



# Identification of prospective targets in mining, applying ASTER images, Michiquillay - Cajamarca, 2023

Rios Franco Albaro, Ing.<sup>1</sup>; Villanueva Raico Karol Mayra, Ing.<sup>2</sup>; Cáceres Pérez Shonel Miguel, Ing.<sup>3</sup>; and Miguel Ricardo Portilla Castañeda, Ing.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca- Perú, N00031868@upn.pe

<sup>2</sup> Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca- Perú, N00037578@upn.pe

<sup>3</sup> Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca- Perú, shonel.caceres@upn.edu.pe

<sup>4</sup> Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca- Perú, miguel.portilla@upn.edu.pe

*Abstract – This work uses remote sensing as a useful tool in mining exploration, optimizing time, costs, logistics, and accessibility. The objective is to identify prospective targets by processing ASTER images in the Michiquillay area in the department of Cajamarca, Peru. The research is of an applied type, with a quantitative approach of descriptive scope and non-experimental design, having the ASTER image as the population. The combination of RGB 321 bands identifies oxides; the RGB 468 combination highlights hydrothermal alteration, revealing five areas of interest. Applying band mathematics  $(B4+B6)/B5$  (advanced argillic alteration),  $(B5+B7)/B6$  (phyllic alteration),  $(B7+B9)/B8$  (propylitic), three areas were evidenced that coincide with areas highlighted by band combination. In addition, the combination of band ratios  $4/6, 5/8, 3/4; 7/6, 5/6, 9/8; 4/2, 4/5, 5/6; 6/5, 7/6, 5/8$  was applied, detecting four areas, three of which were already identified and a new area to the north of the study area. These results show a high relationship between the three applied methods. In conclusion, the combination of bands, band mathematics, and band ratio combination allowed the identification of a total of six prospective areas of interest located to the northwest, southeast, southwest, and north of the study area.*



*Keywords – ASTER, exploration, remote sensing, porphyries, hydrothermal alteration.*

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).

**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).

**DO NOT REMOVE**

# Identificación de blancos prospectivos en minería, aplicando imágenes ASTER, Michiquillay - Cajamarca, 2023

Rios Franco Albaro, Ing.<sup>1</sup>; Villanueva Raico Karol Mayra, Ing.<sup>2</sup>; Cáceres Pérez Shonel Miguel, Ing.<sup>3</sup> ; and Miguel Ricardo Portilla Castañeda, Ing.<sup>4</sup> 

<sup>1</sup> Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca- Perú, N00031868@upn.pe

<sup>2</sup> Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca- Perú, N00037578@upn.pe

<sup>3</sup> Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca- Perú, shonel.caceres@upn.edu.pe

<sup>4</sup> Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca- Perú, miguel.portilla@upn.edu.pe

**Resumen – El presente trabajo emplea la teledetección como herramienta útil en la exploración minera, optimizando tiempo, costos, logística y accesibilidad. El objetivo es identificar blancos prospectivos procesando imágenes ASTER en la zona de Michiquillay en el departamento de Cajamarca, Perú. La investigación es de tipo aplicada, con un enfoque cuantitativo de alcance descriptivo y diseño no experimental, teniendo como población la imagen ASTER. La combinación de bandas RGB 321 identifica óxidos; la combinación RGB 468 resalta alteración hidrotermal, revelando cinco zonas de interés. Aplicando matemática de bandas (B4+B6)/B5 (alteración argílica avanzada), (B5+B7)/B6 (alteración filica), (B7+B9)/B8 (propílica), se evidenció tres zonas que coinciden con áreas resaltadas mediante combinación de bandas. Además, se aplicó la combinación de cocientes de bandas 4/6, 5/8, 3/4; 7/6, 5/6, 9/8; 4/2, 4/5, 5/6; 6/5, 7/6, 5/8, detectando cuatro zonas, de estas tres ya identificadas y una nueva zona al norte del área de estudio. Estos resultados evidencian una alta relación entre los tres métodos aplicados. En conclusión, la combinación de bandas, matemática de bandas y combinación de cocientes de bandas permitieron identificar en total seis zonas de interés prospectivo ubicadas al noroeste, sureste, suroeste y al norte de la zona de estudio.**

**Palabras Clave – ASTER, exploración, teledetección, pórfidos, alteración hidrotermal.**

## I. INTRODUCCIÓN

La demanda de minerales, tales como cobre, neodimio, zinc, plomo y hierro, se espera que experimente un incremento cercano al 200 % para el año 2050, para satisfacer la creciente demanda de tecnologías de energía limpia. Se estima que se requerirán más de 3000 millones de toneladas de minerales para la implementación de energías limpias; así como, su almacenamiento para lograr una reducción de la temperatura por debajo de los 2 °C en el futuro [1].

En consecuencia, para los próximos años se pronostica un crecimiento de inversión en exploración a nivel mundial de entre 5% y 15% cada año [2]. En este contexto global, el Perú cuenta con 63 proyectos de exploración minera ubicados en 17 regiones del país. El norte comprende la mayor inversión en exploración con el 34.5% del total de la inversión con 7 proyectos equivalente a US \$202 millones [3].

Las experiencias del uso de imágenes de satélite en la exploración de minerales datan de muchos años atrás (Década del 70 y 80) con el lanzamiento de los satélites LANDSAT, cuyas imágenes fueron utilizadas para detectar posibles zonas con presencia de mineral [4]. La teledetección es una ciencia cuyo propósito es la captura de información espectral de cualquier objeto situado a distancia, normalmente de la cubierta terrestre, y su tratamiento con el objetivo de medir propiedades e identificar características del mismo [5].

Las imágenes de satélite complementan a los datos geológicos, litológicos, estructurales, geofísicos, tectónicos, geoquímicos y petrográficos, con el fin de apoyar y optimizar la exploración geológico-minera, detectando las áreas de alteración de la tipología del yacimiento de interés [6]. En la exploración por yacimientos minerales, estas imágenes son especialmente útiles, ya que el rango en el espectro electromagnético en el que los sensores multispectrales tienen la capacidad de registrar datos es donde la reflexión de ciertos minerales de alteración hidrotermal es más característica [7].

El procesamiento digital de las imágenes ASTER consiste en operaciones que transforman una imagen en otra donde se resalta cierta información de interés, y se atenúa o elimina información irrelevante para la aplicación. Así, las tareas del procesamiento de imágenes comprenden la supresión del ruido, mejoramiento de contraste, eliminación de efectos no deseados en la captura como iluminaciones o distorsiones por efectos ópticos o de movimiento, mapeos geométricos, transformaciones de calor [8].

ASTER posee tres subsistemas de sensores: VNIR, SWIR y TIR. El subsistema VNIR cuenta con dos telescopios, uno con visión nadir y el otro con visión hacia atrás, mientras que los sensores SWIR y TIR tienen un solo telescopio cada uno. El VNIR obtiene imágenes del visible e infrarrojo cercano (0.52-0.86  $\mu\text{m}$ ) en tres bandas con una resolución espacial de 15 metros, además tiene una banda adicional que permite visión estereoscópica y la generación del Modelo Digital de Terreno de cada escena. El SWIR registra la información en 6 bandas del infrarrojo de onda corta (1.600-2.430  $\mu\text{m}$ ) con una resolución espacial de 30 metros. El TIR obtiene datos en 5

bandas en la región del infrarrojo térmico (8.125-11.65  $\mu\text{m}$ ) con una resolución espacial de 90 metros [9].

En ese sentido, la importancia del uso de la teledetección, particularmente de las imágenes satelitales Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection (ASTER) en la detección minerales de áreas de alteración, resulta de gran utilidad al focalizar y proporcionar una aproximación precisa y fiable de los resultados en las etapas iniciales de los proyectos de exploración minera [10] en áreas extensas, caracterizadas por relieves muy accidentados y problemas de acceso. Esto conduce a una reducción significativa en los tiempos y costos asociados a las campañas exploratorias [11].

La presente investigación pretende, identificar zonas con minerales de alteración procesando imágenes ASTER en los alrededores de Michiquillay. Para ello se tiene como objetivos específicos determinar blancos prospectivos aplicando los métodos de combinación de bandas, matemática de bandas y combinación de cocientes de bandas. Con esta información establecer un mapa temático con las zonas de alteración hidrotermal identificadas en el área de estudio.

La investigación puede servir como guía de trabajos en teledetección utilizando imágenes ASTER, así como también de material de consulta para estudios geológicos de prospección y exploración en el área de estudio.

## II. METODOLOGÍA

Con el fin de conseguir resultados confiables, se realizó una exhaustiva búsqueda de bibliografía y se seleccionó una imagen ASTER, verificando meticulosamente sus metadatos y tomando en cuenta el año, fecha y el porcentaje de nubosidad que presenta. La imagen ASTER de fecha 06/06/2007 se obtuvo a través del sitio web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), la cual es de libre descarga accesible mediante el enlace: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

Posteriormente, se realiza el preprocesamiento de la imagen en el software ENVI 5.3. Esta etapa incluye el remuestreo con la finalidad de fusionar las 14 bandas de la imagen usando la herramienta Layer Stacking (Fig. 1A), con la herramienta Resize Data se hace un recorte de la imagen según el área de estudio; aplicamos corrección atmosférica para corregir los errores de la imagen producido por los elementos suspendidos en la atmósfera, empleando la herramienta Flat Field Correction (Fig. 1C); con el (NDVI) índice de vegetación diferencial normalizada [12] aplicamos la ecuación  $\text{NDVI} = (B3 - B2) / (B3 + B2)$  para generar la máscara de vegetación (Fig. 1F); y enmascaramiento de cuerpos de agua, evitando así errores durante el procesamiento de identificación de los minerales de alteración.

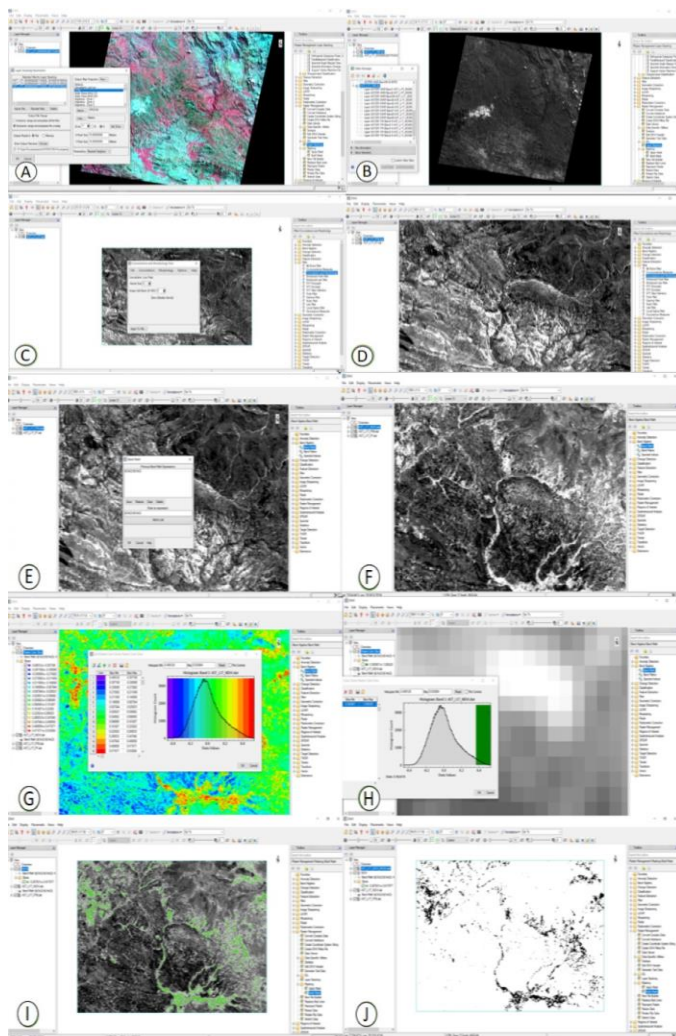


Figura 1. Preprocesamiento de la imagen ASTER. A) Uso de Layer Stacking. B) Nuevo archivo multibanda con las 14 bandas unidas. C) Mejoramiento de la calidad de la imagen. D) Imagen con corrección atmosférica y valores en reflectancia. E) Uso de la herramienta Band Math. F) Resultado de la aplicación de la ecuación NDVI. G) Uso de la herramienta New Raster Color Slice. H) Búsqueda de los rangos mínimo y máximo. I) Zonas de vegetación resaltadas en verde. J) Producto final máscara de vegetación.

Con la imagen ya preprocesada según los pasos señalados, se desarrolla el procesamiento de los datos, utilizando técnicas como Combinación de Bandas, Matemática de bandas, y Combinación de Cocientes de Bandas usando las herramientas Decorrelation Stretch, Band Math, Band Ratios, Apply Mask.

## III. RESULTADOS

### A. Ubicación

El área de estudio abarca una extensión de 260  $\text{km}^2$  y se encuentra principalmente sobre las Comunidades Campesinas Michiquillay y La Encañada ubicadas en el distrito de la Encañada, provincia y departamento de Cajamarca. Además, se ha incluido los distritos colindantes al noreste con Sorochuco y



Sucre que pertenecen a la provincia de Celendín, departamento de Cajamarca; y al sur oeste con el distrito de Baños del Inca, provincia y departamento de Cajamarca, Perú.

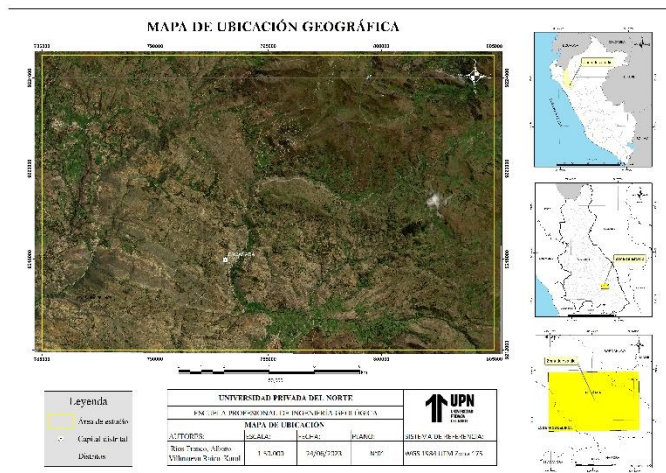


Figura 2. Mapa de ubicación geográfica de la zona de estudio.

### B. Geología

En el área de estudio afloran rocas sedimentarias del Mesozoico (Cretáceo) y Cenozoico. Durante el Mesozoico, se inicia la sedimentación de la cuenca peruana subsidente que comenzó en el Jurásico Superior y prosigue hasta el Cretácico Superior. Durante el Valanginiano inferior al Albiano, se inicia la sedimentación de naturaleza silicoclásticas con niveles carbonatados, incluyendo areniscas y lutitas intercaladas con calizas del Grupo Gollarisquizga del Cretácico inferior, el cual está constituido por 4 formaciones: La formación Chimú (Valanginiano inferior) está compuesta principalmente por cuarcitas en la parte superior, areniscas, lutitas y niveles de carbón en la parte inferior, con potencias entre 80 a 600 metros; la formación Santa (Valanginiano medio) está conformada por lutitas grises y calizas margosas, sobreyace a la formación chimú e infrayace a la formación Carhuáz, en ambos casos con discordancia paralela; la formación Carhuáz (Valanginiano superior) presenta areniscas rojizas y cuarcitas blancas intercaladas, con un espesor de 500 metros; y la formación Farrat del Aptiano, constituida por cuarcitas y areniscas blancas.

Posteriormente, entre el Albiano y el Aptiano, se da inicio a una importante transgresión marina que dio lugar a los estratos de las formaciones calcáreas, como la Formación Inca, caracterizada por la intercalación de areniscas calcáreas con lutitas ferruginosas, presentando en superficie un matiz rojizo, con evidente acción de limonitización. Esta formación es producto de la transgresión entre la cordillera Occidental y la región subandina, y yace concordantemente a la Formación Chúlec, caracterizada por presentar una litología fosilífera calizas, areniscas calcáreas, margas y lutitas de color blanquecino a gris parduzco, con calizas margosas de color

pardo en la parte superior. Esta formación es rica en fósiles, como amonites, exógyras y bivalvos, que indican la edad del Albiano Medio e infrayace concordantemente a la Formación Pariatambo, constituida por lutitas grises o negras y calizas bituminosas nodulares, la cual, a su vez, subyace con suave discordancia a las formaciones del Cretáceo superior Grupo Pullucana, conformada por calizas gris parduscas, fosilíferas, margas y escasos niveles de lutitas.

La formación Quilquiñán conformado por calizas nodulares macizas, margas y lutitas pardo amarillentas fosilíferas y yacen en concordancia la Formación Cajamarca del Cretáceo superior, la cual está constituida por calizas gris oscuras o azuladas macizas con delgados lechos de lutitas y margas. Esta formación le sobreyace concordantemente a la Formación Celendín que consiste en lutitas, margas y calizas delgadas de color claro, amarillento con abundantes fósiles [13].

Sobre el Grupo Calipuy, se tiene a los volcánicos Huambos del Neógeno, constituido por tobas brechoides de colores blanco grisáceo, dispuestos en bancos gruesos deleznable, de composición traquítico-andesítica y presentan una disposición subhorizontal. En discordancia sobre los volcánicos Huambos, descansan las secuencias lacustres con un buen contenido de ostrácodos, gasterópodos y lamelibranquios de agua dulce, con algunos horizontes de diatomeas, contiene delgadas intercalaciones de lechos carbonosos, notándose restos de tallos no determinados [14].

Finalmente, sobreyaciendo a las unidades anteriormente descritas, están los depósitos aluviales, coluviales, eólicos, glaciares, fluviales y lacustres. Estos depósitos están compuestos principalmente por material sedimentario, como arenas y gravas.

El corredor estructural Michiquillay se encuentra relacionado a la falla canches Punre [15] durante el cretácico se dio este sistema de fallas sinestrales que habría originado en un margen extensional formando cuencas tectónicas de tipo Pull apart [16] durante el Cenozoico hubo una reactivación de las fallas normales mediante una inversión tectónica positiva. Siendo uno de los factores principales la velocidad de convergencia de placas en este periodo [17]. Estos movimientos que se generaron durante la etapa extensional habrían generado espacios para el control exclusivamente para la mineralización de pórfidos [18].

### C. Procesamiento de imágenes

Combinación de Bandas: Al combinar las bandas 321 en el RGB respectivamente, se obtiene como respuesta una zona de oxidación (hematita, jarosita, goetita) representado por los pixeles con tonalidades de color amarillo y en tonos rojos se resalta la vegetación [19]. En la zona de estudio, se ha determinado 4 zonas de interés prospectivo: la zona 1, 2 y 3 poseen una determinada dirección NW-SE, mientras que la

zona 4 se encuentra ubicada al sur con dirección de SW (Fig. 3A). Con la combinación RGB con las bandas 468, se resaltan en tonos rojos la alteración argílica y en tonos rosados la mezcla de las alteraciones argílica y filica; mientras que el color verde representa la alteración propilítica, así como posibles combinaciones de estos colores [20]. Se identifica 5 zonas de interés donde se evidencia alteración filica (azul) acompañada de alteración argílica en 60% (magenta) con tendencia N-W y S-E en las zonas 1, 2, 3 y 4, y la zona 5 con dirección de SW. Para la interpretación de colores resultantes se utiliza el siguiente cubo espectral (Fig. 3B).

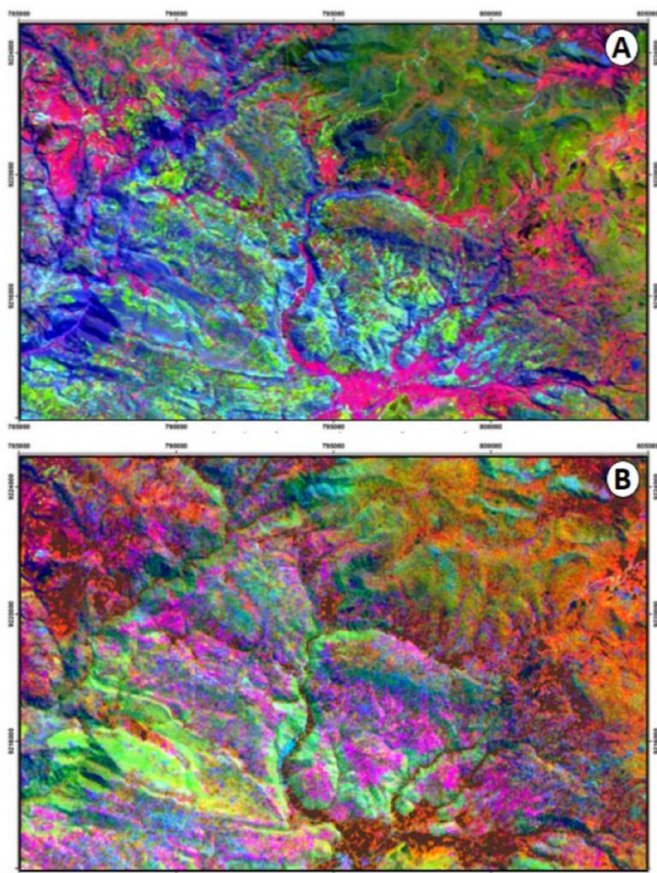


Figura 3. Mapas de Combinación de Bandas. A) Combinación de las bandas 321 en el RGB, B) Combinación de las bandas 468 en el RGB.

**Matemática de Bandas:** La imagen obtenida resalta colores múltiples del RGB, mostrando el resultado de la ecuación  $(B4+B6)/B5$ , representando la alteración argílica avanzada con el color rojo; la ecuación  $(B5+B7)/B6$ , muestra la alteración filica representado por el color verde y la ecuación  $(B7+B9)/B8$  donde se obtiene la alteración propilítica representada por el color azul [21]. Los resultados obtenidos permiten identificar 3 zonas de alto potencial en blancos prospectivos, donde resaltan tonos verdes que se asocian a la alteración filica predominantemente al oeste (Fig. 4).

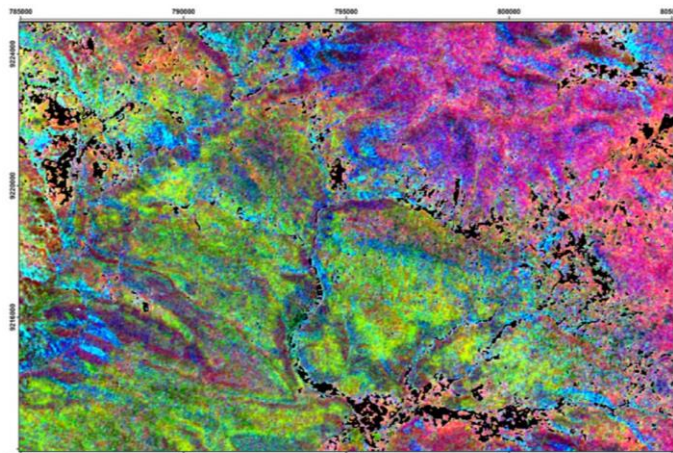


Figura 4. Mapa de Matemática de Bandas.

**Combinación de Cocientes de Bandas:** El resultado de obtener los cocientes 4/6 representa la moscovita y arcillas en color rojo [22], el cociente 5/8 representa la epidota, clorita y calcita en color verde [23], y el cociente 3/4 representa la roca inalterada en color azul [20]. Se identifica 3 zonas de interés que presentan una fuerte relación con píxeles rojos, lo que representa minerales arcillosos y de alteración como la moscovita. La zona 1 se encuentra al norte del área de estudio, la zona 2 con tendencia de NW a SE y la zona 3 ubicada al suroeste. Alrededor de estas zonas se resaltan alteraciones propilítica (Fig. 5A). El cociente de bandas 7/6 representa la moscovita asociada a la alteración filica representada en el color rojo, el cociente 5/6 representa la caolinita y la alteración argílica en color verde [24], y el cociente 9/8 representa la epidota y la calcita de la alteración propilítica en color azul [25]. Se delimita 3 zonas de interés que están influenciados por la alteración filica. La primera zona ubicada al norte, la segunda zona hacia el NW-SE y la tercera al SW (Fig. 5B).

En la imagen obtenida de los cocientes de bandas, el cociente 4/2 representa óxidos de hierro en color rojo, el cociente 4/5 representa la alteración hidrotermal en color verde y el cociente 5/6 representa roca caja identificada por el color azul [26]. Se identifica 3 zonas: la zona 1 al NW, la zona 2 SE y la zona 3 al sur. Se evidencia presencia de óxidos en dirección SW-NE (Fig. 5C). El resultado del cociente de banda 6/5 representa la alunita en color rojo, el cociente de banda 7/6 representa la moscovita en color verde y el cociente de banda 5/8 representa la clorita caracterizada por color azul [27]. Se identifica 2 zonas. La zona 1 con dirección NW-SE y la zona 2 al suroeste. Ambas zonas se caracterizan por afloramientos de alunita (Fig. 5D).



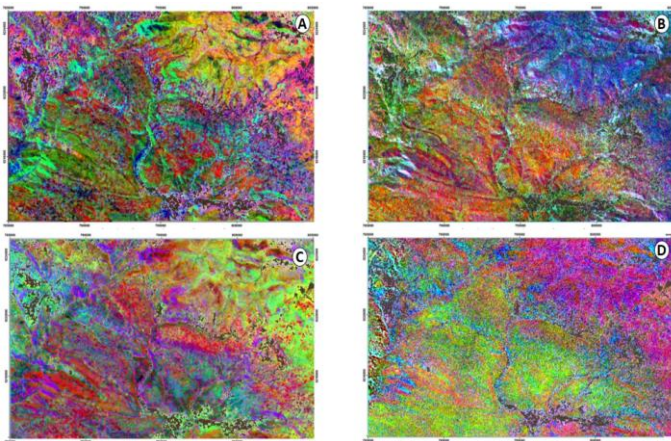


Figura 5. Mapas de Combinación de Bandas. A) Combinación de los cocientes 4/6, 5/8, 3/4, B) Combinación de los cocientes 7/6, 5/6, 9/8, C) Combinación de los cocientes 4/2, 4/5, 5/6. D) Combinación de los cocientes 6/5, 7/6, 5/8.

Mediante la combinación de bandas se identificaron 4 zonas de óxidos de hierro y 5 zonas con asociaciones mineralógicas característicos de alteración hidrotermal; con el método de matemática de bandas se identificaron 3 zonas de alteraciones hidrotermal y con el método de combinación de cocientes de bandas se identificaron en total 4 zonas de alteración hidrotermal. Estas zonas, se encuentran en los siete mapas que resaltan las anomalías espectrales asociadas a la presencia de minerales hidratados, óxidos e hidróxidos de hierro y arcillas. Al superponer los siete mapas resultantes, se evalúa zonas comunes de anomalías espectrales lo que permite determinar las zonas de interés final.

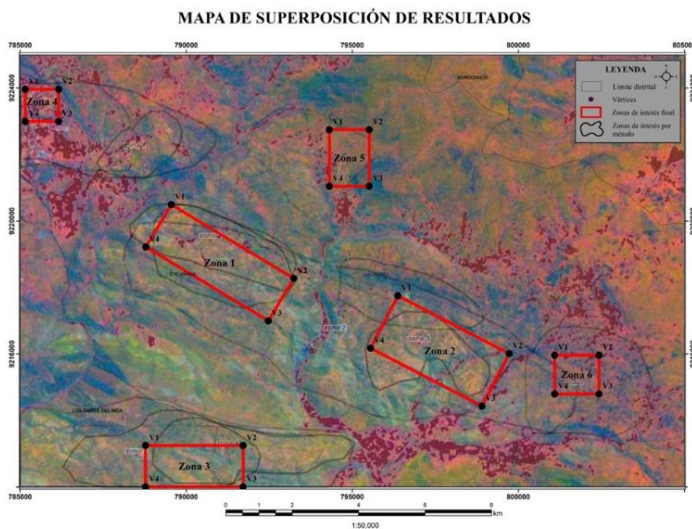


Figura 6. Mapa de superposición de resultados.

Las 6 zonas finales de interés prospectivo que presentan anomalías espectrales, indican presencia de óxidos de hierro (hematita, goetita, jarosita) y alteración argílica y filica que se

presentan en el mapa final de blancos prospectivos (Fig. 6). Estas zonas se determinaron según la superposición de mapas generados a través de los tres métodos aplicados, es decir, según el número de veces que fueron identificadas por cada método. Las coordenadas de las 6 zonas de interés prospectivo se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1.

Coordenadas de las zonas de blancos prospectivos.

VÉRTICES DE ZONAS DE INTERÉS			
Zonas de interés	Vértices	Este	Norte
ZONA 1	V1	789551	9220497
	V2	793239	9218275
	V3	792469	9216999
	V4	788783	9219221
ZONA 2	V1	796374	9217757
	V2	799727	9216011
	V3	798905	9214433
	V4	795552	9216178
ZONA 3	V1	788773	9213249
	V2	791712	9213249
	V3	791712	9212004
	V4	788773	9212004
ZONA 4	V1	785152	9223967
	V2	786158	9223967
	V3	786158	9222997
	V4	785152	9222997
ZONA 5	V1	792112	9220107
	V2	793129	9220107
	V3	793129	9219324
	V4	792112	9219324
ZONA 6	V1	801095	9215965
	V2	802430	9215965
	V3	802430	9214800
	V4	801095	9214800

Para evaluar el grado de confiabilidad de las 6 zonas de interés, se consideró el criterio de coincidencia entre los métodos aplicados (Tabla 2), es decir, el número de veces que cada zona fue identificada por cada uno de los tres métodos: combinación de bandas, matemática de bandas y combinación

de cocientes de bandas (Fig. 6). De acuerdo a este criterio, se encontró que la zona de interés 3 es la más confiable, al ser identificada por los tres métodos en los siete mapas. Le siguen las zonas 1 y 2, que fueron identificadas por los tres métodos, pero solo en seis mapas cada zona, lo que implica una confiabilidad del 86 %. La zona de interés 4 fue identificada por los tres métodos, pero solo en tres mapas, lo que implica una confiabilidad del 43 %. La zona 5 fue identificada en dos mapas del método de combinación de cocientes de bandas, lo que implica una confiabilidad del 29 %. Finalmente, la zona 6 fue identificada solo por el método de combinación de bandas, lo que implica una confiabilidad del 14 %.

Tabla 2.

Cuadro de confiabilidad de las zonas de interés según el método.

Zonas de interés	Identificación según métodos de procesamiento							N° de identificaciones	Porcentaje de confiabilidad respecto al n° de identificaciones
	Combinación de bandas		Matemática de bandas	Combinación de cociente de bandas					
	Mapa 1	Mapa 2	Mapa 3	Mapa 4	Mapa 5	Mapa 6	Mapa 7		
Z1	1	1	1	1	1		1	6	86 %
Z2	1	1	1	1		1	1	6	86 %
Z3	1	1	1	1	1	1	1	7	100 %
Z4		1	1				1	3	43 %
Z5				1	1			2	29 %
Z6		1						1	14 %

#### IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A través del análisis de la imagen satelital ASTER obtenida, ha sido posible identificar zonas al suroeste que presentan diferentes alteraciones hidrotermales características de depósitos tipo pórvido y que representan blancos prospectivos en la zona de estudio. Asimismo, se han identificado otras zonas favorables para blancos prospectivos con dirección dominante de noroeste y sureste.

En la búsqueda de zonas con alteración hidrotermal, Bazán y Torres (2022) [28] aplican combinación RGB en las Bandas 461 con el propósito de identificar alteraciones hidrotermales. Por otro lado, Huanacuni (2014) [29] utiliza los cocientes de las bandas 4/6 y 5/6 para detectar alteración argílica y filíca, respectivamente. En ese sentido, ambos enfoques coinciden con los métodos empleados en esta investigación para identificar áreas que presentan alteraciones hidrotermales en la zona de estudio.

En conclusión, se identificaron 6 zonas de interés con potencial mineralógico, las zonas de interés 1 y 4 se localizan al noroeste, las zonas 2 y 6 al sureste, la zona 3 al suroeste y la zona 5 al norte de la zona de estudio. Por las características naturales que presenta el terreno como cobertura vegetal, cuerpos de agua entre otros, su alcance no es general para toda área de estudio. Además, las características geológicas de menor escala podrían no ser captadas, lo que podría afectar la

precisión de los mapas resultantes. Es así, que a pesar de que los resultados del análisis y procesamiento de las imágenes es un indicador valioso para identificar potenciales zonas mineralizadas, se recomienda realizar estudios de campo y análisis geológicos detallados con equipos especializados de espectrometría.

Mediante el método de combinación de bandas se identificó óxidos (hematita, goetita, jarosita), alteración filíca y argílica (cuarzo, sericita, piritita, arcillas). Con el método de matemática de bandas se detectó zonas con alteración filíca. Finalmente, con el método de combinación de cocientes de bandas se identificó zonas con alteraciones hidrotermales. Los tres métodos aplicados mostraron una alta relación entre las zonas de interés identificadas.

Se elaboró un mapa temático de las zonas de interés identificadas. Estas zonas presentan diferentes grados de confiabilidad según el número de mapas en los que fueron identificadas. Siendo la zona 3 la más confiable, mientras que las zonas 1 y 2 muestran una confiabilidad del 86 %. La zona 4 tiene una confiabilidad del 43 %, la zona 5 muestra una confiabilidad del 29 %, y finalmente, la zona 6 tiene una confiabilidad del 14 %.

#### -REFERENCIAS

- [1] Hund, K., La Porta, D., Fabregas, T., Laing, T., & Drexhage, J. (2020). The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition. World Bank Group.
- [2] Tiempo Minero. (21 de Octubre de 2021). Inversión en exploración minera mundial crecerá en el 2022 estima S&P. Obtenido de <https://camiper.com/tiempominero-noticias-en-mineria-para-el-peru-y-el-mundo/inversion-en-exploracion-minera-mundial-crecera-en-el-2022-estima-sp/>
- [3] MINEM. (2022). Boletín Estadístico Minero. Edición N° 02. Ministerio de Energía y Minas. Obtenido de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2997434/BEM02-2022.pdf.pdf?v=1649258385>
- [4] Vargas, C., Diaz, M., & Loaiza, Y. (2010). Mapeo de minerales utilizando imágenes hyperion y aster en Castrovirreyna - Huancavelica (Peru).
- [5] Quiroz, E.(2009). Clasificación de Imágenes multispectrales ASTER mediante funciones adaptativas. Universidad de Extremadura, España.
- [6] Origel, G., & Sánchez, E. (2010). Guía metodológica para la detección de áreas de alteración minera con imágenes aster. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- [7] Mendivil, H. (2012). Uso de imágenes satelitales aplicadas a la exploración por yacimientos minerales, México.
- [8] Paico, L. (2022). Determinación de zonas de alteración hidrotermal mediante imágenes aster y landsat en el distrito de Tantarica - provincia de Contumazá. Universidad Nacional de Cajamarca, Perú.
- [9] Marquetti, C. (2005). Metodología y analisis de imagenes aster para la exploración mineral en un sector de la cordillera de Colangüil, San Juan, Argentina.
- [10] Mohamed El-Desoky, H., Soliman, N., Ahmed Heikal, M., & Moustafa Abdel-Rahman, A. (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. doi:10.1016/j.jaesx.2021.100060.
- [11] Traore, M., Çan, T., & Tekin, S. (2022). Mapping carbonate-hosted Pb-Zn mineralization zones in Yahyalı Province (Eastern Taurus - Turkey) using ASTER data. Advances In Space Research, 69, 266-281. doi:10.1016/j.asr.2021.07.034

- [12] Ninomiya, Y. (2004). Lithologic mapping with multispectral ASTER TIR and SWIR data. Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering, 5234, 180-190.
- [13] Benavides, V. (1956). Cretaceous system in Northern Peru (Vol. 108). New York: American Museum of Natural History Bulletin
- [14] Reyes Rivera, L. (1980). Boletín N°31 Geología de los cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba Hojas:(15-f, 15-g y 16-g). Lima, Perú: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Obtenido de [https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/150/54/A-031-Boletin\\_Cajamarca-15f\\_San\\_Marcos-15g\\_Cajabamba-16g.pdf](https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/150/54/A-031-Boletin_Cajamarca-15f_San_Marcos-15g_Cajabamba-16g.pdf)
- [15] Rivera Cornejo, R. (2008). Geoquímica Isotópica de Plomo en los Pórfidos Miocénicos del Norte del Perú-Región Cajamarca. International Programa ALFA. Obtenido de <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/TE0104.pdf>
- [16] Wilson, J. J. (2002). Structural development of the Northern Andes of Peru. X Congreso Peruano de Geología. Lima, Perú.
- [17] Hampel, A. (2002). The migration history of the Nazca Ridge along the Peruvian active margin: are-evaluation. Earth and Planetary Sciences letters, 665 – 679.
- [18] Davies, R., & Williams, P. (2005). The El Galeno and Michiquillay porphyry Cu-Au-Mo deposits: geological descriptions and comparison of Miocene porphyry systems in the Cajamarca district, northern Peru. Mineralium Deposita .
- [19] Vargas Gonzáles, C. (2009). Mapeo de minerales utilizando datos ASTER y análisis espectral en el distrito de Yura, Arequipa, Perú. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (págs. 3213-3218). Natal, Brasil: INPE. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/228831965\\_Mapeo\\_de\\_minerales\\_utilizando\\_datos\\_ASTER\\_y\\_analisis\\_espectral\\_en\\_el\\_distrito\\_de\\_Yura\\_Arequipa\\_Peru](https://www.researchgate.net/publication/228831965_Mapeo_de_minerales_utilizando_datos_ASTER_y_analisis_espectral_en_el_distrito_de_Yura_Arequipa_Peru)
- [20] Tommaso, I.D., & Rubinstein, N. (2007). Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit. Argentina: Ore Geology Reviews, 32, 275–290. doi:10.1016/j.oregeorev.2006.05.004
- [21] Mars, J. C., & Rowan, L. C. (2006). Regional mapping of phyllic- and argillic-altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data and logical operator algorithms. Geosphere, 2, 161-186. Obtenido de <https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/geosphere/article/2/3/161/31132/Regional-mapping-of-phyllic-and-argillic-altered>
- [22] Cudahy, T.J., Jones, M., Thomas, M., Laukamp, C., Caccetta, M., Hewson, R.D., Verrall, M., Hacket, A., & Rodger, A. (2008). Mineral Mapping Queensland: IOCG Mineral System Case History, Starra, Mount Isa Inlier. PACRIM conference, Jupiters Casino, 24-26.
- [23] Rowan, L., Schmidt, R., Mars, J. (2006). Distribution of hydrothermally altered rocks in the Reko Diq, Pakistan, mineralized area based on spectral analysis of ASTER data. Remote Sens Environ, 104, 74–87.
- [24] Hewson, R., Cudahy, T., Mizuhiko, S., Ueda, K., Mauger, A., (2005). Seamless geological map generation using ASTER in the Broken Hill–Cumamona province of Australia, Remote Sens. Environ, 99, 159–172.
- [25] VanRuitenbeek, F., Debba, P., van der Meer, F., Cudahy, T., vander Meijde, M. & Hale, M., (2006). Mapping white micas and their absorption wavelengths using hyperspectral band ratios. Remote Sensing of Environment, 102, 211–222.
- [26] Velosky, J., Stern, R. & Johnson, P. (2003). Geological control of massive sulfide mineralization in the Neoproterozoic Wadi Bidah shear zone, southwestern Saudi Arabia, inferences from orbital remote sensing and field studies, 123, 235–247.
- [27] Crosta, P. & Filho, C. (2003). Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis: Int. J. Remote Sensing, 24, 4233–4240.
- [28] Bazán Santa Cruz, O., & Torres Guerra, J. A. (2022). Modelo genético del prospecto Cerro Colorado Chico: Un aporte a la exploración en la costa norte del Perú. Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas, 25(49), 31-43. doi:10.15381/iigeo.v25i49.21977
- [29] Huanacuni Mamani, D. H. (2014). Aplicación de las imágenes aster para la determinación de alteraciones hidrotermales en la franja metalogénica de yacimientos epitermales de la cordillera occidental del