O_3) asociado a procesos de oxidación de sulfuros y al desarrollo de zonas de alteración hidrotermal oxidadas.
FII	2	Índice sensible a minerales con hierro férrico (Fe^{3+}), principalmente hematita y goethita, útil para identificar halos de oxidación hidrotermal.
Kaolinita	2	Indicadora de alteración argílica avanzada y de ambientes de lixiviación asociados con sistemas hidrotermales.
Mafic Index	1	Permite reconocer unidades máficas que pueden ejercer control litológico o estructural sobre la circulación de fluidos hidrotermales.
Montmorillonite Index	2	Asociado con minerales de alteración argílica que suelen desarrollarse en halos periféricos de sistemas hidrotermales.
Quartz Index	4	La silicificación constituye uno de los indicadores más importantes de circulación de fluidos hidrotermales y de mineralización en vetas y stockworks.
Temperatura LST	1	Variable auxiliar para reconocer anomalías térmicas superficiales potencialmente relacionadas con actividad hidrotermal; requiere su integración con evidencia espectral y geoquímica para su interpretación.

El esquema de ponderación prioriza la silicificación (cuarzo) y la alteración ácida avanzada (alunita), seguidas por los minerales de alteración intermedia (arcillas, hematita, óxidos de hierro, caolinita), y finalmente por los indicadores de zonas periféricas o de menor relevancia directa para el oro (carbonato, calcita, mafic index, LST).

Al integrar estos índices ponderados, el mapa de anomalía geoquímica evidencia un sector de alta probabilidad en el W, particularmente a lo largo de la quebrada El Tigre, y un sector con valores elevados en el SW, posiblemente relacionado con la Falla del río Casanare, interpretada como una estructura de gran magnitud, profunda y probablemente enraizada en la corteza. La coincidencia espacial de estas anomalías puede relacionarse con

la presencia de cuerpos ígneos básicos a ultrabásicos, cuyo emplazamiento habría estado favorecido por dicha estructura profunda, permitiendo la circulación de fluidos hidrotermales y el desarrollo de zonas de alteración propicias para la mineralización. En este sentido, la Falla del río Casanare constituiría muy posiblemente el principal control estructural de las alteraciones identificadas, actuando junto con la quebrada El Tigre como corredores para la migración de los fluidos mineralizantes.

Este patrón es consistente con lo reportado en la región de Pajarito, Boyacá, donde se han identificado cuerpos ígneos máficos intrusivos en secuencias sedimentarias cretácicas, con evidencias de alteración hidrotermal producto de interacciones

con fluidos a baja temperatura y condiciones variables de pH (Moreno-Murillo *et al.*, 2007; González-Preciado *et al.*, 2021). Ambos trabajos coinciden en señalar múltiples fases de alteración y una evolución magmática compatible con un entorno extensional durante el Cretácico, en el cual se reconocen dos asociaciones paragenéticas principales:

- Sericita – Pírita – Calcita: asociada a condiciones de pH neutro a ligeramente ácido, vinculada a alteración sericitica/filica.
- Calcita – Clorita – Epidota – Actinolita: asociada a condiciones de pH neutro a básico, propia de la alteración propilítica.

Finalmente, mediante una rutina desarrollada en Python se obtuvieron las zonas de probabilidad de mineralización. Las zonas de probabilidad muy alta se localizan puntualmente en el sector sur de la quebrada El Tigre y en el margen meridional del río Casanare, en cercanía y sobre el costado sur de una falla regional interpretada como posible vía de ascenso de fluidos

mineralizantes. Estas áreas coinciden con la confluencia de firmas espectrales de alteración argílica avanzada, alteración propilítica y evidencias férricas, lo que resalta su potencial como blancos prioritarios.

Dichas asociaciones serían resultado de la circulación de soluciones hidrotermales a través de los cuerpos ígneos, generando texturas de reemplazamiento y enriquecimiento local de elementos metálicos (véase Figura 12).

5. DISCUSIÓN

La consistencia encontrada de valores elevados del índice espectral de arcillas con respuestas positivas en los análisis SAM y MTMF en el sector noreste del río Casanare sugiere zonas de alteración propilítica bien desarrolladas. Estas áreas, si bien marginales con respecto a los puntos de alteración más intensos, constituyen ambientes favorables para la precipitación de minerales secundarios y pueden indicar los límites externos de un sistema hidrotermal.

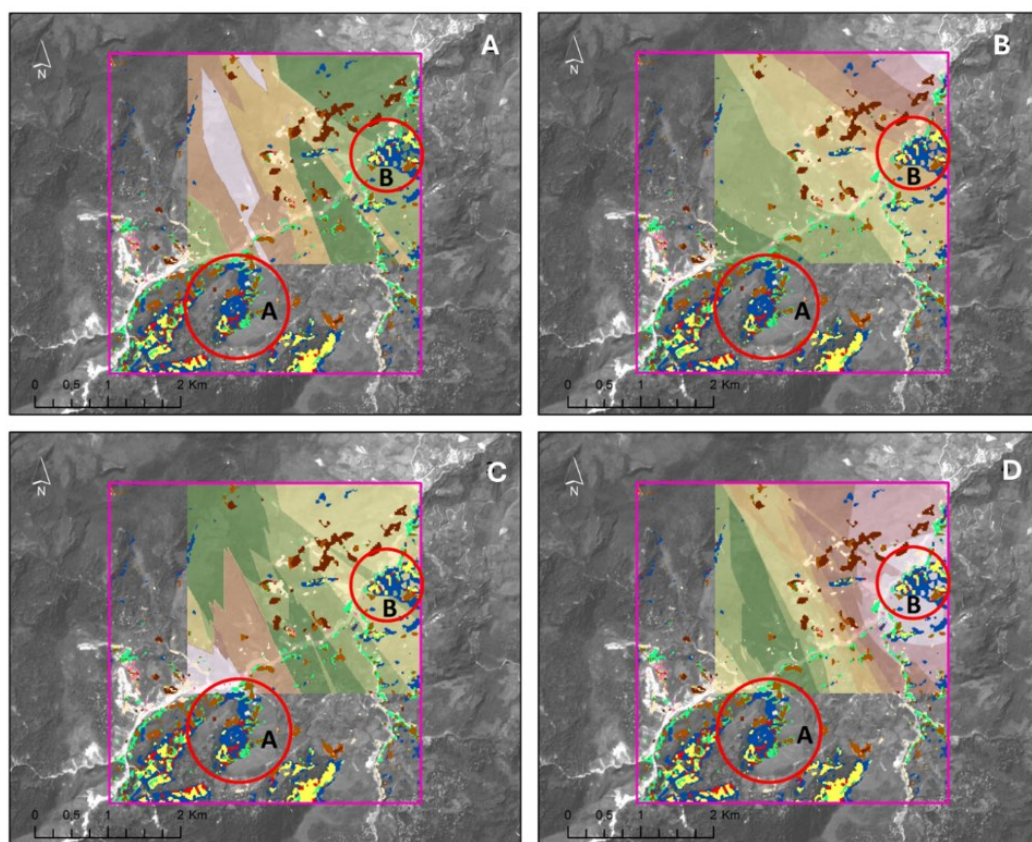


Figura 11 Resultados de las interpolaciones por método Kriging para Ag (1), Cu (2), Pb (3) y Zn (4), en las que se observa para todas las figuras un incremento anómalo de concentración en los sectores A y B, correspondientes a la mayor presencia de alteración hidrotermal, identificado por filtrado MTMF e índice de bandas.

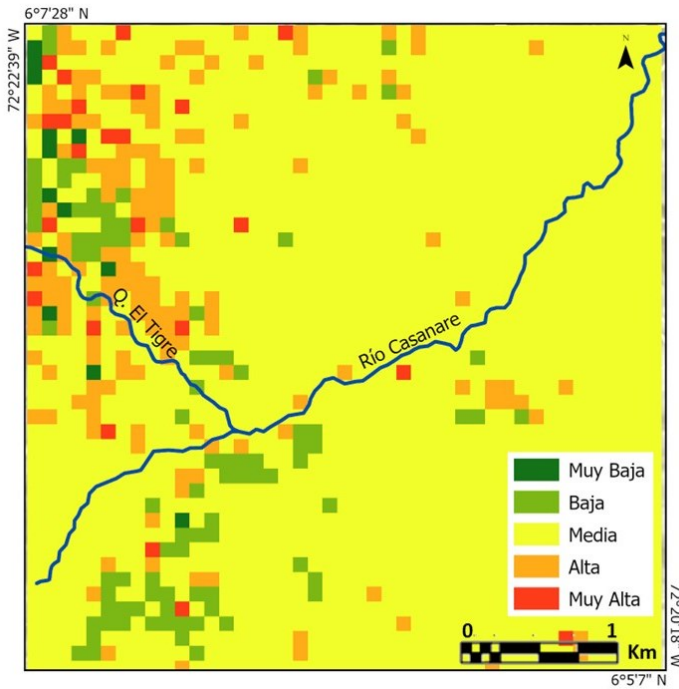


Figura 12 Mapa de probabilidad de mineralización obtenido mediante superposición ponderada de indicadores espectrales de alteración hidrotermal

Como se observa, las zonas de probabilidad alta se extienden a lo largo de la Quebrada El Tigre, indicando continuidad lateral del sistema hidrotermal a lo largo de la Falla del río Casanare, y controlado por estructuras subsidiarias en la Quebrada El Tigre. En contraste, las áreas con probabilidad baja se asocian a sectores distales con baja dispersión de las firmas espectrales.

De acuerdo con Townley (2001), la alteración propilitica se manifiesta típicamente como halos gradacionales, donde se observa una transición desde asociaciones dominadas por epidota, clorita, albita y carbonatos, hacia zonas con mayor contenido de clorita y zeolitas hidratadas. Este patrón es coherente con la propilitización observada en el contexto volcánico-sedimentario de la zona, caracterizada por la presencia de clorita, epidota, carbonatos y albita, asociados a fluidos hidrotermales. No obstante, los resultados geoquímicos muestran una firma composicional más compleja, que apunta a una superposición de alteraciones:

La alta concentración de estaño (Sn), antimonio (Sb), plata (Ag), zinc (Zn) y paladio (Pd), junto con las correlaciones significativas entre estaño (Sn) y antimonio (Sb) ($p > 0,8$), así como entre plata (Ag), zinc (Zn) y cobre (Cu), indica la posible presencia de un sistema tipo skarn o de un entorno polimetálico epitermal de sulfuración intermedia, en el que la interacción entre

fluidos magmáticos mineralizantes y rocas carbonatadas encajantes constituye un factor determinante en la concentración y zonación de metales (Liu *et al.*, 2021; Quan *et al.*, 2021).

La presencia de berilo, representado por las variedades aguamarina y esmeralda, observadas en el túnel exploratorio, junto con la evidencia de interacción hidrotermal con rocas carbonatadas, sugiere un sistema hidrotermal complejo, posiblemente asociado a procesos metasomáticos de alta temperatura. La circulación de fluidos hidrotermales salinos, enriquecidos en especies cloruradas disueltas, constituye un mecanismo eficiente para el transporte de metales y favorece la interacción fluido-roca, la alteración metasomática y la precipitación de minerales en respuesta a cambios de temperatura, presión y composición química del fluido.

Los elementos mayoritarios como hierro (Fe), calcio (Ca) y potasio (K) muestran baja variabilidad ($CV < 20 \%$), lo que sugiere un fuerte control litológico, particularmente relacionado con la lutita encajante. No obstante, su abundancia, en conjunto con la evidencia mineralógica y espectral, es consistente con la presencia de alteración propilitica.

El análisis multielemental permitió reconocer dos dominios geoquímicos principales:

- Dominio propilitico marginal, caracterizado por la asociación de minerales de alteración como arcillas, carbonatos y clorita, en concordancia con respuestas espectrales positivas obtenidas mediante los algoritmos SAM y MTMF.
- Dominio con afinidad tipo skarn, caracterizado por el enriquecimiento relativo en estaño (Sn), antimonio (Sb), plata (Ag) y zinc (Zn), así como por correlaciones geoquímicas significativas entre estos elementos. En conjunto con la interacción hidrotermal reconocida en las unidades carbonatadas de la Formación Macanal, estas evidencias son compatibles con procesos metasomáticos asociados a sistemas tipo skarn.
- Tres muestras concentran más del 50 % de la variabilidad de estaño (Sn) y antimonio (Sb), identificando zonas puntuales de enriquecimiento geoquímico que podrían estar relacionadas con vetillas mineralizadas observadas en el túnel exploratorio.

La integración de la información geoquímica, espectral y geológica indica que el modelo de alteración más compatible corresponde a una alteración propilitica de distribución regional, sobre la cual se superpone un dominio hidrotermal con afinidad tipo skarn, controlado por factores litológicos y estructurales. La propilitización se manifiesta de forma periférica y relativamente

extensa, mientras que las evidencias compatibles con alteración tipo skarn se restringen a sectores localizados, espacialmente asociados con unidades carbonatadas de la Formación Macanal y con probables cuerpos gabroideos, donde la interacción entre fluidos hidrotermales y la roca encajante habría favorecido el desarrollo de procesos metasomáticos.

El enfoque combinado utilizado con los datos geoquímicos y estructurales permite discriminar dominios alterados y construir un modelo de prospectividad más ajustado. Este procedimiento ha permitido delimitar blancos exploratorios que integran evidencia espectral, geoquímica multielemental y mineralogía indicadora, lo cual valida el uso de sensores remotos y análisis multivariado como herramientas clave en la exploración de sistemas hidrotermales en zonas de complejidad geológica como la estudiada.

Existe una estructura permeable regional (Falla del río Casanare) que permite el ascenso y el flujo sostenido de fluidos calientes desde niveles profundos hacia la superficie, un gradiente térmico que permanece elevado por la proximidad de una fuente de calor (actividad ígnea subyacente) además de condiciones estructurales locales y termoquímicas que permiten que los fluidos no se dispersen de forma difusa, sino que se canalicen en zonas restringidas donde la alteración es intensa y localizada (Zajacz *et al.*, 2008). Este patrón respalda la hipótesis de un sistema focalizado de alteración relacionado con estructuras profundas activas y gradientes térmicos aún preservados.

La ausencia de muestreo en la Quebrada El Tigre limita la representación geoquímica en ese sector, a pesar de que los análisis espectrales y los mapas de alteración indican allí zonas con alta probabilidad de mineralización. Esta restricción sugiere la necesidad de ampliar la cobertura muestral en futuras campañas, con el fin de evaluar la continuidad y posible correlación geoquímica entre ambos drenajes.

6. CONCLUSIONES

La integración de datos espectrales obtenidos por sensores remotos, junto con validación geoquímica en campo, muestra efectividad en la determinación de zonas anómalas de alteración. La metodología multitécnica permitió discriminar dominios alterados y construir un modelo de prospectividad mineral en un entorno geológico complejo. Las respuestas obtenidas de las firmas espectrales, índices de alteración y datos multielementales validan el uso de teledetección en la exploración de sistemas vulcano - sedimentarios.

El estudio revela una clara zonación espacial de alteraciones

hidrotermales, identificando la presencia dominante de alteración argílica avanzada en el sector noroeste y una propilitización significativa en el noreste del área de estudio. Los algoritmos SAM y MTMF, combinados con índices espectrales específicos (como el índice espectral de arcillas y FII), permitieron mapear la variabilidad mineralógica y asociar estos patrones con rutas de migración de fluidos y controles estructurales. La propilitización se expresa localmente asociada a fracturas, mientras que la superposición de firmas tipo skarn aporta evidencia de procesos piro-metasomáticos y enriquecimiento polimetálico. La metodología adoptada permite discriminar ambientes favorables para distintos estilos de mineralización asociados a posibles intrusivos gabroideos.

La aplicación de una matriz de ponderación temática a los distintos índices minerales resultó clave para construir mapas de probabilidad de anomalía mineralógica y geoquímica. Al priorizar la silicificación y la alteración argílica avanzada, representadas por alunita y caolinita, seguidas de indicadores de alteración intermedia y periférica, el modelo ponderado reprodujo adecuadamente la distribución de las anomalías identificadas en campo. Las zonas prioritarias localizadas al oeste y suroeste de la quebrada El Tigre muestran una alta correspondencia entre concentraciones elevadas de antimonio (Sb), estaño (Sn), paladio (Pd), plata (Ag), bismuto (Bi), wolframio (W) y calcio (Ca), y la presencia de firmas espectrales de alteración hidrotermal.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS

El autor declara que el artículo no presenta conflicto de intereses.

RECONOCIMIENTOS

El autor expresa su más sincero agradecimiento a minería La Salina por facilitar los datos geoquímicos, apoyo y confianza, a Minerab Ltda por la elaboración de las secciones delgadas y muy especialmente a los geólogos Alejandro Pinilla y Andrés Rodríguez por sus comentarios y contribución técnica.

REFERENCIAS

- Abdolmaleki, M., Rasmussen, T.M., y Pal, M.K. (2020). Exploration of IOCG mineralizations using integration of space-borne remote sensing data with airborne geophysical data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B3-2020, 9–16. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-9-2020>

- Ayoobi, I. y Tangestani, M. (2018). Evaluation of subpixel unmixing algorithms in mapping the porphyry copper alterations using EO-1 Hyperion data: A case study from SE Iran. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 10, 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.03.009>
- Bürgl, H. (1973). Precambrian to middle Cretaceous stratigraphy of Colombia (p. 214) INGEOMINAS, Bogotá.
- Camprubí, A., González-Partida, E., Levresse, G., Tritlla, J., y Carrillo-Chávez, A. (2003). Depósitos epitermales de alta y baja sulfuración: Una tabla comparativa. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 56(1), 10–18. <https://doi.org/10.18268/BSGM2003v56n1a2>
- El-Desoky, H. M., Soliman, N., Heikal, M. A., y Abdel-Rahman, A. M. (2021). Mapping hydrothermal alteration zones using ASTER images in the Arabian–Nubian Shield: A case study of the northwestern Allaqi District, South Eastern Desert, Egypt. *Journal of Asian Earth Sciences*: X, 5, 100060. <https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2021.100060>
- Etayo-Serna, F. (1983). Mapa de terrenos geológicos de Colombia (Publicación Geológica Especial No. 14, 235p.). Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras – INGEOMINAS
- García-Allende, P. B., Conde, O. M., Cubillas, A. M., Jáuregui, C., y López-Higuera, J. M. (2007). New raw material discrimination system based on a spatial optical spectroscopy technique. *Sensors and Actuators A: Physical*, 135(2), 605–612. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2006.08.024>
- González-Preciado, A. J., Durán-González, S., y Mariño-Martínez, J. E. (2021). Evidencias de procesos de alteración hidrotermal en cuerpos ígneos del municipio de Pajarito, flanco este de la cordillera Oriental (Colombia). *Boletín de Geología*, 43(3), 87–105.
- Halley, S., Dilles, J. H., y Tosdal, R. M. (2015). Footprints: Hydrothermal alteration and geochemical dispersion around porphyry copper deposits. *SEG Discovery*, 100, 1–17. <https://doi.org/10.5382/SEGnews.2015-100.fea>
- Hoseinzade, Z., Shojaei, M., Khademi, F., Mokhtari, A. R., y Saremi, M. (2025). Integration of deep learning models for mineral prospectivity mapping: A novel Bayesian index approach to reducing uncertainty in exploration. *Modeling Earth Systems and Environment*, 11. <https://doi.org/10.1007/s40808-025-02342-x>
- Hosseinjani, M. y Honarmand, M. (2017). A remote sensing-based discrimination of high- and low-potential mineralization for porphyry copper deposits; a case study from Dehaj–Sarduiyeh copper belt, SE Iran. *European Journal of Remote Sensing*, 50(1), 332–342. <https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1328646>
- INGEOMINAS. (1984). Reseña explicativa del mapa geológico preliminar de la plancha 153 - Chita (1:100.000). Bogotá, Colombia: Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras – INGEOMINAS
- Jiang, X., Luo, S., Fang, S., Cai, B., Xiong, Q., Wang, Y., Huang, X., y Liu, X. (2021). Remotely sensed estimation of total iron content in soil with harmonic analysis and BP neural network. *Plant Methods*, 17, Article 116. <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00822-2>
- Jinru, X. y Baofeng, S. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017, 1353691. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>
- Khaleghi, M., Ranjbar, H., Abedini, A., y Calagari, A. A. (2020). Synergetic use of the Sentinel-2, ASTER, and Landsat-8 data for hydrothermal alteration and iron oxide minerals mapping in a mine scale. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 17(3), 311–328. <https://doi.org/10.13168/AGG.2020.0023>
- Kokaly, R. F. (2012). Spectroscopic remote sensing for material identification, vegetation characterization, and mapping. en *Proceedings of SPIE*. SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.919121>
- Li, Q., Chen, G., y Luo, L. (2023). Mineral prospectivity mapping using attention-based convolutional neural network. *Ore Geology Reviews*, 156, 105381. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105381>
- Liu, S., Liu, Y., Ye, L., Wei, C., Cai, Y., y Chen, W. (2021). Genesis of Dulong Sn-Zn-In Polymetallic Deposit in Yunnan Province, South China: Insights from Cassiterite U-Pb Ages and Trace Element Compositions. *Minerals*, 11(2), 199. <https://doi.org/10.3390/min11020199>
- Montaña Cárdenas, J. H. (2015). Análisis de deformaciones y modelo estructural del frente de deformación del Piedemonte Llanero de la Cordillera Oriental de Colombia (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/54597>
- Moreno-Murillo, J. M., Concha-Perdomo, A. E., y Lozano, E. L. (2007). Petrogénesis y geoquímica del cuerpo ígneo de Pajarito, Boyacá - Colombia. *Boletín de Geología*, 29(2), 57–72.
- Ning, T., Tian, Y., Li, X., He, Z., Li, H., y Zhou, Y. (2025). Characteristics and Sources of Soil Contamination in a Lead–Zinc Mining Region in Gansu Province, China. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 34(7), 2091–2109. <https://doi.org/10.1080/15320383.2025.2479070>
- Quan, H., Graham, I., Worland, R., French, D., Adler, L., Dietz, C., y Greig, A. (2021). Mineralization, Alteration Assemblages, Geochemistry and Stable Isotopes of the Intermediate-Sulfidation Epithermal Kylo Deposit, Drake Goldfield, North-Eastern NSW, Australia: Evidence for a Significant Magmatic Fluid Component. *Environmental Sciences Proceedings*, 6(1), 20. <https://doi.org/10.3390/icsms2021-09347>
- Rouse, J. W., Jr., Haas, R. H., Deering, D. W., Schell, J. A., y Harlan, J. C. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS (NASA Contractor Report NASA-CR-144661; RSC-1978-4). Texas A&M University. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19750020419>

- Sillitoe, R.H. (2010). Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1), 3–41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
- Souza-Neto, J. A., Sallet, R., Moritz, R., y Sonnet, P. (2023). The occurrence of anthophyllite–phlogopite-bearing schist in the Seridó Belt, northeastern Brazil: Geological significance and potential guide of prospecting for gold and emerald deposits. *Journal of South American Earth Sciences*, 126, 104334. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104334>
- Tavakolifar, R., Shahabi, H., Alizadeh, M., Bateni, S. M., Hashim, M., Shirzadi, A., Ariffin, E. H., Wolf, I. D., y Shojae Chaeikar, S. (2023). Spatial Prediction of Landslides Using Hybrid Multi-Criteria Decision-Making Methods: A Case Study of the Saqqez-Marivan Mountain Road in Iran. *Land*, 12(6), 1151. <https://doi.org/10.3390/land12061151>
- Thompson, A. J. B., Hauff, P. L., y Robitaille, A. J. (1999). Alteration mapping in exploration: Application of short-wave infrared (SWIR) spectroscopy. *SEG Newsletter*, 39, 16–27. <https://doi.org/10.5382/SEGnews.1999-39.fea>
- Townley, B. (2001). *Metalogénesis: Hidrotermalismo y modelos de yacimientos*. *Revista Inglo Mayor*, 19(C), 6–90. <https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-autonoma-de-chihuahua/yacimientos-minerales-i/metalogenesis-hidrotermalismo-y-modelos-de-yacimientos-apuntes-inglomayor/164911380>
- Ulloa, C., Rodríguez, E. (2009). Plancha 211 - Tauramena 1:100,000. Bogotá D.C.: Servicio Geológico Colombiano.
- White, N. C., Hedenquist, J. W. (1995). Epithermal gold deposits: Styles, characteristics and exploration. *SEG Discovery*, 23, 1–13. <https://doi.org/10.5382/SEGnews.1995-23.fea>
- Xi, L., Yu, J., Ge, D., Pang, Y., Zhou, P., Hou, C., Li, Y., Chen, Y., y Dong, Y. (2024). SAM-CFFNet: SAM-Based Cross-Feature Fusion Network for Intelligent Identification of Landslides. *Remote Sensing*, 16(13), 2334. <https://doi.org/10.3390/rs16132334>
- Xue, J. y Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017, Article 1353691. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>
- Zajacz, Z., Halter, W. E., Pettke, T., y Guillong, M. (2008). Determination of fluid/melt partition coefficients by LA-ICP-MS analysis of co-existing fluid and silicate melt inclusions: Controls on element partitioning. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(8), 2169–2197. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.01.0349>