






Remote sensing for the identification of exploratory targets in the province of San Miguel, Cajamarca, 2024

Williams Enrique Correa Casanova¹; Williams Raul Correa Casanova²; Miguel Ricardo Portilla Castañeda³
Daniel Alejandro Alva Huaman⁴; Oscar Arturo Vásquez Mendoza⁵
^{1,5}First to Fifth Author's, Private University of the North, Perú, N00265041@upn.pe, N00265036@upn.pe
miguel.portilla@upn.edu.pe, daniel.alva@upn.edu.pe, oscar.vasquez@upn.edu.pe

Abstract– The research is based on the need to improve efficiency and precision in mineral prospecting in hard-to-reach regions, taking advantage of advanced technologies. Its main purpose is to apply remote sensing methods, with a focus on the analysis of ASTER images, to locate areas with potential mineral. The methodology used is applied and not experimental, analyzing phenomena without manipulating variables. A transversal approach was used to interconnect variables related to mineralization, and indices such as NDVI and NDWI were applied to minimize atmospheric and vegetative interference. Likewise, techniques such as: band combination, band mathematics, band ratios and the Spectral Angle Mapper (SAM) method were used in order to remotely detect the greatest coincidence of anomalies for the identification of each target. The results include the identification of 5 exploratory targets, each with significant spectral anomalies. These findings highlight areas with potential for mineral prospecting. In conclusion, the study shows that remote sensing is an effective tool for the exploration and detection of mineral resources, allowing a detailed preliminary analysis of large areas, which saves time and resources in future exploration campaigns.

Keywords-- Remote sensing, spectral anomalies, hydrothermal alterations, exploration targets.

Teledetección para la identificación de targets exploratorios en la provincia de San Miguel Cajamarca, 2024

Williams Enrique Correa Casanova¹; Williams Raul Correa Casanova²; Miguel Ricardo Portilla Castañeda³; Daniel Alejandro Alva Huaman⁴; Oscar Arturo Vásquez Mendoza⁵
¹⁻⁵First to Fifth Author's, Universidad Privada del Norte, Perú, N00265041@upn.pe, N00265036@upn.pe, miguel.portilla@upn.edu.pe, daniel.alva@upn.edu.pe, oscar.vasquez@upn.edu.pe

Resumen— La investigación se fundamenta en la necesidad de mejorar la eficiencia y precisión en la prospección mineral en regiones de difícil acceso, aprovechando tecnologías avanzadas. Su propósito central es aplicar métodos de teledetección, con un enfoque en el análisis de imágenes ASTER, para localizar zonas con potencial mineral. La metodología empleada es de tipo aplicada y no experimental, analizando fenómenos sin manipular variables. Se utilizó un enfoque transversal para interconectar variables relacionadas con la mineralización, y se aplicaron índices como el NDVI y NDWI para minimizar interferencias atmosféricas y vegetativas. Asimismo, se emplearon las técnicas como: combinación de bandas, matemáticas de bandas, cocientes de bandas y el método Spectral Angle Mapper (SAM) con la finalidad de teledetectar la mayor coincidencia de anomalías para la identificación de cada target. Los resultados incluyeron la identificación de 5 targets exploratorios, cada uno con anomalías espectrales significativas. Estos hallazgos resaltan áreas con potencial para la prospección mineral. En conclusión, el estudio evidencia que la teledetección es una herramienta efectiva para la exploración y detección de recursos minerales, permitiendo un análisis preliminar detallado de grandes áreas, lo que ahorra tiempo y recursos en futuras campañas de exploración.

Palabras clave—Teledetección, anomalías espectrales, alteración hidrotermal, blancos exploratorios.

I. INTRODUCCIÓN

La exploración es el inicio del proceso para encontrar y extraer minerales cruciales para la revolución tecnológica y la economía global. A lo largo de los tiempos, la humanidad ha explorado el subsuelo en busca de estos recursos valiosos que impulsan el dinamismo económico [1]. La necesidad global de minerales está aumentando constantemente. Se estima que en los años venideros será necesario duplicar la producción de cobre y acero, mientras que la de litio podría cuadruplicarse [2]. Sin embargo, la capacidad de descubrir nuevos depósitos minerales no está avanzando al ritmo necesario para satisfacer esta creciente demanda. Para el año 2040, la demanda de minerales (Cu, Ni, Co, Li) escalará velozmente [3]. Se estima que serán necesarias más de 3 000 millones de toneladas de minerales y metales para impulsar el desarrollo de fuentes de energía renovable [4]. En consecuencia, se proyecta que en los

próximos años la inversión mundial en exploración minera crecerá anualmente entre un 5% y un 15%. Este incremento responde a la creciente demanda de recursos minerales, impulsada por la transición hacia energías renovables y el desarrollo de tecnologías avanzadas [5].

En los últimos años, se ha tornado cada vez más dificultoso descubrir nuevos yacimientos minerales debido a que están ocultos. En el contexto global actual, Perú dispone de 63 proyectos de exploración minera distribuidos en 17 regiones. La mayor parte de la inversión, equivalente al 34.5% del total, se localiza en el norte del país, donde se desarrollan 7 proyectos que alcanzan un valor aproximado de 202 millones de dólares [6]. La exploración, clave para el descubrimiento de nuevos recursos, aumentó en un 24.7%, lo que indica un fuerte compromiso de las empresas por diversificar y expandir sus operaciones. Actualmente, la cartera de proyectos de exploración minera, según la edición 2024, incluye un total de 75 proyectos. De estos, 16 están en proceso de evaluación de Instrumentos de Gestión Ambiental (IGA), 27 proyectos están siendo evaluados para obtener la autorización requerida para realizar exploraciones, y 32 están en fase de ejecución o próximos a ejecutar exploración [7].

En Europa la exploración de nuevos yacimientos ha sido cada vez más complicada debido al agotamiento de los depósitos de alta calidad, lo que ha forzado al sector minero y a los especialistas a buscar nuevos yacimientos en áreas remotas y de difícil acceso [8].

En Sudamérica se distingue por recibir la mayor parte del presupuesto global destinado a la exploración minera, gracias al considerable potencial geológico de las naciones de la región. Es importante rotular que dicho presupuesto está influenciado por factores como el precio de los metales, las expectativas de demanda, el contexto internacional y la accesibilidad al capital, entre otros [9].

En Perú, las inversiones en exploración minera son un pilar clave dentro de la minería global. El país se posiciona como un destino ideal para estas inversiones, gracias a su destacado potencial geológico, ubicándose entre los primeros en reservas mundiales de oro (Au), plata (Ag) y cobre (Cu), y ocupando el primer lugar en reservas de zinc (Zn) y molibdeno (Mo) en Latinoamérica [9].

Actualmente, la exploración de nuevos recursos conlleva un alto nivel de riesgo, ya que la mayoría de las campañas no culminan con un hallazgo significativo o no logran los

resultados esperados. La finalidad principal de la teledetección en la exploración minera es identificar y evaluar áreas con potencial que puedan contener depósitos minerales (yacimientos) de interés económico. La problemática se manifiesta cuando estadísticamente se crea una incertidumbre porque más del 90% de las exploraciones no culminan con el mayor éxito para ubicar algún yacimiento, por ello solo algunos trabajos llegan a evidenciar la existencia de recursos que sea muy factibles y económicamente rentable [10].

La utilización de técnicas de teledetección para el análisis de la zonación de alteración en depósitos ha demostrado ser efectiva. En particular, los datos obtenidos del sensor ASTER permiten la identificación de características espectrales de minerales alterados, facilitando así la delineación de zonas de alteración y la prospección mineral. A través de métodos y técnicas, es posible integrar la información geológica con datos de teledetección, optimizando la identificación de áreas potenciales para la minería [11].

La identificación de targets exploratorios en la provincia de San Miguel, Cajamarca, enfrenta numerosos desafíos a causa de la complejidad geológica y la gran extensión del área. Los métodos tradicionales de exploración son costosos, lentos y a menudo ineficientes en terrenos montañosos y de difícil acceso. Ante esta problemática, surge la necesidad de métodos más avanzados y precisos para detectar áreas de interés prospectivo. De manera que, la teledetección con ENVI e imágenes satelitales ASTER se presenta como una solución innovadora, permitiendo una exploración más rápida y exhaustiva. [12] Explica que los datos obtenidos de satélites se pueden utilizar para detectar nuevas zonas de interés antes de realizar una campaña de exploración detallada y costosa. Así mismo, los métodos de teledetección pueden facilitar y reducir algunos gastos innecesarios al momento de empezar un proyecto minero. Sin embargo, la implementación efectiva de esta tecnología requiere una comprensión profunda de las capacidades de ENVI y de cómo interpretar adecuadamente los datos satelitales para identificar anomalías geológicas y estructuras mineralizadas.

A continuación, se presenta diferentes percepciones e indagaciones en los diferentes ámbitos como los son: internacional, nacional y local relacionado con el problema de investigación respecto a la Teledetección para la identificación de targets exploratorios para futuros proyectos.

En su trabajo [13] utiliza la alta resolución de IKONOS y ASTER para interpretar las formaciones estratigráficas, litológicas y estructurales en el área de Heiqia, en las Montañas West Kunlun, con el fin de identificar y caracterizar zonas de mineralización de cobre, plomo y zinc. Para ende, empleo técnicas de procesamiento de imágenes y análisis espectral, aplicando software especializado como PCI, ENVI y ERDAS, lo que permitió extraer anomalías relacionadas con la mineralización. Las zonas identificadas fueron verificadas mediante investigaciones de campo, lo que resultó en la confirmación de dos sitios de mineralización de cobre-plomo-zinc. La investigación concluyó que la teledetección resulta una herramienta eficaz para localizar depósitos minerales en

zonas de acceso complicado, y el modelo de prospección desarrollado proporciona una base sólida para futuras exploraciones de minerales similares en la región, destacando la importancia de integrar datos de teledetección con estudios geológicos tradicionales para mejorar la eficiencia en la exploración mineral.

Tal como indica [14] analizaron la utilidad de los datos proporcionados por Landsat-8 para detectar zonas de alteración hidrotermal vinculadas a depósitos de cobre porfídico, realizando una comparación con los datos de la misión ASTER en la región de Shahr-e-Babak, Irán. Para ello, emplearon varias metodologías de mapeo robustas, como combinaciones de bandas espectrales, ratios bandas, análisis de componentes principales (PCA) y transformaciones de Mínima Fracción de Ruido (MNF) en las bandas VNIR (Visible y Cercano Infrarrojo) y SWIR (Infrarrojo de Onda Corta) de Landsat-8 y ASTER. Los resultados mostraron que ambas combinaciones de bandas fueron efectivas para distinguir áreas de alteración hidrotermal, confirmando la utilidad de Landsat-8 en la exploración de depósitos de cobre porfídico y oro epitermal en la región. Además, se concluyó que esta metodología puede aplicarse a otras áreas con condiciones climáticas similares, sugiriendo un considerable potencial para el uso de Landsat-8 en la exploración mineral en diferentes regiones geológicas.

En [15] sostienen que su investigación se centró en la delineación de alteraciones hidrotermales en el distrito de Gabal El Rukham-Gabal Mueilha, Egipto, utilizando datos de sensores remotos y datos geofísicos aéreos. Se emplearon cuatro conjuntos de datos: ASTER, ALI, Landsat 8 y Sentinel 2, aplicando técnicas como combinaciones RGB, análisis de componentes principales, matemática de bandas y cociente de bandas para mapear unidades litológicas y alteraciones hidrotermales. Los resultados mostraron que cada sensor tenía una eficacia variable en la detección de alteraciones, destacando la combinación de ASTER y Sentinel 2 como la más efectiva. Se concluyó que la combinación de los sensores ASTER y Sentinel 2 es particularmente efectiva para la identificación de zonas de alteración real, mejorando así la precisión de los estudios geológicos en exploración minera.

El estudio [16] se enfoca en el uso de teledetección para identificar áreas de alteración hidrotermal que puedan ser relevantes para la prospección en el distrito de la Encañada, Cajamarca. Su objetivo principal es emplear imágenes satelitales, específicamente del sensor ASTER, para localizar zonas con características mineralógicas que indiquen la presencia de yacimientos minerales. La metodología es de tipo aplicada y no experimental, lo que significa que se observa y analiza el fenómeno sin manipular las variables en estudio. El análisis espectral se efectúa utilizando el método SAM, que facilita la comparación entre las firmas espectrales propias de diversos minerales. Los resultados muestran la identificación de áreas con potencial prospectivo, donde se han detectado alteraciones hidrotermales y minerales específicos, lo que sugiere un considerable potencial para la exploración. En las conclusiones, se destaca que los métodos utilizados no solo

proporcionan la identificación de zonas con características mineralógicas favorables, sino que también se presenta como una herramienta valiosa para futuras exploraciones, ayudando al desarrollo de la minería en Cajamarca.

El análisis en [17] tuvo como objetivo principal identificar blancos prospectivos a través del procesamiento de imágenes ASTER. Para alcanzar este objetivo, se establecieron metas concretas que contemplaron la utilización de distintos métodos de procesamiento y análisis para localizar áreas de alteración hidrotermal, además de la generación de un mapa temático de dichas zonas y la elaboración de un mapa de lineamientos estructurales en la región estudiada. Se utilizaron técnicas como combinaciones de bandas, matemáticas de bandas y cocientes de bandas, complementadas con el uso de herramientas como Google Earth, ArcGIS y Envi. Como resultado, se identificaron 6 zonas de interés prospectivo, mostrando una alta correlación entre los métodos utilizados, lo que permitió distinguir asociaciones mineralógicas típicas de alteraciones hidrotermales. Finalmente, elaboraron un mapa temático que destaca estas zonas, esto lo posiciona como una herramienta valiosa para guiar futuros proyectos de prospección y exploración en la región de Cajamarca.

La investigación se suscita en la necesidad de identificar nuevos recursos y reservas en la provincia de San Miguel, ubicada en el departamento de Cajamarca. Este estudio busca optimizar los métodos tradicionales de prospección mediante el uso de tecnologías avanzadas de teledetección, mejorando la precisión y eficiencia en la detección de potenciales depósitos minerales. Esto se realiza mediante la integración y el análisis de datos obtenidos de imágenes del satélite ASTER, procesados con el software ENVI. Como resultado, se lograron identificar anomalías geológicas, patrones de alteración hidrotermal y la identificación de minerales se realizó mediante técnicas tales como la combinación de bandas, matemáticas de bandas, cocientes de bandas y el uso del método Spectral Angle Mapper (SAM).

El objetivo principal fue evaluar e identificar targets prospectivos, con ayuda del procesamiento de imágenes del sensor ASTER en la provincia de San Miguel, Cajamarca. Además, aplicar diferentes técnicas de procesamiento de imágenes satelitales que permitan identificar zonas de alteración hidrotermal y ensambles mineralógicos, evaluando la efectividad de la teledetección.

En el estudio se aplicaron varias técnicas de teledetección con el fin de optimizar la identificación de depósitos minerales en el área de investigación propuesta. El empleo de diferentes métodos permitió una visualización más detallada de las anomalías geológicas y los patrones de alteración hidrotermal en el área de estudio. Los hallazgos demostraron que el uso de estas tecnologías avanzadas no solo mejoró la precisión y eficiencia en la identificación de minerales como pirita, galena y moscovita, sino que también respaldó la viabilidad de futuras actividades exploratorias, contribuyendo a la sostenibilidad del sector minero al minimizar el impacto ambiental asociado con las operaciones en el terreno.

En conclusión, la investigación realizada sobre la aplicación de teledetección en la identificación de targets exploratorios en la provincia de San Miguel, Cajamarca, ha demostrado ser un enfoque innovador y eficaz para optimizar los métodos tradicionales de prospección minera. El uso de tecnologías modernas, como el análisis de imágenes satelitales y técnicas de procesamiento espectral, permitió mejorar notablemente la precisión en la detección de anomalías geológicas y patrones de alteración hidrotermal. Los resultados obtenidos no solo resaltan el potencial mineral de la región, sino que también subrayan la importancia de integrar herramientas tecnológicas en la exploración de recursos naturales, contribuyendo así a un desarrollo sostenible.

II. METODOLOGÍA

Materiales y datos utilizados

Con respecto a los métodos y herramientas utilizados para la recolección y análisis mineralógicos de alteraciones hidrotermales, es fundamental disponer de una imagen satelital que ofrezca información espectral. En específico, se necesita una imagen del tipo ASTER L1, que combina datos espectrales provenientes de sus tres subsistemas (VNIR, SWIR y TIR). Para acceder a estas imágenes se pueden utilizar servidores que proporcionan este tipo de producto, como [Earth Data Search](#) [18].

Las metodologías empleadas para el procesamiento de datos se usaron mediante el software ENVI; asimismo, para manejo de shapefiles y presentación de resultados se empleó el software SIG como los es ArcGIS Pro.

Presupuesto

La presente investigación fue desarrollada en el Laboratorio de Geología de la Universidad Privada del Norte (UPN), sede Cajamarca, aprovechando las instalaciones y equipos disponibles para el procesamiento y análisis de datos geológicos. La implementación y uso de los softwares especializados se realizaron en las computadoras – laptops personales de los autores, quienes contaban con las licencias de herramientas como ENVI y ArcGIS Pro. Para optimizar los recursos disponibles, se recurrió a plataformas de acceso libre como [Earth Data Search – NASA](#) [18], para la obtención de imágenes satelitales ASTER L1, y [GEOCATMIN](#) [19], para la obtención de la geología a una escala regional. Además, se contó con el apoyo de la comunidad académica de la UPN, que facilitó el acceso a bibliotecas digitales y bases de datos científicas a través de su biblioteca virtual, contribuyendo al desarrollo eficiente de la investigación sin incurrir en gastos adicionales significativos. Esta estrategia de aprovechamiento de recursos institucionales y personales permitió llevar a cabo el estudio de manera efectiva, manteniendo la calidad y rigurosidad científica requeridas.

Preprocesamiento de imágenes

Para realizar un buen procedimiento primeramente se realiza la unión de los 3 subsistemas VNIR (3 bandas), SWIR (6 bandas) y TIR (5 bandas) para obtener un archivo

multibandas en el cual estará las 14 bandas que componen la imagen satelital ASTER. También se realiza el replanteo del tamaño de píxel a 15×15 metros, conjunto con el respectivo alineamiento con el sistema de coordenadas correspondiente, siendo WGS 1984 UTM_ZONE_17S el sistema de coordenadas utilizado. Finalmente, se procede a recortar la imagen satelital ASTER con la shapefile del área de estudio.

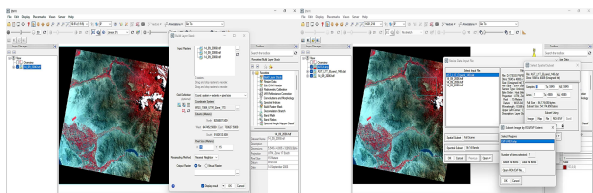


Fig. 1 Unión de los tres subsistemas ASTER y recorte a la zona de estudio.

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DE LA IMAGEN ASTER L1

Subsistema	Nº Banda	Rango Espectral	Resolución Espacial	Resolución Radiométrica
VNIR	1	0.52 - 0.6 μm	15 m	8 bits
	2	0.63 - 0.69 μm		
	3N	0.78 - 0.86 μm		
	3B	0.78 - 0.86 μm		
SWIR	4	1.6 - 1.7 μm	30 m	8 bits
	5	2.145 - 2.185 μm		
	6	2.185 - 2.225 μm		
	7	2.235 - 2.285 μm		
	8	2.295 - 2.365 μm		
	9	2.36 - 2.43 μm		
TIR	10	8.125 - 8.475 μm	90 m	12 bits
	11	8.475 - 8.825 μm		
	12	8.925 - 9.275 μm		
	13	10.25 - 10.95 μm		
	14	10.95 - 11.65 μm		

La recuperación de radiancia en imágenes ASTER se encarga de convertir los valores digitales capturados por el sensor en mediciones físicas de la radiación reflejada o emitida desde la superficie terrestre [20]. Esto con la finalidad de normalizar la radiometría tomada, y permitir interpretar datos espectrales de manera precisa para su posterior análisis. La conversión de radiancia a reflectancia en imágenes ASTER es un proceso esencial. Esta conversión permite obtener mediciones más precisas de la cantidad de radiación reflejada desde la superficie terrestre. A diferencia de la radiancia, que se refiere a la cantidad de radiación registrada por el sensor ASTER, dependiendo de la geometría del sol y del sensor, se convierte en reflectancia, que es independiente de las condiciones solares y resulta más útil para aplicaciones futuras, como la caracterización de materiales y la identificación de minerales [20][21].

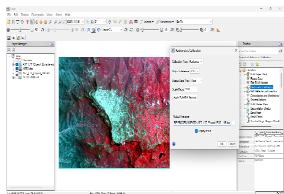


Fig. 2 Obtención de radiancia.

Con esto ya realizado se procede a convertir la radiancia a valores de reflectancia, con la finalidad de captar la reflectancia de los ensambles mineralógicos de las alteraciones hidrotermales. Esta conversión es esencial para corregir efectos atmosféricos y mejorar la precisión en la identificación de minerales durante la exploración geológica [22].

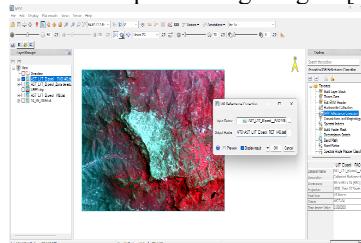


Fig. 3 Conversión a reflectancia en ENVI.

Como último paso para que la imagen sea utilizada se convierte la reflectancia a morfología esto se realiza con la finalidad de ayudar a reducir el ruido en las imágenes. Este filtro morfológico se usa para atenuar el ruido topográfico y resaltar las firmas espectrales de minerales de alteración (alunita, sericita, entre otros), optimizando así la posterior clasificación con las distintas técnicas y métodos [23].

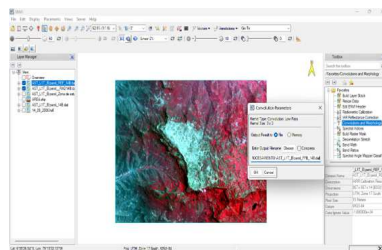


Fig. 4 obtención de geomorfología a partir de la reflectancia.

El uso de máscaras como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) y el NDWI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada) en teledetección tiene aplicaciones fundamentales en la geología, pues facilitan el análisis de vegetación y cuerpos de agua, que son variables críticas en este tipo de estudios. Por ejemplo, el NDVI, derivado de la diferencia entre la radiación infrarroja cercana y la radiación roja, permite identificar la cobertura vegetal [24]. De forma similar, el NDWI, basado en el infrarrojo cercano y el espectro verde, destaca zonas con presencia de cuerpos de agua [25].

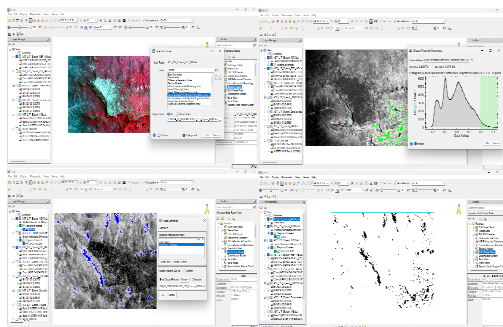


Fig. 5 Creación de máscaras de vegetación y agua.

Procesamiento de imágenes

Las combinaciones de bandas en teledetección son técnicas que permiten mejorar la visualización e interpretación de imágenes satelitales al asignar diferentes bandas espectrales a los canales de color RGB. En geología, estas combinaciones se utilizan para resaltar características del terreno, identificar minerales específicos y realizar mapeo de litologías o alteraciones hidrotermales [26]. En el caso de ASTER, la combinación 3-2-1 se usa para detectar áreas con óxidos de hierro, útiles en la exploración de zonas alteradas. Las combinaciones permiten observar variaciones espectrales asociadas con minerales, como arcillas o carbonatos, que reflejan diferentes longitudes de onda del espectro infrarrojo, facilitando así la delimitación de áreas con posibles recursos geológicos [27][28].

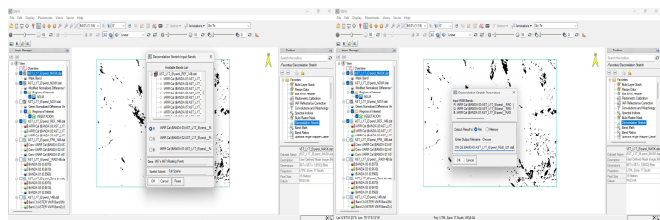


Fig. 6 Proceso de combinación de bandas.

Es necesario utilizar la matemática de banda, ya que ésta permite eliminar los efectos del sombreado, que de otro modo se mezclan con la información espectral necesaria para hacer discriminaciones litológicas, y así transmitir sólo información espectral. Las operaciones de bandas permiten maximizar el contraste entre diferentes materiales geológicos, haciendo más eficiente la teledetección de alteraciones hidrotermales, suelos y tipos de rocas en estudios de prospección [29]. Además, las razones de bandas pueden minimizar las diferencias entre las diversas unidades litológicas [30]. La matemática de bandas resulta particularmente valiosa en el análisis de imágenes multispectrales y de satélites como Landsat, ASTER y Sentinel, ya que permite combinar bandas del espectro visible, infrarrojo cercano e infrarrojo térmico para distinguir materiales geológicos según sus características de respuesta espectral [31].

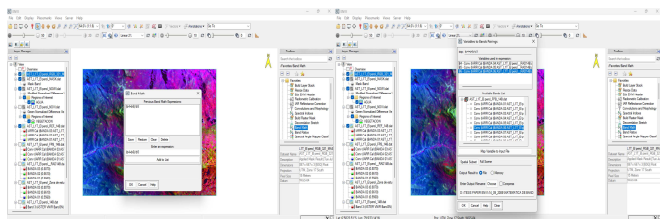


Fig. 7 Proceso de matemática de bandas.

Los cocientes de bandas, o band ratios, son ampliamente utilizados en teledetección para resaltar características espectrales específicas y minimizar efectos atmosféricos y de iluminación en imágenes multispectrales. En contexto, los cocientes de bandas se emplean para identificar minerales y

tipos de roca específicos a partir de sus propiedades espectrales. Esta técnica mejora significativamente la claridad en la identificación de zonas de alteración hidrotermal, litologías y suelos, al discriminar variaciones sutiles en la composición mineral del terreno [32]. Por ejemplo, en aplicaciones geológicas, los cocientes de bandas como el de la banda infrarroja cercana sobre el rojo es empleada para identificar minerales de óxido de hierro (Ox. Fe), comunes en zonas de mineralización y alteración hidrotermal. Otros cocientes, como la relación entre bandas del infrarrojo medio, ayudan a detectar minerales arcillosos (caolinita, illita, etc.) o silicatos (Olivino, biotita, clorita, etc.) [33]. Estos cocientes son eficaces para mejorar el contraste en regiones con variaciones topográficas y de vegetación, donde los métodos convencionales pueden ser limitados. El análisis de imágenes de satélites como ASTER, que permite aplicar combinaciones de bandas precisas, facilita la identificación de patrones geológicos complejos mediante estos cocientes [34].

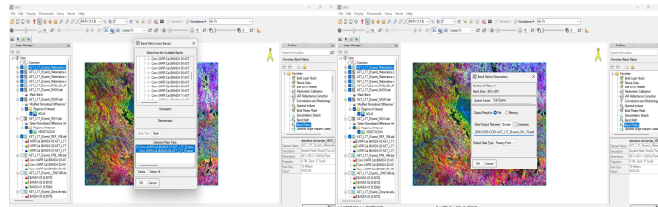


Fig. 8 Proceso de combinación cocientes de bandas.

El método Spectral Angle Mapper (SAM) es una técnica de clasificación espectral basada en principios físicos, que utiliza un ángulo en un espacio n-dimensional que cataloga los píxeles en función de propiedades espectrales similares con espectros de referencia [35]. El SAM utiliza espectros de miembros finales que se pueden extraer directamente de la imagen o de bibliotecas espectrales ya guardadas en una base de datos. Este proceso de calcular el ángulo espectral entre el espectro de referencia y la imagen determina la similitud o igualdad de estos dos grupos. Las salidas del algoritmo son ángulos entre cero y uno. El ángulo grande muestra menos similitud y el ángulo más pequeño más similitud [36][37].

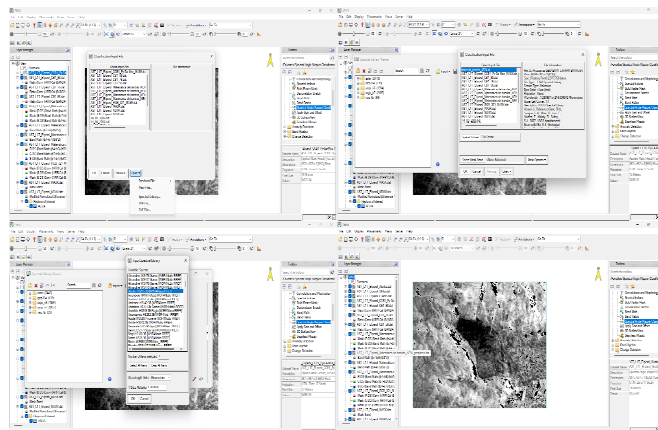


Fig. 9 Proceso de Spectral Angle Mapper (SAM).

III. RESULTADOS

Ubicación y Accesibilidad

La zona de estudio abarca 4 distritos, como lo son: Bolívar, Nanchoc, Niepos y La Florida; todos estos ubicados dentro de la provincia de San Miguel, departamento de Cajamarca, Perú. El área está ubicada en la cordillera norte del Perú, con vista de 290° NW de la ciudad de Cajamarca, aproximadamente a unos 78 kilómetros de esta. Asimismo, las carreteras de acceso al lugar van desde vías asfaltadas hasta trochas carrozables.

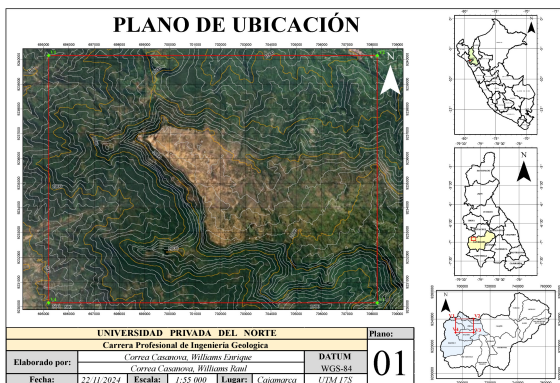


Fig. 10 Plano de ubicación de la zona de estudio.

Geología Regional

Depósitos cuaternarios

Depósitos fluviales (Qh-fl): Depósitos de arenas y limos depositados en terrazas recientes con espesores de 1-5 metros.

Intrusivos subvolcánicos y plutónicos

Andesita (Po-an): Subvolcánicos y domos andesíticos, porfiríticos, gris verdosos, con cristales de plagioclasa y anfíbol.

Granodiorita (P-gd): Granodiorita holocristalina, equigranular, gris clara, con cristales de cuarzo, plagioclasa, ortosa, anfíbol y biotita.

Grupo Calipuy – Rocas del centro volcánico Niepos

Po-ni/5: Depósito de flujo de lava, de textura afanítica, de color gris verdoso, que sobreyace a un depósito de flujo piroclástico de ceniza, de color marrón rojizo. Su espesor es de 250 m.

Po-ni/4: Depósito de flujos piroclásticos de pómez y cenizas, gris amarillentos, soldados, ricos en cristales; y depósitos de flujos piroclásticos de ceniza, gris claros. Conforman un espesor de 420 m. Edad: 33.16 ± 0.21 Ma.

Pe-ni/3: Depósitos de flujos piroclásticos de ceniza, ricos en fragmentos líticos, cubiertos por depósitos piroclásticos de flujos de ceniza, color gris blanquecino. Espesor de 450 m.

Pe-ni/2: Depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas, gris verdosos; se intercalan de depósitos de flujos piroclásticos de ceniza, gris claros y depósitos de flujos piroclásticos de pómez y ceniza, de coloraciones grises. Su espesor es de 350 m.

Pe-ni/1: Depósitos de flujos de lava andesítica, de textura porfirítica, en capas tabulares. Tienen un espesor de 400 m.

Formaciones Cretácicas

Formación Pullucana (Ks-pu): Intercalaciones de calizas nodulares de grano medio, gris oscuras con lutitas negras con nódulos calcáreos. Tienen un espesor en conjunto de 450 m.

Formación Pariatambo (Ki-pt): Calizas de grano muy fino gris oscuras a negras en capas delgadas tabulares, intercaladas con lutitas negras calcáreas con olor fétido; y ocasionales horizontes tobáceos. Tienen un espesor de 400 m.

Formación Inca-Chúlec (Ki-ichu): Intercalaciones de calizas nodulares grises a pardas y lutitas calcáreas gris oscuras. Conforman un espesor de 350 m.

Formación Goyllarisquizga (Ki-g): Formación gris rojizas y areniscas cuarzosas blanquesinas intercaladas con lutitas grises y algunos lentes de carbón. Su espesor es de 200 m.

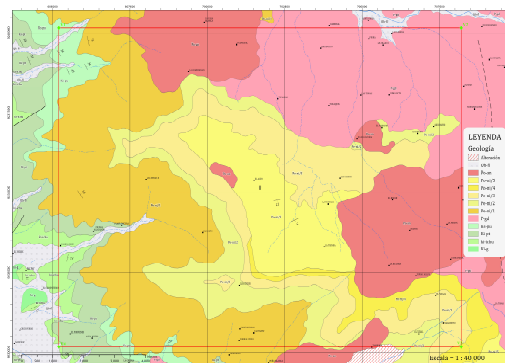


Fig. 11 Plano geológico en el cual se visualiza una abundancia de las formaciones del Grupo Calipuy pertenecientes al Paleógeno – Oligoceno; como también formaciones del Cretáceo superior e inferior.

La litología descrita muestra características idóneas para la exploración de diversos tipos de depósitos minerales y recursos naturales, brindando un entorno propicio para el descubrimiento y aprovechamiento de estos recursos. En primer lugar, la presencia de intrusivos subvolcánicos y plutónicos, como la granodiorita y la andesita, sugiere un entorno geológico propicio para la mineralización de tipo pórfido y/o epitermal, típicamente asociado a distintos metales como cobre, oro y plata. Estas rocas suelen actuar como fuentes de fluidos hidrotermales y estructuras favorables para la deposición de minerales económicos. Además, la interacción entre estos cuerpos intrusivos y las rocas circundantes puede inducir alteraciones hidrotermales de gran relevancia exploratoria, favoreciendo la acumulación de minerales valiosos en áreas específicas del subsuelo, lo que aumenta significativamente su potencial y atractivo para la exploración minera.

Las rocas volcánicas del Grupo Calipuy, compuestas por depósitos de flujos de lava y piroclásticos, son indicativas de actividad magmática prolongada, lo que puede estar relacionado con la formación de sistemas epitermales de alta o intermedia sulfuración. Además, las características texturales y composicionales de estos depósitos sugieren que pueden haber sufrido procesos de alteración hidrotermal, lo que incrementa su interés en exploración minera.

Combinación de bandas

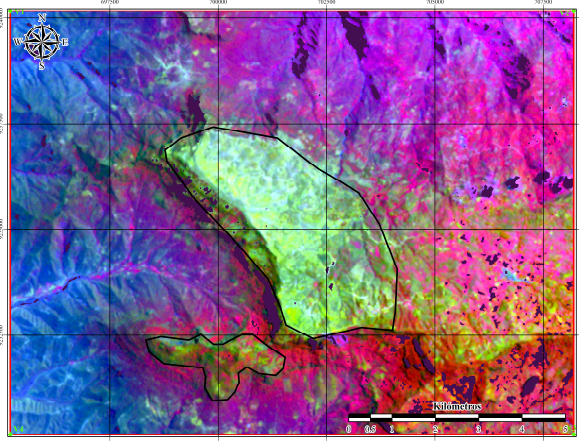


Fig. 12 Plano RGB 321, en donde se aprecia en tonalidades rojas la vegetación y en tonalidades amarillas-verdes los óxidos de hierro.

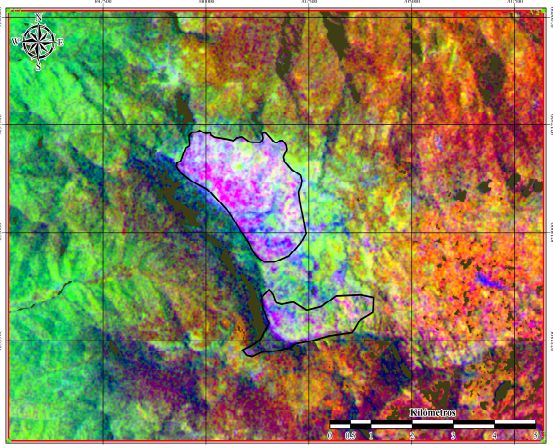


Fig. 13 Plano RGB 468, permite visualizar las alteraciones hidrotermales, en tonalidades moradas las alteraciones Argillica y Filica, y de color verde la alteración Propilítica.

Combinación de matemática de bandas

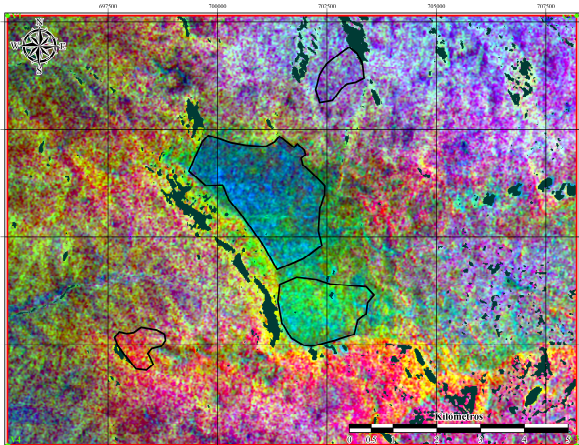


Fig. 14 Plano RGB para AH, en tonalidades rojas resalta la alteración argillica avanzada, en verde la alteración propilítica y en azul la alteración filica.

Combinación de cociente de bandas

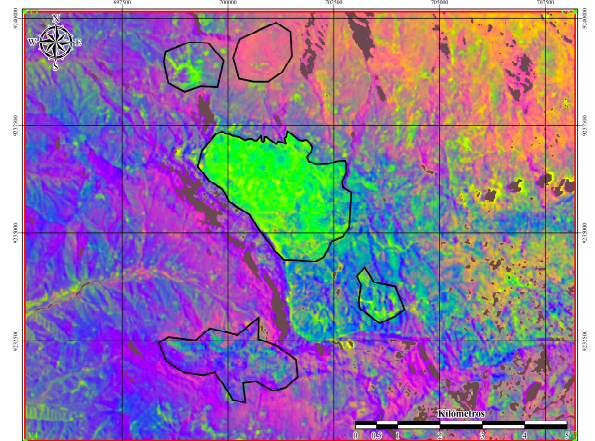


Fig. 15 Plano RGB de cociente de bandas para Mus, Clor y Epi, en búsqueda de minerales silicatados, como lo es la Moscovita en tonalidades rojizas; en colores verdes la presencia de Clorita y Epidota en colores azulados.

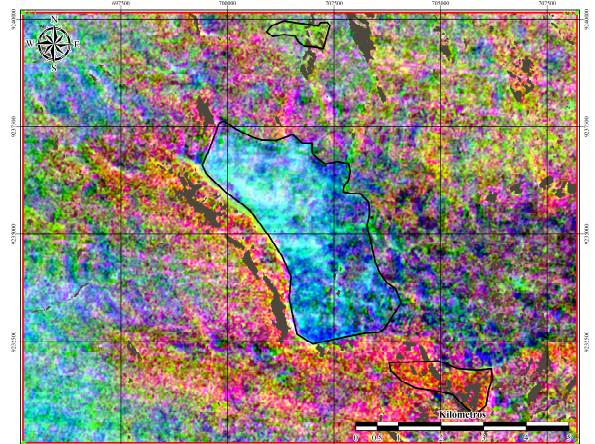


Fig. 16 Plano RGB (R: SiO₂, G: Moscovita, B: Carbonatos) para resaltar minerales silíceos, moscovita y carbonatados.

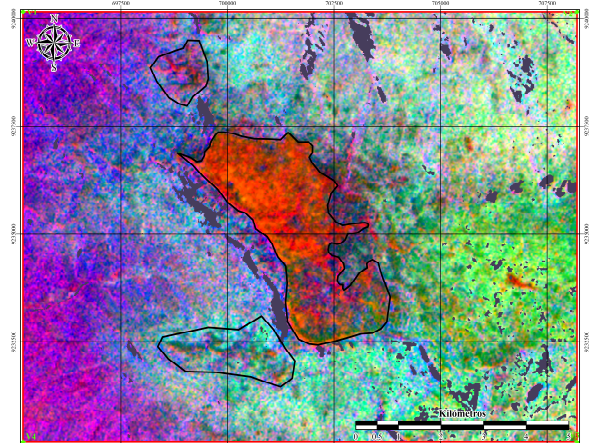


Fig. 17 Plano RGB para Mus, Jar y Clo, se destaca que la zona céntrica se tiene una alta presencia de tonalidades rojizas, representando al mineral Moscovita, como también, a lado Este de la anomalía central hay una alta presencia de Jarosita representada por tonalidades verdes.

Combinación de Spectral Angle Mapper (SAM)

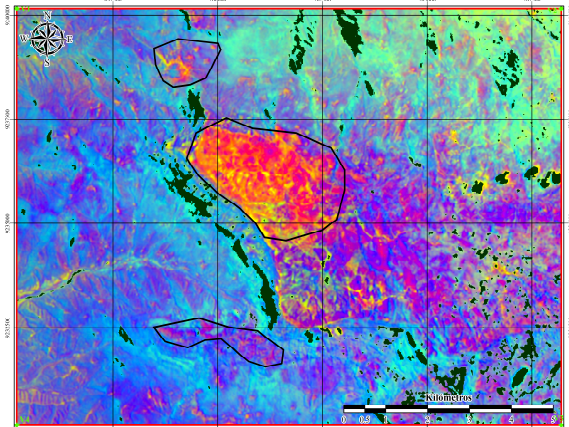


Fig. 18 Plano RGB de SAM 1 para Qz, Alu y Dck, abundancia importante en relación con el RGB de Cuarzo, Alunita y Dickita, realza la importancia de la zona al haber presencia de minerales de alteración hidrotermal.

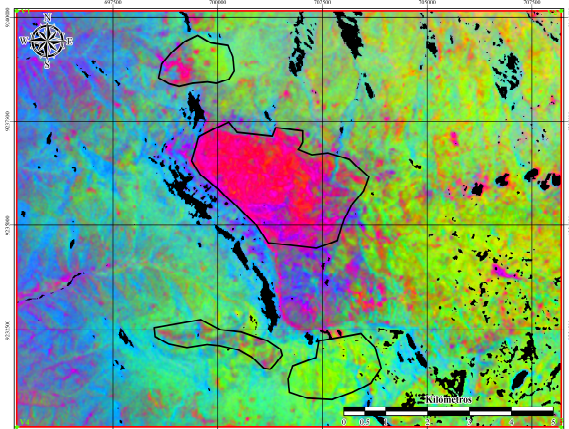


Fig. 19 Plano RGB de SAM 2 de Cpy, Py y He, se evidencia una abundancia importante en relación con el RGB de Calcopirita, Pirita y Hematita; realzando la presencia de minerales de alteración hidrotermal.

Zonas de interés

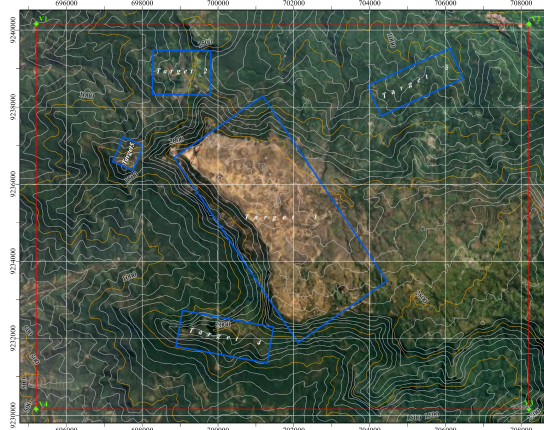


Fig. 20 Plano de targets exploratorios en la zona de estudio, se aprecia en la zona central una gran cantidad de anomalías siendo también de mucho más grande a comparación de los otros 4 targets ubicados a alrededor del principal.

TABLA 2
PRINCIPALES TARGETS EXPLORATORIOS

ID	Coordenadas centroides		Área (km ²)	Perímetro (km)
	Este	Norte		
Target 1	701647.53	9235088.12	16.49	17.298
Target 2	699038.12	9238896.65	1.75	5.34
Target 3	705211.08	9232039.38	2.04	6.47
Target 4	700178.30	9232039.29	2.31	6.777
Target 5	697625.07	9236791.69	0.41	2.578

Definitivamente, la litología analizada ofrece un escenario geológico favorable para la exploración de minerales metálicos para la constante demanda. La combinación de intrusivos subvolcánicos, rocas volcánicas y evidencia de alteración hidrotermal refuerza el potencial de mineralización. No obstante, es necesario complementar este análisis con estudios detallados que confirmen la presencia de depósitos económicamente viables.

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Discusión

Mediante el procesamiento y análisis de los resultados obtenidos, se pudieron identificar áreas de interés prospectivo que presentan alteración hidrotermal, confirmando así la eficacia de los métodos aplicados. Igualmente, las zonas prospectivas se identificaron por la mayor presencia de anomalías espectrales con alteración hidrotermal Argílica, Fílica y Propilítica teniendo en cuenta también los ensambles mineralógicos de cada uno. Concluyendo así con una totalidad de 5 targets prospectivos y para llegar a dichos resultados se tuvo que realizar la interpretación y análisis de las anomalías presentes en cada técnica de teledetección empleada.

En el proceso de identificación de zonas de interés, se empleó la combinación de bandas RGB 321, para identificación de óxidos de hierro en colores amarillos y la vegetación en colores rojos. A comparación de la combinación de bandas RGB 468 utilizada para la visualización de alteraciones hidrotermales como alteración argílica y fílica en tonalidades rosados y de color verde resalta la alteración propilítica. Ante esto, el presente estudio coincide con los métodos empleados por [17] para identificar zonas favorables para la prospección en Michiquillay, Cajamarca. Asimismo, con el apoyo de la matemática de bandas, se lograron distinguir áreas con mayor presencia de alteración hidrotermal y minerales de alteración mediante la ecuación $(B4+B6)/B5$ para detectar alteración argílica avanzada asociada con minerales como alunita, caolinita y pirofilita. La ecuación $(B5+B7)/B6$ fue utilizada en la búsqueda de sericita, moscovita, illita y smectita presentes en la alteración fílica; y la alteración propilítica caracterizada por clorita y epidota con la ecuación $(B7+B9)/B8$. Como sostiene [15] las matemáticas de bandas son útiles para delimitar alteraciones hidrotermales

enfocándose en sus ensambles mineralógicos. Por consiguiente, se implementó los cocientes de bandas RGB 3/4, 5/8 y 3/4 para minerales de arcilla con relación a las alteraciones argílica – filica; clorita, epidota y calcita; y basamento de roca inalterada. El cociente RGB 7/6, 5/6 y 9/8 para realzar la moscovita ya que se asocia la alteración filica; la caolinita por que se asocia alteración argílica; y la epidota al estar asociada a la alteración propilítica. En relación con [14] se demostró que los cocientes de bandas son efectivos para mapear áreas de alteración vinculadas a depósitos de tipo pórfido y/o epitermal. Al mismo tiempo, como una técnica más exacta en la búsqueda de minerales específicos se presenta el método de Spectral Angle Mapper (SAM) para identificar ensambles mineralógicos de alteraciones hidrotermales, resaltado minerales como calcopirita, pirita, hematita, cuarzo, alunita y dickita, asociados a cada tipo de alteración hidrotermal. De acuerdo con [16], el análisis e interpretación de las firmas multispectrales de minerales facilita la identificación de zonas con alteración hidrotermal. La investigación tuvo resultados favorables teniendo en cuenta las anomalías. El presente estudio ratifica la eficacia de los métodos previamente aplicados, logrando la identificación de zonas con alto potencial para la prospección mineral. La integración de diversas técnicas de teledetección permitió una evaluación más precisa de las anomalías espectrales asociadas a procesos de alteración hidrotermal. Asimismo, se elaboraron planos temáticos para representar cada técnica utilizada, proporcionando una visualización clara y detallada de los resultados. Estos insumos no solo optimizan la interpretación geológica, sino que también facilitan la toma de decisiones en etapas posteriores de exploración, respaldando futuras investigaciones y trabajos de campo.

Conclusión

El uso de la teledetección con imágenes ASTER permitió identificar posibles blancos exploratorios al analizar zonas con alteraciones hidrotermales, facilitando la diferenciación de minerales específicos asociados a estas alteraciones, lo cual resulta fundamental para resaltar áreas con potencial para la prospección. De manera que, desde una etapa preliminar, se puede obtener información detallada de grandes áreas, ahorrando tiempo y recursos, mejorando la planificación y precisión de futuras campañas de exploración en áreas remotas. Aunque los resultados obtenidos del análisis y procesamiento de las imágenes ASTER son indicativos clave para identificar posibles áreas de interés, se recomienda realizar estudios de campo más detallados.

Se localizaron 5 targets exploratorios, presentando una gran cantidad de anomalías espectrales en los distintos métodos aplicados, teniendo así el target más representativo en la parte céntrica del área de estudio y 4 targets en los alrededores de este.

Empleando las diversas técnicas de teledetección, en las combinaciones de bandas se identificó 2 zonas con anomalías, con la ayuda de la matemática de bandas y cociente de bandas se teledetectó 4 anomalías en promedio; finalmente, el método

SAM permitió identificar anomalías y patrones de los ensambles mineralógicos de las alteraciones hidrotermales, teniendo así una totalidad de 3 targets. Todas las técnicas empleadas ayudaron a definir e identificar que zonas presentan una mayor cantidad de anomalías y para definir los targets prospectivos se tomó en cuenta la coincidencia de anomalías con las diferentes técnicas empleadas en el presente estudio.

V. LIMITACIONES

Las limitaciones como la interferencia atmosférica (nubes) y la vegetación, por lo que fue necesario crear y aplicar máscaras, tales como el NDVI y NDWI, para minimizar estos efectos. Asimismo, la resolución espacial y temporal de las imágenes tuvo un impacto en el estudio y análisis de los resultados. Para aumentar la precisión, se disminuyó el tamaño de los píxeles de 90×90 metros a 15×15 metros, logrando así una mejor resolución espacial en el análisis. En cuanto a la resolución temporal, su impacto en la investigación mínima, por lo que no fue necesario hacer ajustes en ese aspecto. Si bien las técnicas espectrales aplicadas permiten la identificación indirecta de zonas de alteración hidrotermal, es necesario complementar los resultados con estudios de campo que confirmen la presencia de minerales específicos como oro (Au), plata (Ag) y cobre (Cu), cuya ocurrencia es común en la región de Cajamarca. Con base en estudios previos y características espectrales, se estima una confiabilidad preliminar del 70% en la identificación remota de minerales asociados a alteraciones argílicas, filicas y propilíticas.

VI. VALIDACIÓN EN CAMPO (PROYECTADA)

Se recomienda realizar una campaña de validación en campo durante la temporada seca, con el fin de contrastar las interpretaciones obtenidas mediante imágenes ASTER, especialmente en relación con zonas de alteración hidrotermal. Esta etapa debería enfocarse en sectores asociadas a óxidos de hierro, caolinita y cloritas.

La metodología sugerida incluye la descripción de afloramientos, el muestreo de rocas alteradas y el uso de espectrómetros portátiles para confirmar in situ la presencia de minerales identificados por análisis espectral. Esta validación fortalecería la consistencia del modelo interpretativo y respaldaría futuras acciones de exploración.

REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2024). Boletín estadístico minero: Agosto 2024 (Edición No. 08-2024). <https://www.gob.pe/bem-agosto-2024.pdf>
- [2] Tejada, W. (2024). Hay US\$ 253 millones en proyectos de exploración en ejecución o a punto de empezar. *ProActivo*. <https://proactivo.com.pe/hay-us-253-millones-en-proyectos-de-exploracion-en-ejecucion-o-a-punto-de-empezar/>
- [3] Barria, C. (2022). La carrera por los codiciados "minerales del futuro" que pueden crear gigantescas fortunas e influir en la seguridad nacional de los países. *BBC News Mundo*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-61144362>

- [4] Grupo Banco Mundial. (2020). *La producción de minerales se disparará a medida que aumente la demanda de energía limpia* [Comunicado de prensa]. <https://www.bancomundial.org/mineral-production-to-soar-as-demand-for-clean-energy-increases>
- [5] EY México. (2024). Los desafíos críticos de oferta y demanda de minerales que enfrentan las empresas mineras. https://www.ey.com/es_pe/insights/mining-metals/mining-and-metals-centre-of-excellence/cuestiones-criticas-oferta-demanda-minerales
- [6] Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2022). *Boletín Estadístico Minero. Edición N° 02. Ministerio de Energía y Minas.* <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2997434/BEM022022.pdf?v=1649258385>
- [7] Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2024). *Cartera de Proyectos de Exploración Minera 2024.* Dirección de Promoción Minera. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/6358500/5417728-cpem-2024.pdf?v=1722372164>
- [8] Borotkanych, N. (2024). *Uso de la teledetección en la industria minera.* Eos Data Analytics. <https://eos.com/uso-de-la-teledeteccion-en-la-industria-minera/>
- [9] Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2023). *Cartera de Proyectos de Exploración Minera 2023.* Dirección de Promoción Minera. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4276044/Cartera%20de%20Proyectos%20de%20Exploraci%C3%B3n%20Minera%202023.pdf?v=1694625965>
- [10] Garrido Asenjo, N. R. (2023). EXPLORACIÓN MINERA: Empresas mineras Junior. *CODEA Comunidad e Innovación en minería.* <https://www.codeauni.com/comunidad/blog/33/>
- [11] Yao, F., Xu, X., Yang, J., & Geng, X. (2021). A remote-sensing-based alteration zonation model of the Duolong porphyry copper ore district, Tibet. *Remote Sensing*, 13(24), 5073. <https://doi.org/10.3390/rs13245073>
- [12] Alarifi, S. S., Abdelkareem, M., Abdalla, F., Abdelsadek, I. S., Gahlan, H., Al-Saleh, A. M., & Alotaibi, M. (2022). Fusion of multispectral remote-sensing data through GIS-based overlay method for revealing potential areas of hydrothermal mineral resources. *Minerals*, 12(12), 1577. <https://doi.org/10.3390/min12121577>
- [13] Fan, Y.H., & Wang, H. (2020). Application of remote sensing to identify copper-lead-zinc deposits in the Heiqia area of the West Kunlun Mountains, China. *Scientific Reports*, 10(1), 12309. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68464-7>
- [14] Safari, M., Maghsoudi, A., & Beiranvand Pour, A. (2017). Application of Landsat-8 and ASTER satellite remote sensing data for porphyry copper exploration: A case study from Shahr-e-Babak, Kerman, south of Iran. *Geocarto International*. <https://doi.org/10.1080/10106049.2017.1334834>
- [15] Shebl, A., Abdellatif, M., Badawi, M., Dawoud, M., Fahl, A. S., & Csámer, Á. (2023). Towards better delineation of hydrothermal alterations via multi-sensor remote sensing and airborne geophysical data. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-023>
- [16] Rodríguez Gallegos, H. J. (2020). Teledetección de alteración hidrotermal para determinar zonas de prospección mineral en el distrito de la Encañada, Cajamarca 2019. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/24114>
- [17] Ríos Franco, A., & Villanueva Raico, K. M. (2022). Identificación de blancos prospectivos, procesando imágenes ASTER, Michiquillay - Cajamarca, 2023. https://www.researchgate.net/Identificacion_de_blanco_prospectivos_en_mineria_aplicando_imagenes_ASTER_Michiquillay_-_Cajamarca_2023
- [18] National Aeronautics and Space Administration (NASA). (s.f.). EARTH DATA SEARCH. <https://search.earthdata.nasa.gov/search>
- [19] Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET). (s.f.). GEOCATMIN. <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>
- [20] Abrams, M., & Yamaguchi, Y. (2019). Twenty years of ASTER contributions to lithologic mapping and mineral exploration. *Remote Sensing*, 11(11), 1394. <https://doi.org/10.3390/rs11111394>
- [21] Gomez, C., Delacourt, C., Allemand, P., Ledru, P., & Wackerle, R. (2004). Using ASTER remote sensing data set for geological mapping, in Namibia. *Physics And Chemistry Of The Earth Parts A/B/C*, 30(1-3), 97-108. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2004.08.042>
- [22] Gelata, F. T., Jiqin, H., Gameda, S. C., & Asefa, B. W. (2023). Application of GIS using NDVI and LST estimation to measure climate variability-induced drought risk assessment in Ethiopia. *Journal of Water and Climate Change*, 14(7), 2479-2489. <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.154>
- [23] Pour, A. B., Park, Y., & Hashim, M. (2020). Integration of Selective Dimensionality Reduction Techniques for Mineral Exploration Using ASTER Satellite Data. *Remote Sensing*, 12(8), 1261. <https://doi.org/10.3390/rs12081261>
- [24] Chen, Q., Zhao, Z., Zhou, J., Zhu, R., Xia, J., Sun, T., Zhao, X., & Chao, J. (2022). ASTER and GF-5 Satellite Data for Mapping Hydrothermal Alteration Minerals in the Longtoushan Pb-Zn Deposit, SW China. *Remote Sensing*, 14(5), 1253. <https://doi.org/10.3390/rs14051253>
- [25] Pei, F., Zhou, Y., & Xia, Y. (2021). Application of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) for the detection of extreme precipitation change. *Forests*, 12(5), 594. <https://doi.org/10.3390/f12050594>
- [26] Mars, J. C., & Rowan, L. C. (2011). Mapping alteration minerals in hydrothermally altered rocks in mountainous terrain using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. *Economic Geology*, 106(3), 421-436.
- [27] Gupta, R. P. (2013). *Remote sensing geology* (3rd ed.). Springer
- [28] Kruse, F. A. (2012). Mapping mineral potential using imaging spectroscopy. *Geological Society of America Bulletin*, 124(11-12), 1686-1698.
- [29] Sabins, F. F. (1999). Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 14(2), 157-183. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(99\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(99)00007-4)
- [30] Campbell, J. B. y Wynne, R.H. (2011). *Introduction to Remote Sensing Fifth Edition.* https://istnrcg.wordpress.com/2019/09/introduction_to_remote_sensing
- [31] Drury, S. A. (2001). *Image interpretation in geology* (3rd ed.). Blackwell Science. <https://Image-Interpretation-in-Geology-3rd-Edition-s-a-Drury>
- [32] Pour, A. B., & Hashim, M. (2012). The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. *Ore Geology Reviews*, 44, 1-9.
- [33] Mars, J. C., y Rowan, L. C. (2006). Regional mapping of phyllic- and argillic-altered rocks in south-central Iraq using ASTER data. *Remote Sensing of Environment*, 100(1), 364-386.
- [34] Kalinowski, A., y Oliver, S. (2004). ASTER mineral index processing manual. *Remote Sensing Applications for Mineral Exploration*, 52-65.
- [35] NASA SeaDAS. (s.f.). SAM Processor - SeaDAS. <https://seadas.gsfc.nasa.gov/help-8.4.0/sam/SAMProcessor.html>
- [36] Jensen, J. R. (2015). *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective* (4th ed.). Pearson.
- [37] Sabins, F. F. (1999). *Remote sensing: Principles and interpretation. W. H. Freeman.*