



FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

**TÉCNICAS ESPECTRALES PARA LA UBICACIÓN DE ALTERACIONES HIDROTERMALES
EN LA COMUNIDAD CAMPESINA DE HUANZA, HUAROCHIRI – LIMA**

Línea de investigación:

Procesamiento digital de imágenes y señales

Trabajo de suficiencia profesional para optar el título profesional de Ingeniero Geógrafo

Autor:

Agüero Farias, Roberto Andree

Asesor:

Sánchez Cabrera, Dante Pedro

ORCID: 0000-0002-1241-0483

Jurado:

Zevallos Paredes, Jhon

Hinojosa Pedraza, Karina Ines

Diaz Villalobos, Carlos

Lima - Perú

2024



AGUERO FARIAS

INFORME DE ORIGINALIDAD

22%

INDICE DE SIMILITUD

21%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	9%
2	www.dspace.uce.edu.ec Fuente de Internet	5%
3	documents.mx Fuente de Internet	1%
4	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	repositorio.unc.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	Submitted to Universidad Nacional Federico Villarreal Trabajo del estudiante	1%
7	app.ingemmet.gob.pe Fuente de Internet	<1%
8	www.desenredando.org Fuente de Internet	<1%
9	idoc.pub Fuente de Internet	



Universidad Nacional
Federico Villarreal

VRIN | VICERRECTORADO
DE INVESTIGACIÓN

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y
ECOTURISMO**

“TÉCNICAS ESPECTRALES PARA LA UBICACIÓN DE ALTERACIONES
HIDROTERMALES EN LA COMUNIDAD CAMPESINA DE HUANZA,
HUAROCHIRI – LIMA”

Línea de investigación:

Procesamiento digital de imágenes y señales

Suficiencia profesional para optar por el título de Ingeniero Geógrafo

Autor:

Agüero Farias, Roberto Andree

Asesor:

Sánchez Cabrera, Dante Pedro
ORCID 0000-0002-1241-0483

Jurado:

Zevallos Paredes, Jhon
Hinojosa Pedraza, Karina Ines
Diaz Villalobos, Carlos

Lima - Perú

2024

Índice

Índice	2
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Trayectoria del Autor	1
1.2. Descripción de la empresa donde labora o laboró.....	1
II. DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD ESPECÍFICA: TÉCNICAS ESPECTRALES PARA LA UBICACIÓN DE ALTERACIONES HIDROTERMALES	
4	
2.1. Objetivos	5
2.1.1. Objetivo general	5
2.1.2. Objetivos específicos	5
2.2. Antecedentes	5
2.3. Metodología	8
2.3.1. Alteración hidrotermal.....	8
2.3.2. Teledetección.....	8
2.3.3. Espectro Electromagnético	9
2.3.4. Sensor Aster.....	10
2.3.5. Subsistema Infrarrojo Visible y Cercano (VNIR)	11
2.3.6. Subsistema Infrarrojo de Onda Corta (SWIR)	11
2.3.7. Subsistema Infrarrojo Termal (TIR).....	12
2.3.8. Área de estudio	13
2.3.9. Etapas de metodología.....	14
2.3.10. Adquisición de escena.....	14
2.3.11. Diagrama de Flujo 03. Pre-procesamiento de imagen Aster.	16
2.3.12. Integración de bandas	16
2.3.13. Corrección radiométrica.....	18
2.3.14. Corrección atmosférica	19
2.3.15. Índices espectrales	20
2.3.16. NDVI – Índice normalizado de vegetación	20
2.3.17. NDWI – Índice diferenciado normalizado de agua	22
2.3.18. NDSI – Índice normalizado diferenciado de nieve.....	24
2.3.19. Máscaras	25
2.3.20. Composición de banda RGB para identificación de arcillas	26
2.3.21. Cocientes o ratios de bandas	30

2.3.22.	Índices de identificación litológica SWIR	31
2.4.	Resultados	33
2.5.	Discusión de Resultados.....	40
III.	APORTES DESTACABLES A LA EMPRESA/INSTITUCIÓN	41
IV.	CONCLUSIONES.....	42
V.	RECOMENDACIONES	43
VI.	REFERENCIAS	44
VII.	ANEXOS	46

Índice de figuras

Figura 1 Organigrama de Área de Propiedades y Exploraciones	2
Figura 2 Componentes de un sistema de teledetección.....	9
Figura 3 Espectro electromagnético	10
Figura 4 Características de los subsistemas ASTER (ERSDAC, 2002).....	11
Figura 5 Características espectrales de subsistemas VNIR Y SWIR del sensor ASTER	12
Figura 6 Características espectrales en el subsistema TIR de ASTER.....	12
Figura 7 Mapa ubicación de comunidad campesina de Huanza	13
Figura 8 Etapa inicial: Preparación y preprocesamiento	14
Figura 9 Selección de área de estudio	14
Figura 10 Flujo: Preprocesamiento.....	16
Figura 11 Aplicación de Layerstacking	17
Figura 12 Imagen resultante (integración de bandas VNIR Y SWIR)	17
Figura 13 Área de estudio a considerar en imagen Aster.....	18
Figura 14 Firma espectral en valores de radiancia.....	18
Figura 15 Firma espectral en valores de reflectancia	20
Figura 16 NDVI - Área de estudio.....	21
Figura 17 NDVI - Histograma y estadísticas básicas	22
Figura 18 NDWI - Área de estudio	23
Figura 19 NDWI - Histograma y estadísticas básicas	23
Figura 20 NDSI - Área de estudio.....	24
Figura 21 NDSI - Histograma y estadísticas básicas	25
Figura 22 Mapeo de máscaras (vegetación, agua y nieve).....	26
Figura 23 Escena resultante por eliminación de máscaras	26
Figura 24 Composición RGB 461	27

Figura 25 <i>Composición RGB 469</i>	28
Figura 26 <i>Composición RGB 531</i>	28
Figura 27 <i>Composición RGB 461</i>	29
Figura 28 <i>Composición RGB 461</i>	29
Figura 29 <i>Composición RGB 943</i>	30
Figura 30 <i>Cociente 4/6 – Alteración Argílica a filica</i>	33
Figura 31 <i>Cociente 4/5 – Alteración Argílica avanzada</i>	34
Figura 32 <i>Cociente 5/8 – Alteración Propilítica</i>	34
Figura 33 <i>Cociente 2/1 – Óxidos e hidróxidos de Fe</i>	35
Figura 34 <i>Índice OHla</i>	36
Figura 35 <i>Índice OHlb</i>	37
Figura 36 <i>Índice CLI</i>	37
Figura 37 <i>Índice ALI</i>	38
Figura 38 <i>Índice KLI</i>	39
Figura 39 <i>Integración OHlb - ALI - KLI</i>	39

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Tipos de alteración hidrotermal</i>	8
Tabla 2 <i>Características de imagen seleccionada para área de estudio</i>	15
Tabla 3	19
Tabla 4	31

Dedicatoria

A Emma, por confiar siempre en mí.

Agradecimiento

A Emma, por el apoyo incondicional. A mi alma matter Universidad Nacional Federico Villarreal por todas las enseñanzas brindadas.

Resumen

El informe presentado expone la experiencia profesional del autor en aplicación de técnicas espectrales para la identificación de zonas de alteración hidrotermal, apoyándose de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (GIS). Se abordan temas como la adquisición de imágenes Aster, consideraciones y pre procesamiento aplicado antes de emplear las técnicas espectrales. Se obtuvieron zonas de alteración hidrotermal a partir de cocientes de bandas e índices de identificación litológica SWIR (Shortwave infrared) las cuales fueron asociadas en función de su mineralización y generaron seis zonas de interés para exploración geológica. Las alteraciones identificadas fueron Argilica avanzada, Propolítica y Argilica a filica.

Palabras clave: Técnicas espectrales, exploración geológica, alteración hidrotermal

Abstract

The report presents the author's professional experience in the application of spectral techniques for the identification of hydrothermal alteration zones, supported by Geographic Information Systems (GIS) tools. Topics such as the acquisition of Aster images, considerations and pre-processing applied before using spectral techniques are addressed. Hydrothermal alteration zones were obtained from band ratios and SWIR (Shortwave infrared) lithological identification indexes, which were associated according to their mineralization and generated six zones of interest for geological exploration. The alterations identified were advanced Argilica, Propolítica and Argilica a filica.

Keywords: Spectroscopic techniques, geological exploration, hydrothermal alteration.

I. INTRODUCCIÓN

1.1.Trayectoria del Autor

Bachiller en Ingeniería geográfica por la Universidad Nacional Federico Villarreal, con más de cinco años de experiencia laboral en instituciones públicas y privadas, especializándose en la aplicación de sistemas de información geográfica (GIS) en el sector de recursos hídricos, gestión predial y administración de concesiones mineras. A inicios del año 2018 inició sus actividades ingresando como practicante en la Autoridad Nacional del Agua (ANA), en la Dirección de Administración de Recursos Hídricos (DARH), donde encargó de la elaboración de base de datos geoespacial de los puntos de captación a nivel nacional, como parte del proyecto de Red Hidrométrica Nacional.

A inicios del año 2019 ingresa a laborar a la consultora Soluciones Prediales S.A., dedicada a la gestión predial para líneas de transmisión eléctrica de alta tensión; donde formó parte del equipo técnico. Las principales funciones eran la aplicación de sistemas de información geográfica para determinar áreas de servidumbre de paso en los predios afectados y la posterior elaboración de planos para las negociaciones o trámites con entidades estatales. En febrero del 2021 ingresa al área de Propiedades y Exploraciones del grupo minero Alpayana, donde desarrolla actividades relacionadas la aplicación de GIS en concesiones mineras, base de datos geoespacial para comunidades campesinas involucradas en proyectos de exploración greenfield y brownfield.

1.2.Descripción de la empresa donde labora o laboró

Alpayana es un grupo minero que cuenta con tres unidades mineras, ubicadas en la sierra de Lima donde se desarrolla la minería subterránea. La producción es principalmente polimetálica, siendo zinc, plomo, cobre y plata los minerales que caracterizan a estas minas.

Asimismo, cuenta con diversidad de proyectos de exploración greenfield ubicados a lo largo del territorio nacional en distintas concesiones mineras. Tiene reconocimientos por su buen manejo ambiental y social, siendo protectores del entorno donde desarrollan sus actividades y buscando el crecimiento de las personas en las comunidades campesinas de su entorno.

1.2.1. Misión

Maximizar el valor para nuestros accionistas, colaboradores, comunidades y clientes de forma eficiente, con altos estándares de seguridad, medio ambiente y responsabilidad social.

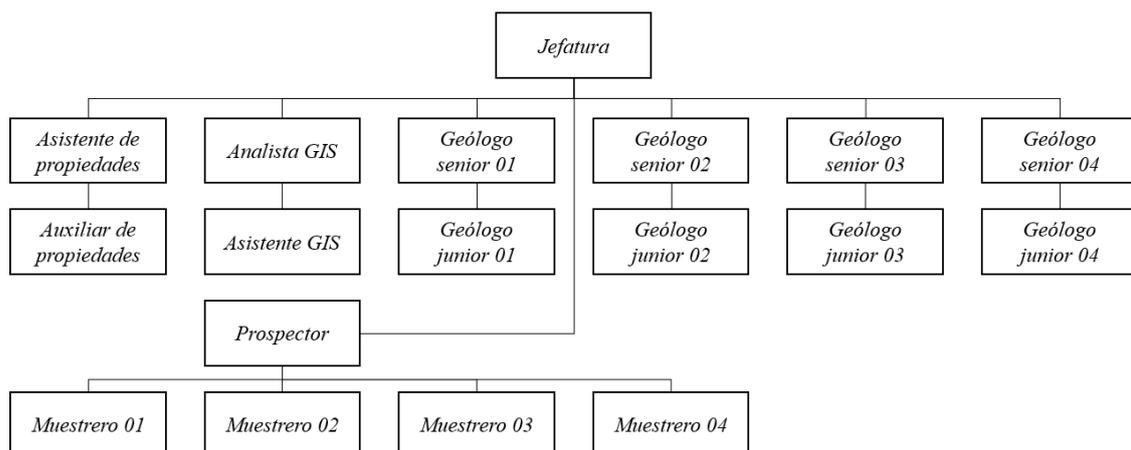
1.2.2. Visión

Ser un grupo minero referente en la región, reconocido por nuestra excelencia operativa y gestión responsable.

1.3. Organigrama de la empresa

Figura
Organigrama de Área de Propiedades y Exploraciones

1



Nota: Organigrama del área de Propiedades y Exploraciones

1.4.Áreas y funciones desempeñadas

El autor a lo largo de los últimos tres años de experiencia ha desempeñado los puntos indicados a continuación:

- Soporte GIS para la presentación de expedientes de petitorios mineros (concesiones mineras).
- Propuesta para identificación de alteraciones hidrotermales como trabajo de pre campo y soporte a geólogos.
- Elaboración y manejo de base de datos GIS de comunidades campesinas de proyectos greenfield.
- Supervisión de trabajos en campo (geofísica, perforación, logística, etc.)
- Implementación de herramientas para toma de datos en campo.
- Gestión logística para campañas de exploración greenfield.

II. DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD ESPECÍFICA: TÉCNICAS ESPECTRALES PARA LA UBICACIÓN DE ALTERACIONES HIDROTERMALES

La minería en el Perú tiene un papel muy importante, mueve gran parte de la economía en el país y genera miles de puestos de trabajo en diversas disciplinas directa e indirectamente. En los primeros cuatro meses del año 2024 las inversiones mineras alcanzaron la suma de US\$ 1322 millones, esta cifra significó un aumento del 11.5% en comparación a dicho periodo del año 2023 (US\$ 1186 millones). En el rubro de exploraciones, la inversión asciende a un monto de US\$41 millones para el periodo antes mencionado, teniendo un incremento del 16.6% respecto al año 2023 (US\$ 36millones). Es en esta etapa donde se definen los targets o probables lugares para iniciar estudios que puedan brindar información sobre potenciales depósitos minerales o yacimientos, los cuales podrían dar como resultado futuras minas. Asimismo, se requiere una serie de permisos que otorga el estado, los cuales también involucran obligaciones de pago por el derecho a una concesión; esto aumentando los gastos propios de las campañas en campo hace que la inversión sea significativa para la empresa. Puede adquirir un carácter de riesgo al asumir gastos altos a cambio de no encontrar el potencial mineral que pueda cubrir el retorno de la inversión realizada, he ahí la importancia de un buen análisis previo a petitionar un derecho minero o aventurarse a la exploración en campo.

Por ello, se planteó la estimación de zonas de alteración hidrotermal con técnicas espectrales con la finalidad de determinar blancos prospectivos y optimizar el proceso de exploración greenfield en la comunidad campesina de Huanza.¿Cómo ubicar alteraciones hidrotermales a través de técnicas espectrales en la comunidad campesina de Huanza?

2.1.Objetivos

2.1.1. Objetivo general

- Identificar zonas de alteración hidrotermal en la comunidad campesina de Huanza mediante la aplicación de técnicas espectrales.

2.1.2. Objetivos específicos

- Aplicar técnicas espectrales: de corrección atmosférica, enmascaramiento, composición RGB, cocientes e índices de bandas.
- Realizar ensambles mineralógicos con la finalidad de asociar los resultados de las técnicas espectrales a tipos de alteración hidrotermal.
- Elaborar cartografía con las zonas de alteración hidrotermal, indicando posibles zonas de exploración dentro del áreas de estudio.

2.2.Antecedentes

Paico (2022), en su tesis “Determinación de zonas de alteración hidrotermal mediante imágenes Aster y Landsat en el distrito de Tantarica – provincia de Contumazá”, busca identificar blancos de exploración geológica, para lo cual realizó el procesamiento de imágenes satelitales Aster L1B y Landsat 8 mediante métodos de coeficiente de bandas espectrales, índices para identificar litología y Mapeo de Angulo Espectral (Spectral Angle Mapper) utilizando software GIS. Logró determinar cuatro zonas de alteración hidrotermal cuya mineralización se asocia a la alteración argílica avanzada distal y proximal, alteración argílica y propilítica.

Cabellos (2022), en su tesis “Caracterización de alteraciones hidrotermales mediante imágenes Aster y Sentinel 2, en la provincia del Santa departamento de Ancash” aborda la necesidad de mapear alteraciones hidrotermales en la zona de afloramientos ubicados en el

Grupo Calipuy, constituidos por secuencias volcánicas y piroclásticas, intrusivos del batolito de la Cordillera Blanca y formaciones del Grupo Casma; con la finalidad de identificar diferentes blancos de interés para la exploración geológica. En su metodología aplica el procesamiento de imágenes Aster y Sentinel 2, realizando las correcciones radiométrica y atmosférica, enmascaramiento, análisis de componentes principales y cocientes de bandas; obteniendo como resultado la identificación de zonas con presencia de minerales alunita, caolinita, illita, silice y óxidos de hierro.

Garro y Diaz (2020), en su tesis “Prospección espectroscópica para la identificación de zonas mineralizadas en el distrito de Sorochuco, Cajamarca -2020” parte de la necesidad de identificar zonas mineralizadas prospectables, por lo cual plantean la aplicación de sensoramiento remoto y muestreo en superficie utilizando el espectrómetro infrarojo PIMA II para la identificación de minerales de alteración y sus asociaciones, y la diferenciación de zonas de alteración hidrotermal. Lograron definir los minerales: alunita, caolinita, illita, esmectita, montmorillonita, epidota, clorita, dickita y pirofilita; cuya asociación define zonas de alteración argílica, argílica avanzada y propilitica asociada a yacimientos de tipo pórfido de oro, plata y cobre.

Beiranvand y Hashim (2014), en su investigación “Aster, ALI and Hyperion sensors data for lithological mapping and ore minerals exploration”, proponen la aplicación de datos para la exploración minera, cartografiado geológico y estructural. Realizaron un Análisis de componentes principales (PCA) y clasificación supervisada aplicadas en el sector del espectro electromagnético correspondiente al VNIR (visible near infrared) Y SWIR (shortwave infrared), logrando identificar zonas con presencia de minerales de alteración hidrotermal, relacionados a yacimientos epitermales auríferos y depósitos tipo pórfidos de cobre.

Perez et al (2010) en su trabajo “Reconocimiento de alteración hidrotermal con el sensor Aster en el curso medio del río Santa Cruz (31°40’S), provincia de San Juan” plantea la identificación de zonas de alteración hidrotermal en utilizando los subsistemas VNIR y SWIR pertenecientes a una escena Aster. Realizó trabajos de pre procesamiento en corrección radiométrica y atmosférica, transformando la información en niveles digitales a datos de radiancia y reduciendo los efectos de distorsión propio de las partículas presentes en la atmósfera. En la fase de procesamiento realizó combinaciones de bandas espectrales 6,5 y 4 para realizar un análisis visual del terreno en la identificación de zonas de arcillas, las cuales presentes gran absorción en las bandas 5 y 6 (2.145 – 2.225 micrómetros); y gran reflectancia en la banda 4 (1.600 – 1.700 micrómetros). Asimismo, aplicó índices de identificación litológica para reforzar el resultado de la composición descrita, obteniendo como resultado que los picos de absorción más altos van entre los 2.160 y 2.200 micrómetros; siendo esta efectiva para determinar blancos de alteración hidrotermal.

Castro (2007) en su trabajo “Discriminación litológica con Aster” propone la identificación de litologías en base a la respuesta espectral de los minerales componentes de las rocas, principalmente en la porción TIR, VNIR y SWIR del espectro electromagnético aplicando la técnica del cociente de bandas en la sierra de Aguilar, provincia de Jujuy - Argentina. Como parte del pre procesamiento aplicó la corrección atmosférica a fin de obtener cinco bandas con valores de emisividad para luego compararlas con las mediciones del espectrómetro FTIR (Fourier transform infrared). Como resultado pudo comprobar que los datos Aster y las mediciones presentan similitud, pero con una variación en la absorción (menor profundidad) en las cinco bandas.

2.3. Metodología

2.3.1. Alteración hidrotermal

Se le llama al proceso de intercambio químico que ocurre en la interacción de un fluido hidrotermal y una roca, conllevando variaciones químicas y mineralógicas en esta. Existen diversos tipos de alteración hidrotermal, cuyas características se asocian minerales en particular. Esta diversidad está regida por diversos factores como pH, temperatura, composición de fluido, composición de rocas, entre otros. (Caiza, 2018).

Tabla1

Tipos de alteración hidrotermal

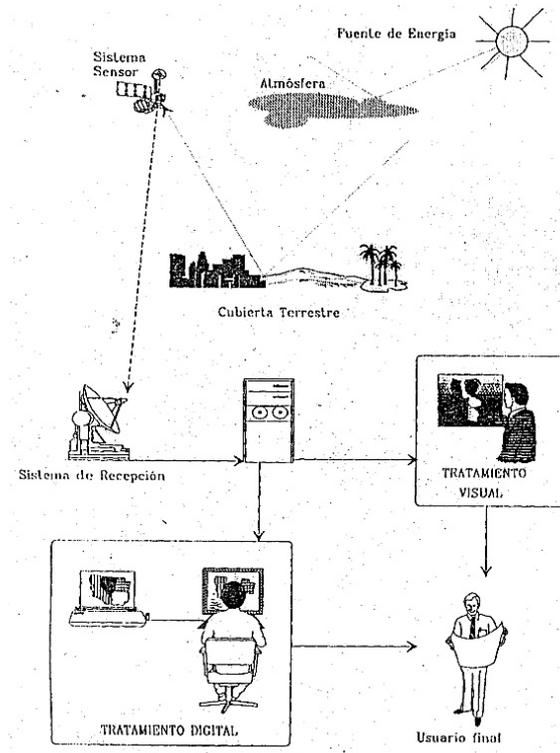
Tipo de alteración	Ensamble mineralógico
Alteración Potásica	Feldespatos potásicos y/o biotita. Minerales accesorios (cuarzo, magnetita, sericita, clorita).
Alteración Propilítica	Asociación clorita - epidota. Minerales accesorios como cuarzo-magnetita, illita.
Albitización	Asociada a la alteración propilítica de alta temperatura.
Alteración Fílica	Cuarzo y sericita. Minerales accesorios (clorita, illita, pirita).
Alteración Argílica Moderada	Presencia de arcillas y cuarzo.
Alteración Argílica Avanzada	Cuarzo residual, con o sin presencia de alunita, jarosita, pirita, caolín, pirofilita.
Alteración Carbonatada	Ankerita, dolomita, calcita, siderita con o sin mayor o menor sericita, pirita o albita.
Alteración Calcosilicatada	Silicatos de Magnesio y calcio, dolomita o caliza.
Alteración tipo greissen	Cuarzo, feldespato, moscovita con o sin turmalina o topacio.

2.3.2. Teledetección

Es la obtención de datos de la superficie terrestre a través de sensores ubicados en plataformas aeroespaciales, cuya relación electromagnética con el territorio genera

información que permite conocer aspectos sobre los elementos presentes en este. El comportamiento físico químico de los cuerpos en superficie, se traduce en valores de energía que nos ayudan a poder conocer algunas características de estos.

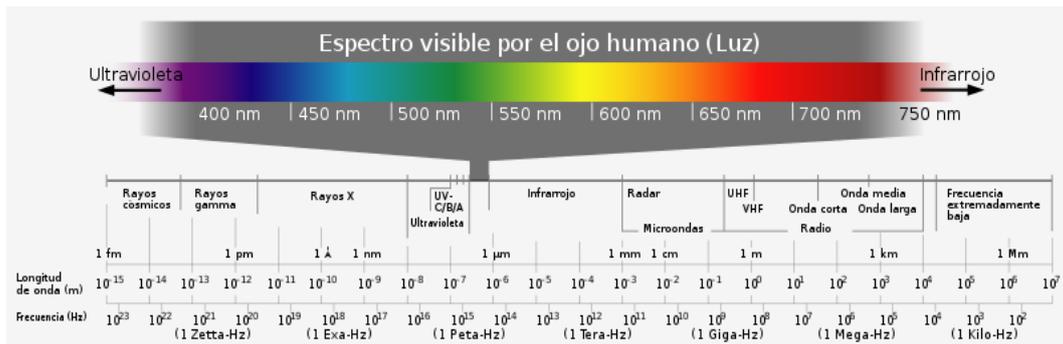
Figura 2
Componentes de un sistema de teledetección



2.3.3. Espectro Electromagnético

Está comprendido por el conjunto de las longitudes de ondas, desde las más cortas hasta las más largas, divididas en regiones; para fines de la percepción remota es favorable analizar estas porciones y vincularlas a un sensor específico. Asimismo, existen longitudes de onda perceptibles por el ojo humano (espectro visible) y otras que no; para estas es que se aplica el uso de sensores.

Figura 3
Espectro electromagnético



En relación a sensores existentes para aplicaciones de teledetección, cabe destacar un grupo de bandas espectrales que se utilizan de manera recurrente:

Espectro visible (400 a 700 nm). Se trata de la región donde se ubica la única longitud de onda perceptible por el ojo humano; distribuidas en tres bandas principales: azul (400 a 500 nm), verde (500 a 600 nm) y rojo (600 a 700 nm).

Infrarrojo cercano (700 a 1300 nm). Tiene como particularidad, la capacidad de identificar masas vegetales y zonas de concentración de humedad.

Infrarrojo medio (1300 a 8000 nm). Es donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre.

Infrarrojo lejano o térmico (8000 a 14000 nm). Compuesta por la parte emisiva del espectro terrestre, donde se identifica el calor emitido en la superficie terrestre.

Microondas (mayores a 1 mm). Adquiere importancia al ser un tipo de energía de gran transparencia en la cubierta de nubes.

2.3.4. Sensor Aster

ASTER (Advanced Space-Borne Thermal Emission and Reflection Radiometer) es un sensor instalado a bordo del satélite TERRA, diseñado para la captura de imágenes de alta resolución espacial y radiométrica, desde su fecha de lanzamiento en diciembre de 1999, llevado a cabo por el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón.

El rango espectral que posee es de 14 bandas, constituido por tres subsistemas independientes; siendo estas: VNIR (Visible e infrarrojo cercano), SWIR (Infrarrojo de onda corta) y TIR (Infrarrojo termal)

Figura 4
Características de los subsistemas ASTER (ERSDAC, 2002)

Subsystem	Band No.	Spectral Range (μm)	Radiometric Resolution	Absolute Accuracy (s)	Spatial Resolution	Signal Quantization Levels
VNIR	1	0.52 - 0.60	$NE\Delta r \leq 0.5 \%$	$\leq \pm 4 \%$	15 m	8 bits
	2	0.63 - 0.69				
	3N	0.78 - 0.86				
	3B	0.78 - 0.86				
SWIR	4	1.600 - 1.700	$NE\Delta r \leq 0.5 \%$	$\leq \pm 4 \%$	30 m	8 bits
	5	2.145 - 2.185	$NE\Delta r \leq 1.3 \%$			
	6	2.185 - 2.225	$NE\Delta r \leq 1.3 \%$			
	7	2.235 - 2.285	$NE\Delta r \leq 1.3 \%$			
	8	2.295 - 2.365	$NE\Delta r \leq 1.0 \%$			
	9	2.360 - 2.430	$NE\Delta r \leq 1.3 \%$			
TIR	10	8.125 - 8.475	$NE\Delta T \leq 0.3 \text{ K}$	$\leq 3\text{K}(200-240\text{K})$	90 m	12 bits
	11	8.475 - 8.825		$\leq 2\text{K}(240-270\text{K})$		
	12	8.925 - 9.275		$\leq 1\text{K}(270-340\text{K})$		
	13	10.25 - 10.95		$\leq 2\text{K}(340-370\text{K})$		
	14	10.95 - 11.65				

2.3.5. Subsistema Infrarrojo Visible y Cercano (VNIR)

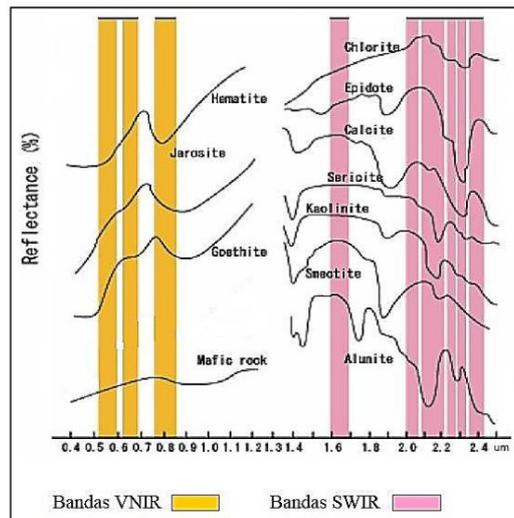
El subsistema capta vibraciones de los metales en transición, de sobre manera al hierro y algunas tierras raras; las tres bandas presentes, registran imágenes en Nadir (3N) y adicionalmente cuenta con un telescopio adicional con el que obtiene la vista trasera (3B), constituyendo un par estereoscópico. (Rodríguez, 2008))

2.3.6. Subsistema Infrarrojo de Onda Corta (SWIR)

Este subsistema detecta las vibraciones moleculares de hidratos, hidróxidos de aluminio, hierro, magnesio y carbonatos. Sus seis bandas pueden correlacionarse con las longitudes de onda de absorción características de minerales en estados avanzados de alteración argílica, argílica a filica y propilítica. Estas longitudes de onda contemplan picos de absorción de $2.165\mu\text{m}$, $2.209\mu\text{m}$ y $2.360\mu\text{m}$, respectivamente.

Figura 5

Características espectrales de subsistemas VNIR Y SWIR del sensor ASTER

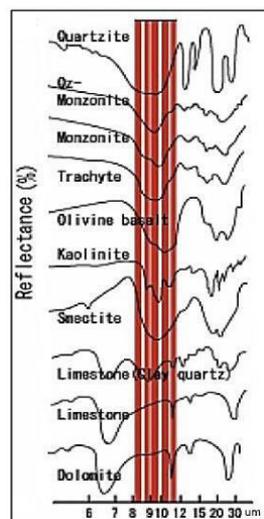


2.3.7. Subsistema Infrarrojo Termal (TIR)

Registra los minerales predominantes en las rocas, cuyos puntos de absorción están dentro de este intervalo del espectro; las cinco bandas están diseñadas para detectar las moléculas de silicatos. Además, este sistema es crucial para monitorizar temperaturas y gases mediante imágenes nocturnas, eliminando la influencia de la luz solar reflejada.

Figura 6

Características espectrales en el subsistema TIR de ASTER

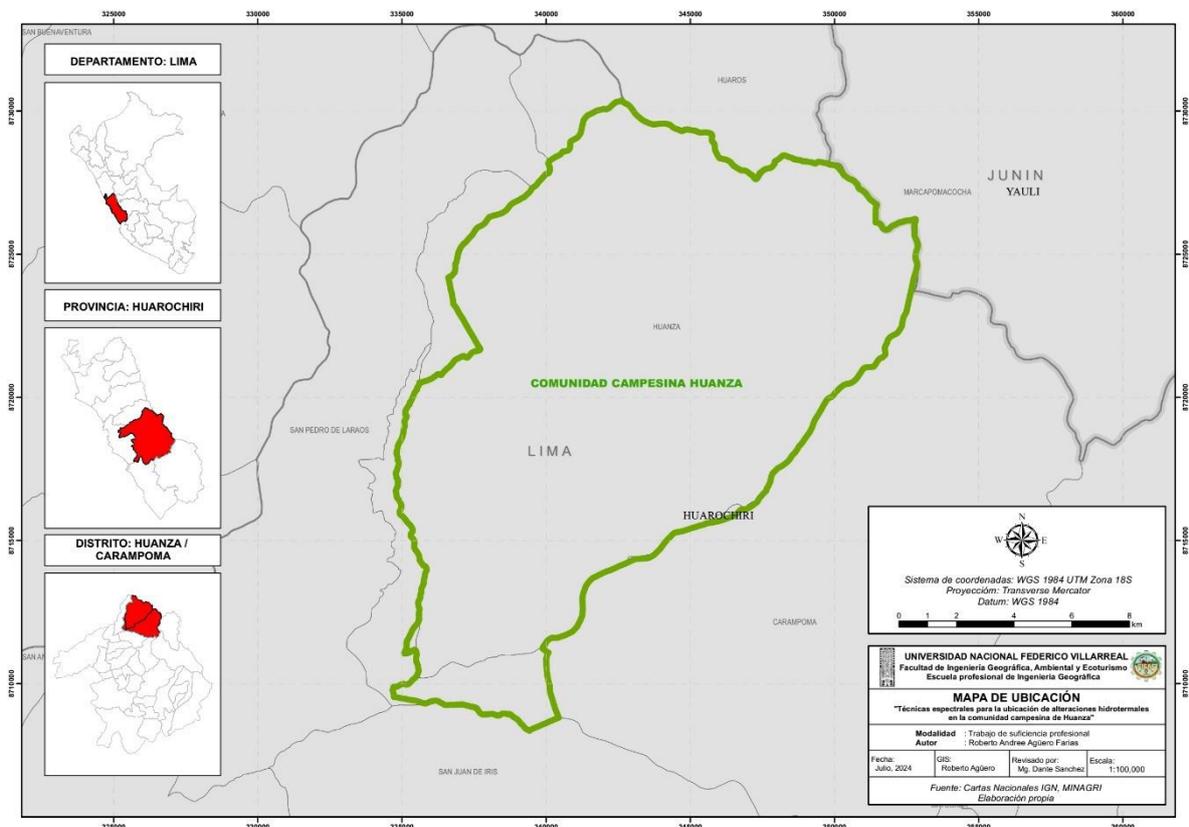


En el desarrollo del presente trabajo, la metodología implicó cuatro puntos específicos, los cuales se alimentan cada uno del anterior aplicando variadas técnicas espectrales. Estas fueron implementadas a una escena Aster ubicada en el área de interés, asimismo se utilizó cartografía de apoyo tales como mapas metalogénico, geológico, minas y geología estructural.

2.3.8. Área de estudio

La Comunidad Campesina de Huanza comprende parcialmente a los distritos de Huanza y Carampoma, en la provincia de Huarochirí, departamento de Lima. Hacia el norte limita con el distrito de Huaro, por el oeste con San Pedro de Laraos y por el sur con San Juan de Iris.

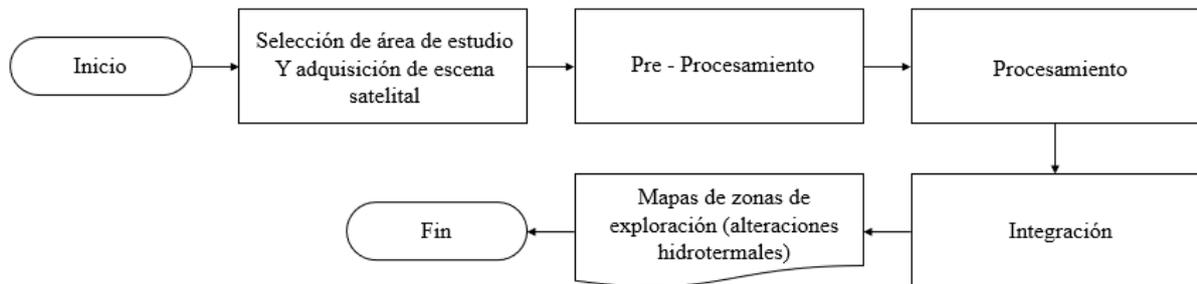
Figura7
Mapa ubicación de comunidad campesina de Huanza



2.3.9. Etapas de metodología

Figura8

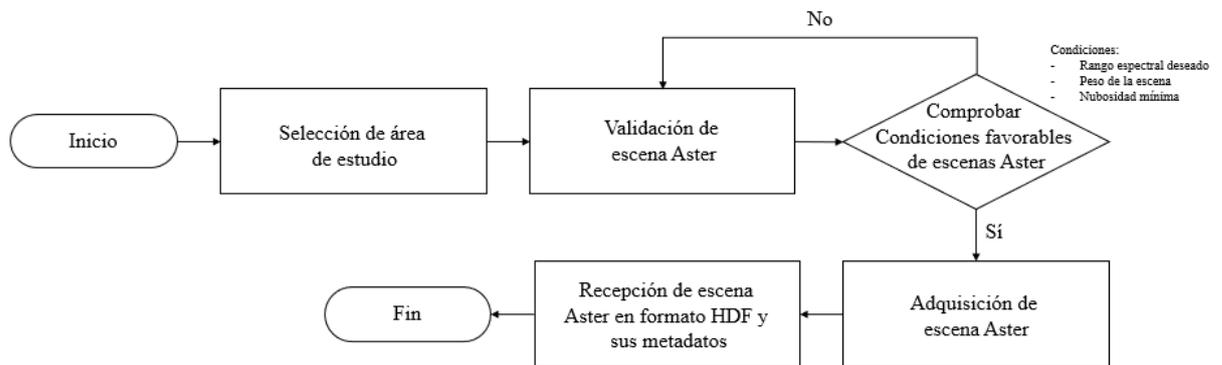
Etapa inicial: Preparación y preprocesamiento



2.3.10. Adquisición de escena

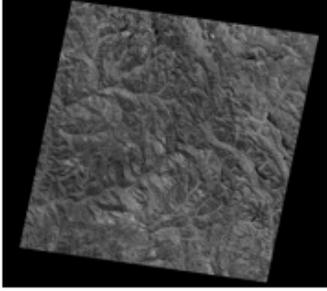
Figura9

Selección de área de estudio



Las escenas satelitales se pueden adquirir de manera gratuita en diversas plataformas web, entre los cuáles se ubica el sitio oficial de la NASA (National Aeronautics and Space Administration), el sitio del Servicio Geológico de los Estados Unidos USGS; que también poseen imágenes Aster. Para el trabajo realizado, se utilizó la escena indicada en la Tabla 3.

Tabla 2*Características de imagen seleccionada para área de estudio*

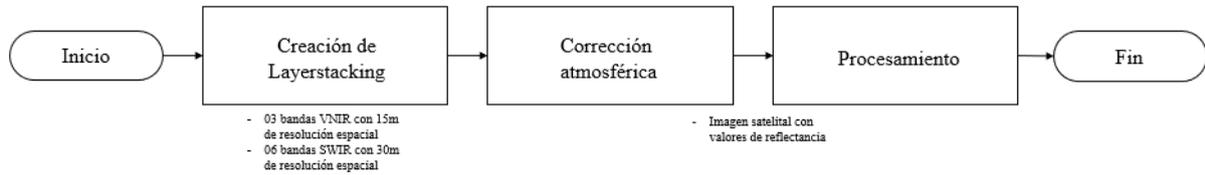
Nombre de escena		
AST_L1B_00307042005152748		
Superficie de cobertura	60 km x 60 km	
Sensor	ASTER	
Bandas	Longitud de onda (µm)	Resolución espacial (m)
Banda 1	0.52-0.60	15
Banda 2	0.63-0.69	15
Banda 3N	0.78-0.86	15
Banda 4	1.60-1.70	30
Banda 5	2.145-2.185	30
Banda 6	2.185-2.225	30
Banda 7	2.235-2.285	30
Banda 8	2.295-2.365	30
Banda 9	2.360-2.430	30
Banda 10	8.125-8.475	90
Banda 11	8.475-8.825	90
Banda 12	8.925-9.275	90
Banda 13	10.25-10.95	90
Banda 14	10.95-11.65	90

La escena descargada debe ser sometida a una etapa de pre – procesamiento, donde se hará un corte específico, se hará la transformación de niveles digitales radiancia y se reducirá los efectos de disturbación atmosférica. Asimismo, se discriminarán elementos del medio físico que dificulten el análisis de las áreas de mineralización.

2.3.11. Diagrama de Flujo 03. Pre-procesamiento de imagen Aster.

Figura10

Flujo: Preprocesamiento



2.3.12. Integración de bandas

Los sectores de interés dentro del espectro electromagnético para la identificación de alteraciones hidrotermales, comprende las tres bandas del subsistema VNIR y las seis bandas del subsistema SWIR las cuales se deben integrar en un solo archivo con una resolución espacial resultante de 30m mediante la herramienta layerstacking del software Envi 5.3.

Figura11
Aplicación de Layerstacking

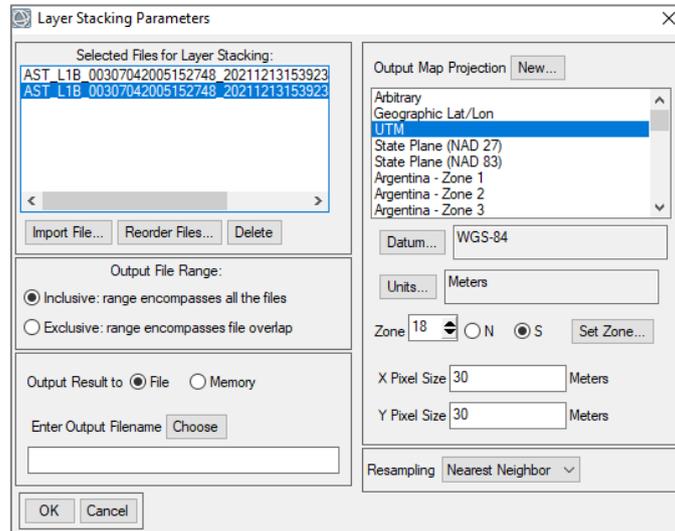
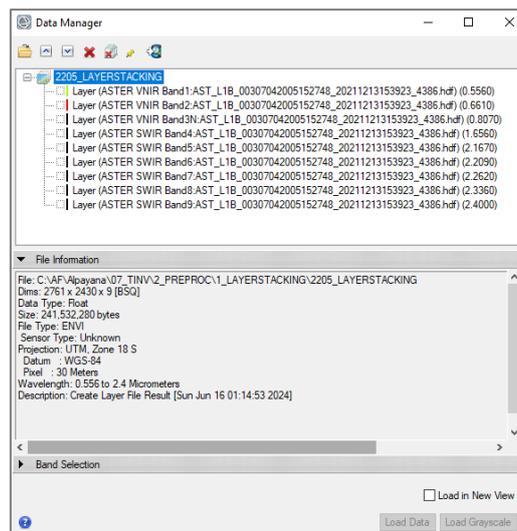
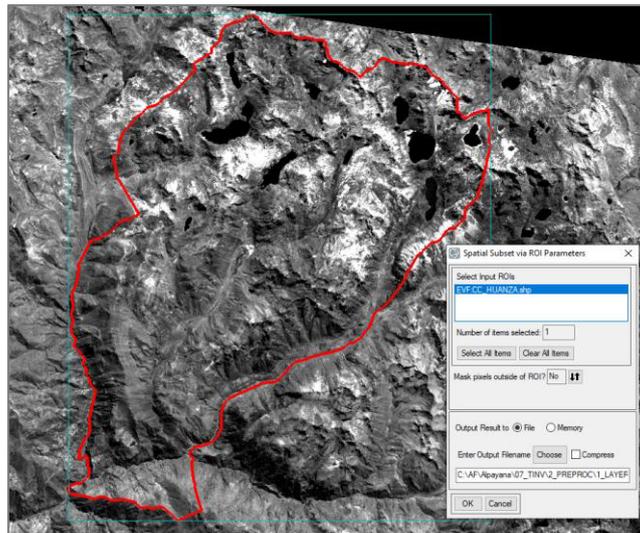


Figura12
Imagen resultante (integración de bandas VNIR Y SWIR)



Se realizó el corte de la escena en función al área de estudio, utilizando la herramienta “Subset data from Rois” en en el software Envi 5.3

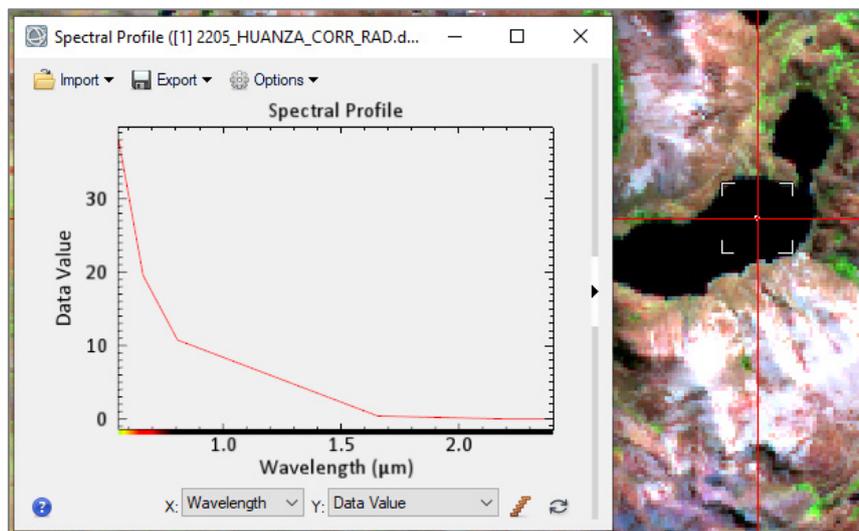
Figura 13
Área de estudio a considerar en imagen Aster



2.3.13. Corrección radiométrica

Esta técnica implica la transformación de niveles digitales propios de las escenas Aster a valores de radiancia, estos datos de energía nos ayudan a realizar la conversión a valores de reflectancia a través de la corrección atmosférica. Asimismo, se puede visualizar en la figura 11 de firma espectral los valores de radiancia para el pixel seleccionado, sin embargo; se requiere transformar a niveles de reflectancia.

Figura 14
Firma espectral en valores de radiancia



2.3.14. Corrección atmosférica

Se realizó para reducir la influencia que tiene la atmósfera sobre la información captada a través del sensor Aster; este proceso transforma los valores de radiancia en reflectancia, eliminando el ruido que se presenta en las bandas. Con esta corrección la escena queda lista para aplicar álgebra de bandas u otras operaciones.

En base a los datos geográficos y temporales que posee la imagen satelital en su metadata, se realiza una transformación del formato BSQ a formato BILL; los picos de absorción y reflectancia se pueden apreciar en las firmas espectrales de cada pixel, ya que poseen valores de reflectancia tales como vegetación, nieve, aguas, y nubes.

Tabla 3

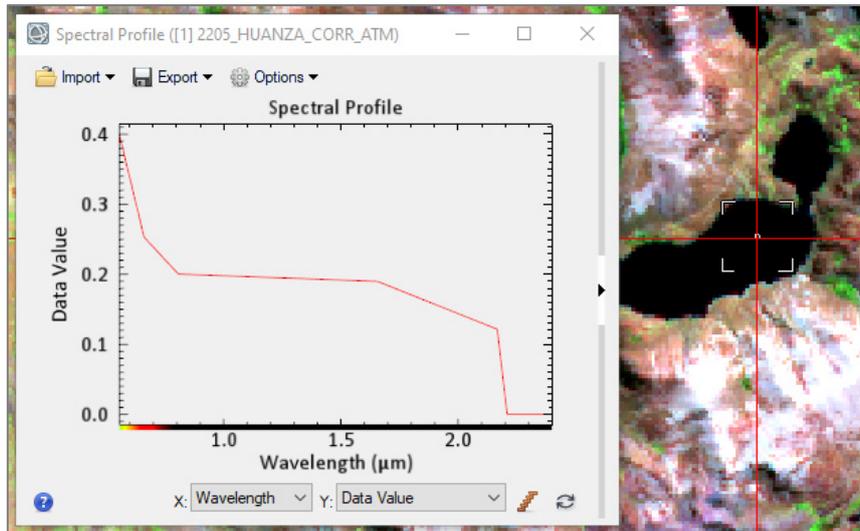
Metadatos de escena Aster a emplear

Metadatos de escena	
Tipo de sensor	Aster
Altitud de sensor	705.00 km
Tamaño de pixel	30.00 m
Fecha de vuelo	04/07/2005
Hora de vuelo	27:48.2
Modelo atmosférico	Tropical
Modelo de aerosol	Rural

Se puede verificar que los datos en el eje Y ahora tiene valores de reflectancia, se observa la firma en el mismo pixel mostrado anteriormente

Figura 15

Firma espectral en valores de reflectancia



2.3.15. Índices espectrales

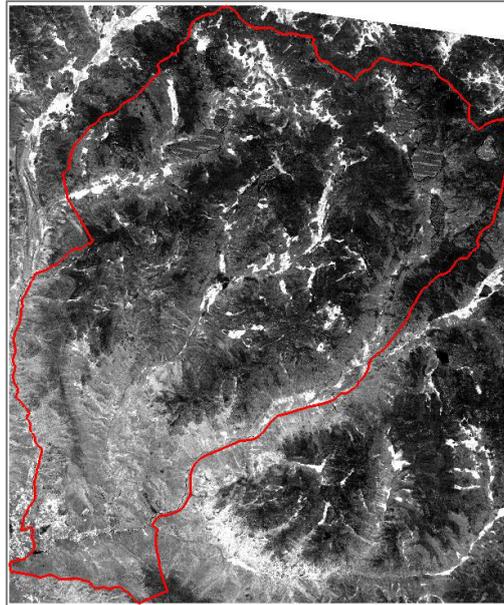
Son algoritmos matemáticos que nos permiten resaltar las características espectrales de un material sobre otro, el resultado es una nueva imagen cuyos valores representarán la presencia de dicho material en el pixel; los pixeles que tengan valores más altos y más brillantes. Se estimará índices de vegetación, agua y nieve.

2.3.16. NDVI – Índice normalizado de vegetación

Los pixeles que tengan presencia de vegetación serán los más claros o brillantes dentro de la escena, así mismo los valores de estos serán los más altos (en relación con el resto de pixeles).

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

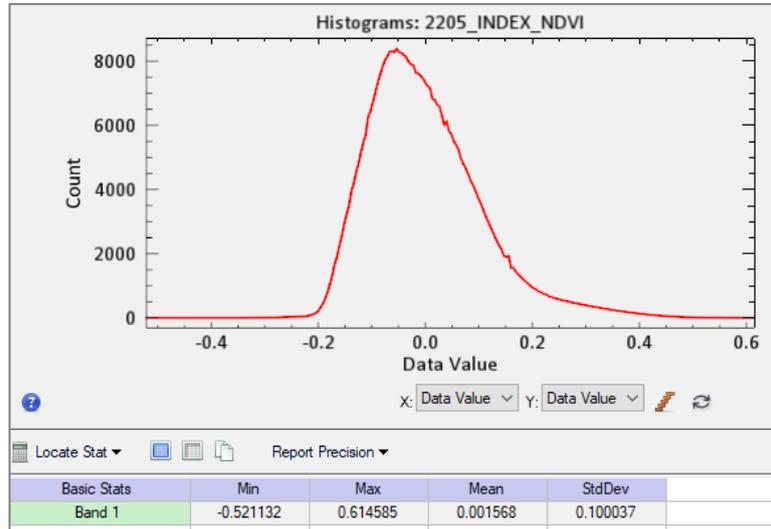
Figura 16
NDVI - Área de estudio



Las estadísticas para esta imagen, no presentan mayores anomalías dentro de su histograma; se aprecia una distribución normal. Asimismo, se aprecia que los valores oscilan entre -0.0521132 como valor mínimo y 0.614585 como valor máximo; los pixeles que tengan presencia de vegetación, serán los superiores a cero (hacia la derecha en el histograma).

Figura17

NDVI - Histograma y estadísticas básicas

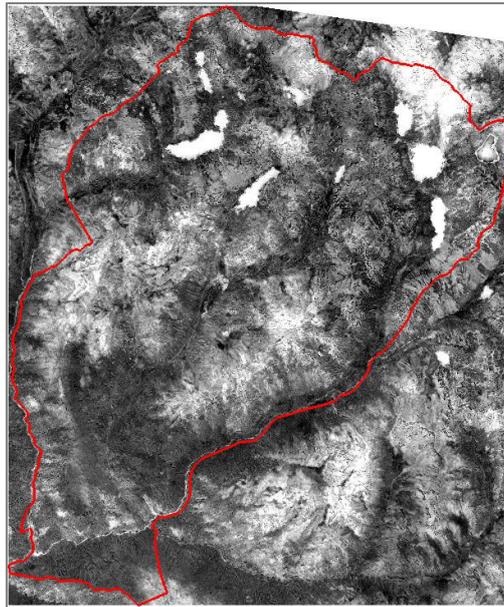


2.3.17. NDWI – Índice diferenciado normalizado de agua

Los píxeles con presencia de agua serán los más claros o brillantes dentro de la escena, de igual manera los valores serán los más altos.

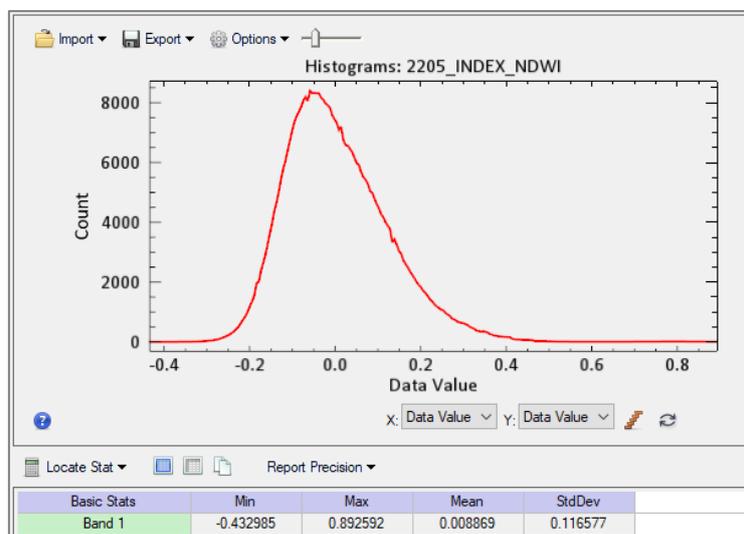
$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}$$

Figura 18
NDWI - Área de estudio



Las estadísticas para la imagen de NDWI, no presentan mayores anomalías dentro de su histograma; se aprecia una distribución normal. Asimismo, se aprecia que los valores oscilan entre -0.432985 como valor mínimo y 0.892592 como valor máximo; los píxeles que tengan presencia de agua, serán los superiores a cero (hacia la derecha en el histograma). Es necesario indicar que también se empleará la cartografía base para la depuración de cuerpos de agua más adelante.

Figura 19
NDWI - Histograma y estadísticas básicas



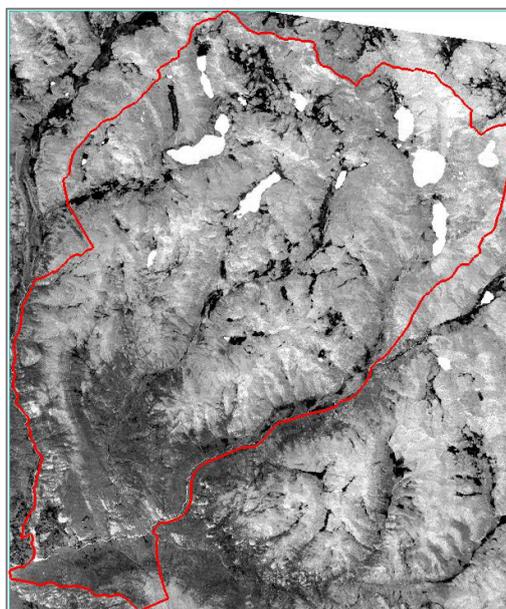
2.3.18. *NDSI – Índice normalizado diferenciado de nieve*

En el caso de este índice, reflejó también los píxeles con presencia de agua; esto debido a que la nieve es agua en estado sólido, por tanto, podemos ver esa dualidad en la escena resultante. De igual manera los píxeles con tonalidades más claras y brillantes, y con valores más altos serán los correspondientes a cobertura de nieve.

$$NDSI = \frac{Green - Swir}{Green + Swir}$$

Figura 20

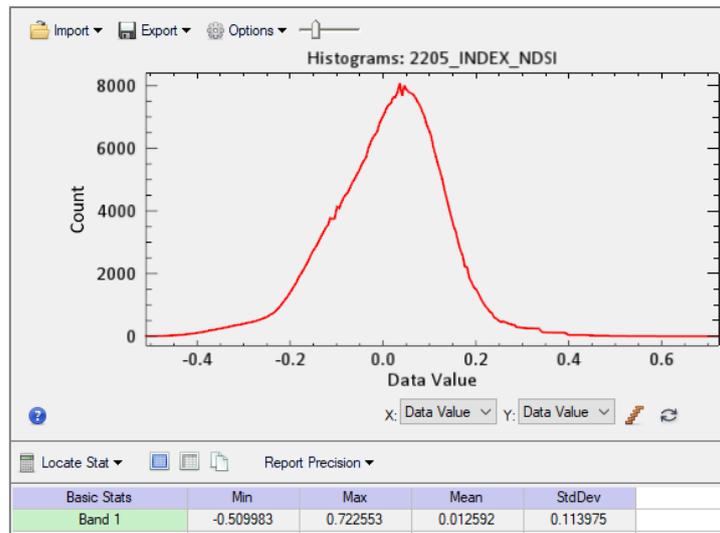
NDSI - Área de estudio



Las estadísticas para la imagen de NDSI, no presentan mayores anomalías dentro de su histograma; se aprecia una distribución normal. Asimismo, se aprecia que los valores oscilan entre 0.27787363 como valor mínimo y 0.72255330 como valor máximo.

Figura 21

NDSI - Histograma y estadísticas básicas



2.3.19. Máscaras

Los índices calculados anteriormente, nos ayudaran a elaborar las máscaras para el mapeo y discriminación de áreas que puedan dificultar las zonas de alteraciones hidrotermales. Se hizo una evaluación en el umbral de los valores estadísticos de cada índice, seleccionando los siguientes rangos para cada uno de ellos: NDVI (0.08458391 - 0.61458545), NDWI (0.29998070 - 0.89259158) Y NDSI (0.27787363 - 0.72255330). Las regiones determinadas serán eliminadas de las escenas, estos pixeles son serán tomados en cuenta como parte del análisis para la identificación de minerales.

Figura 22

Mapeo de máscaras (vegetación, agua y nieve)

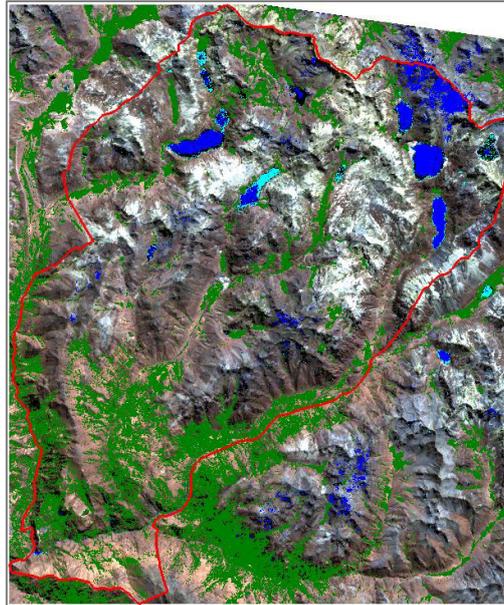


Figura 23

Escena resultante por eliminación de máscaras



2.3.20. Composición de banda RGB para identificación de arcillas

Las imágenes de colores se obtienen al combinar los colores del espectro visible red (rojo), green (verde) y blue (azul) de acuerdo a las características espectrales de la superficie a estudiar, teniendo en cuenta sus picos de absorción y reflectancia sobre la banda específica.

En la figura 21 se aprecian píxeles en coloración morada en la zona este y sur oeste de la zona de estudio, lo que nos da indicios de presencia de minerales arcillosos. En el caso de la figura 22 se puede verificar la existencia de minerales arcillosos en coloración café oscuro, que coinciden con las mostradas en la figura 21. En el caso de la figura 23 se visualizan píxeles en color turquesa en la zona noreste y noroeste del área de estudio, brindando información de minerales arcillosos.

Figura 24
Composición RGB 461



Figura 25
Composición RGB 469

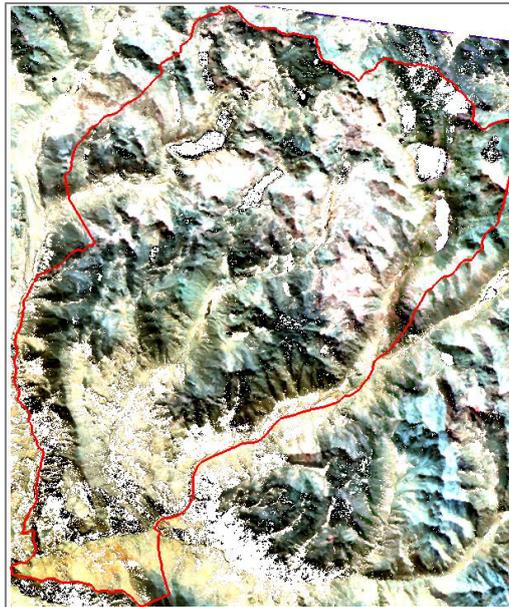


Figura 26
Composición RGB 531



Mediante la misma técnica espectral es posible estudiar zonas con presencia de óxidos, teniendo en cuenta los picos de absorción y reflectancia que presentan los píxeles de la escena resultante. En la figura 24, podemos observar en tonalidades azul y amarillentas alrededor en la zona sur este y sur oeste.

Figura 27
Composición RGB 461



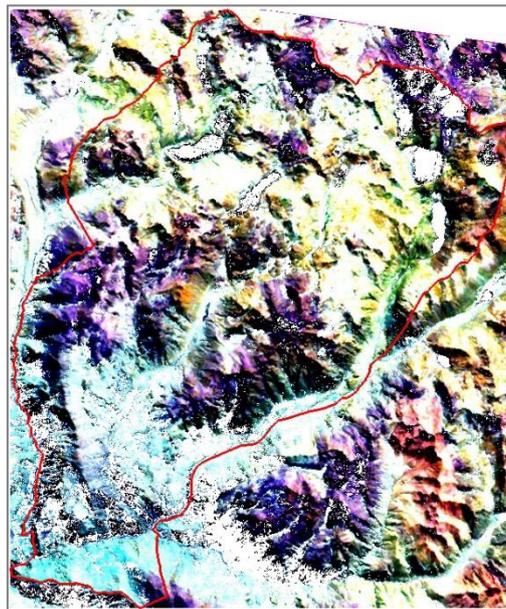
Se aplicó nuevamente la composición una composición RGB 641, donde las zonas de óxidos se resaltarán con tonalidad morada y bordes amarillos; en la figura 25 se pueden identificar en la parte central y noroeste de nuestra zona de estudio.

Figura 28
Composición RGB 461



De la misma manera, la composición RGB 943, donde las zonas de óxidos se resaltarán con tonalidad morada y bordes amarillos; en la figura 26 se pueden identificar en la zona noroeste y noroeste de nuestra zona de estudio.

Figura29
Composición RGB 943



2.3.21. Cocientes o ratios de bandas

Debido a que las respuestas espectrales son bastante parecidas en algunas rocas, pueden causar dificultad en la discriminación de litologías y alteraciones hidrotermales, en ese sentido se aplica la técnica de cociente de bandas; efectuando una división entre estas como se muestra en la tabla 5. El principio de esta técnica espectral se basa en los ensambles mineralógicos que tiene cada alteración, los cuales comparten sus picos de absorción y reflectancia en la misma banda del espectro electromagnético; por tanto, al efectuar el cociente entre estas regiones se puede resaltar la presencia de estos minerales. Bajo esta premisa se plantea que:

$$\text{Cociente} = \frac{\text{reflectancia máxima}}{\text{reflectancia mínima}}$$

En la alteración Argílica a filica se evidencia el ensamble de illita - moscovita - montmorillonita teniendo mayor reflectancia en la banda 4 (1.6µm – 1.7µm) y presentando picos de absorción en la banda 6 (2.2µm - 2.6µm).

La alteración Argílica avanzada tiene en su ensamble a la alunita – pirofilita - caolinita - dickita, cuyos valores de reflectancia alta se ubican en la banda 4 (1.6µm – 1.7µm) y picos de absorción en la banda 5 (2.16 µm – 2.17 µm).

Para el caso de la alteración Propilítica, con el ensamble clorita – epidota - calcita, presenta valores altos de reflectancia alta en la banda 5 (2.150µm -2.200µm) y picos de absorción en la banda 8 (2.335µm - 2.347µm).

Los Óxidos e Hidróxidos de Fe, con el ensamble hematita – goetita, tienen valores de reflectancia alta en la banda 2 (0.600µm – 0.700µm) y picos de absorción en la banda 1 (0.500µm – 0.600µm)

Tabla 4

Cocientes de bandas

Alteración hidrotermal	Cociente de bandas
Argílica a filica illita - moscovita - montmorillonita	4/6
Argilica avanzada alunita - pirofilita - caolinita - dickita	4/5
Propilítica clorita - epidota - calcita	5/8
Óxidos e hidróxidos de Fe hematita - goetita	2/1

2.3.22. Índices de identificación litológica SWIR

Se pueden detectar diferentes minerales alterados por procesos hidrotermales usando las propiedades de absorción en ciertas partes del espectro que se alinean con las bandas de

detección del sensor Aster. Existen cinco índices propuestos por Ninomiya en el año 2004, los cuales estas ecuaciones se aplican sobre el sector infrarrojo de onda corta del sensor indicado.

El índice OHla permite identificar minerales tales como moscovita, illita y montmorillonita, estos tienen un pico de absorción en la banda 6 (2.185µm – 2.225µm) y valores elevados de reflectancia en las banda 4 (1.60µm – 1.70µm) y banda 7(2.235µm – 2.285µm). Su ecuación es la siguiente:

$$OHla = \frac{\text{banda 4} \times \text{banda 7}}{\text{banda 6} \times \text{banda 6}}$$

Existe también el índice OHlb permite identificar pirofilita, este posee un pisco de absorción en la banda 5 (2.145µm – 2.185µm) y valores elevados de reflectancia en las bandas 4 (1.60µm – 1.70µm) y banda 7(2.235µm – 2.285µm). Su ecuación es la siguiente:

$$OHlb = \frac{\text{banda 4} \times \text{banda 7}}{\text{banda 5} \times \text{banda 5}}$$

El índice CLI sirve para la discriminación de calcita, clorita y epidota, presentando picos de absorción en la banda 8 (2.295µm – 2.365µm) y valores altos de reflectancia en la banda 6 (2.185µm – 2.225µm) y banda 9 (2.360µm – 2.430µm). Su ecuación en la siguiente:

$$CLI = \frac{\text{banda 6} \times \text{banda 9}}{\text{banda 8} \times \text{banda 8}}$$

Respecto al índice ALI, facilita la identificación de la alunita, esta tiene picos de absorción en la banda 5 (2.145µm – 2.185µm) y banda 8 (2.295µm – 2.365µm), y valores de reflectancia elevada en la banda 7 (2.235µm – 2.285µm).Su ecuación es la siguiente

$$ALI = \frac{\text{banda 7} \times \text{banda 7}}{\text{banda 5} \times \text{banda 8}}$$

El índice KLI sirve para la discriminación de caolinita y dickita, presentando picos de absorción en la banda 5 (2.145µm – 2.185µm) y en la banda 6 (2.185µm – 2.225µm) y valores altos de

reflectancia en la banda 4 (1.60µm – 1.70µm) y banda 8 (2.295µm – 2.365µm). Su ecuación en la siguiente:

$$KLI = \frac{\text{banda 4} \times \text{banda 8}}{\text{banda 5} \times \text{banda 6}}$$

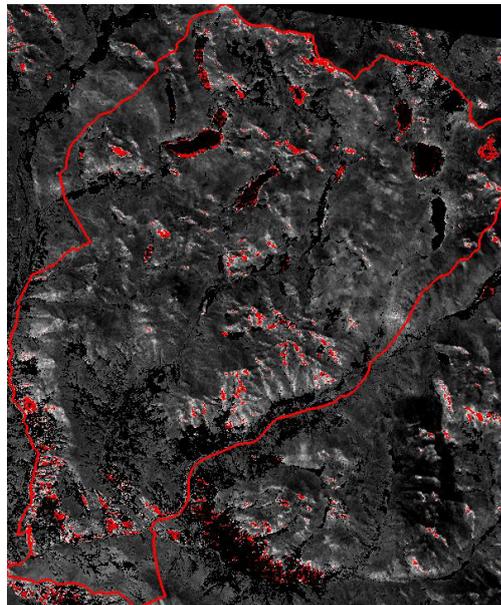
2.4.Resultados

Cocientes o ratios de bandas

Para la aplicación de la técnica espectral de cocientes de bandas, se presentan los siguientes resultados:

Figura 30

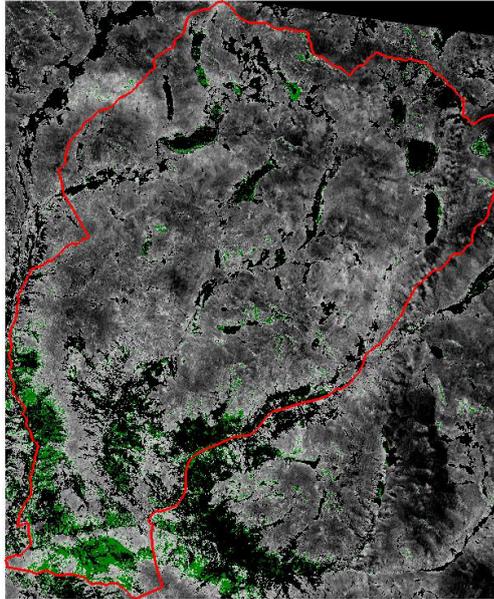
Cociente 4/6 – Alteración Argílica a filica



Se percibe presencia del ensamble mineralógico illita – moscovita – montmorillonita correspondiente al tipo de alteración Argílica a filica, con acumulaciones marcadas en la zona sur y sur oeste del área de estudio

Figura 31

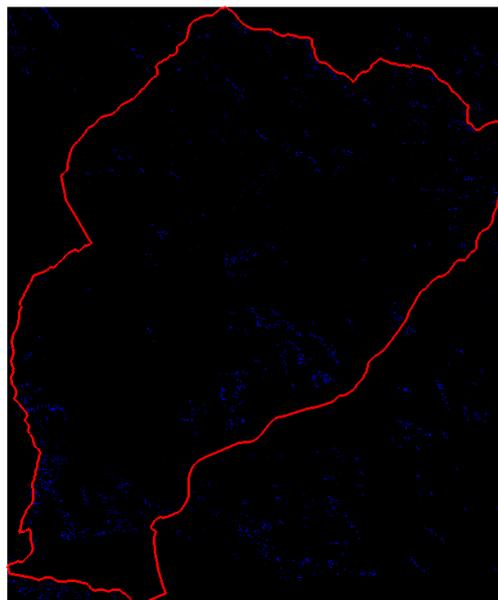
Cociente 4/5 – Alteración Argílica avanzada



El ensamble mineralógico expuesto es alunita – pirofilita – caolinita – dickita, correspondiente al tipo de alteración Argílica a avanzada; cuenta con gran presencia en la zona sur oeste del área de estudio.

Figura 32

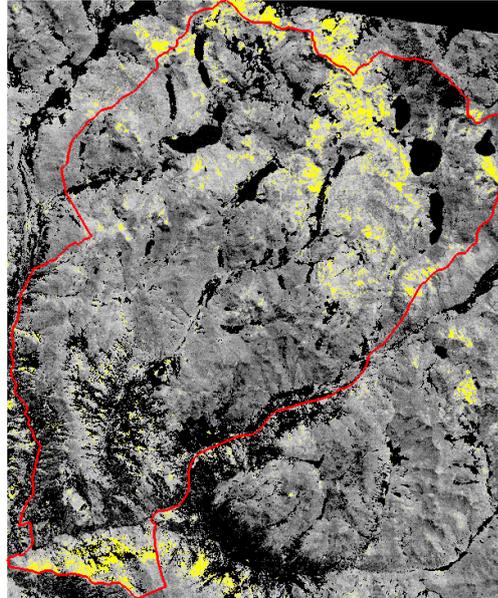
Cociente 5/8 – Alteración Propilítica



Se muestra en ensamble mineralógico clorita – epidota – calcita, perteneciente al tipo de alteración Propilítica; la distribución es variada, con acumulación significativa en la zona sur y sur oeste del área de estudio.

Figura 33

Cociente 2/1 – Óxidos e hidróxidos de Fe

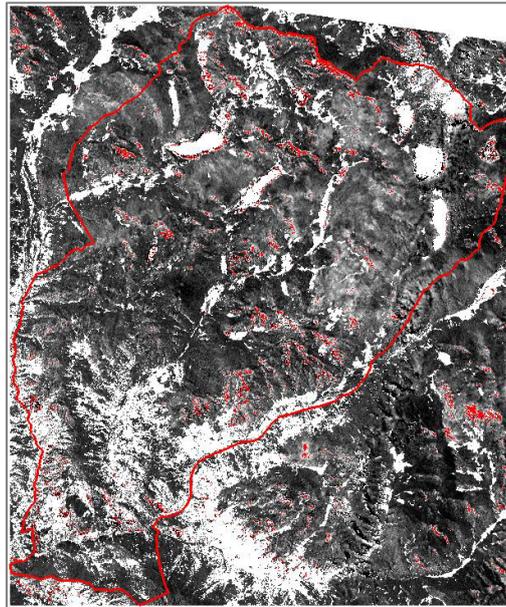


El ensamble mineralógico hematita - goetita perteneciente al tipo de alteración de Óxidos e hidróxidos de Fe; presenta acumulación marcada en las en la zonas nortes y suroeste del área de estudio.

Índice de identificación litológica SWIR

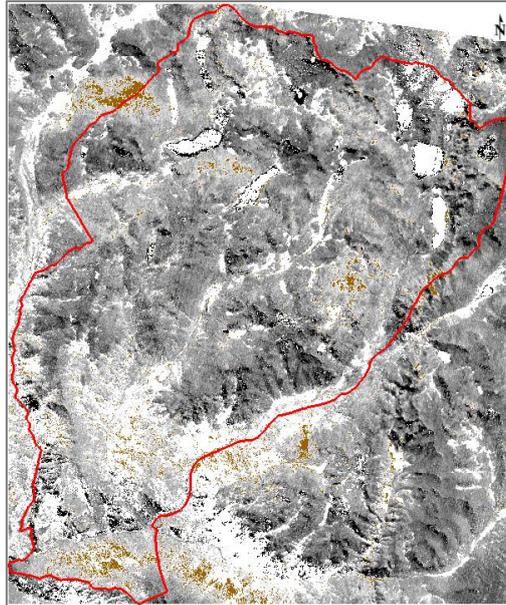
Para la aplicación de la técnica espectral de índices de bandas, se presentan los siguientes resultados:

Figura 34
Índice OHla



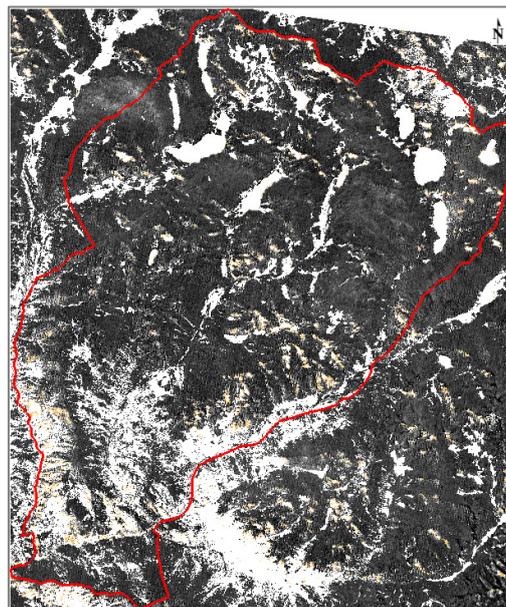
Se aplicó el índice OHla sobre la escena correspondiente al área de estudios, los píxeles en coloración roja representan aquellos que tienen respuesta espectral correspondiente a los minerales: moscovita illita y montmorillonita, presentes en la alteración hidrotermal de tipo argílica a filica.

Figura 35
Índice OHIb



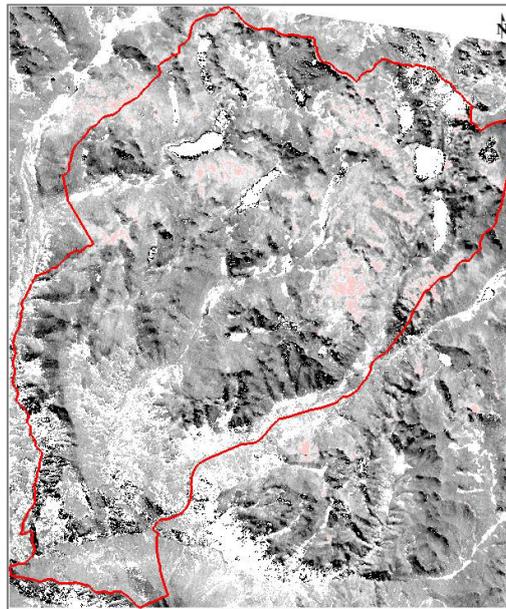
Se aplicó el índice OHIb sobre la escena correspondiente al área de estudios, los píxeles en coloración marrón representan aquellos que tienen respuesta espectral correspondiente a la pirofilita.

Figura 36
Índice CLI



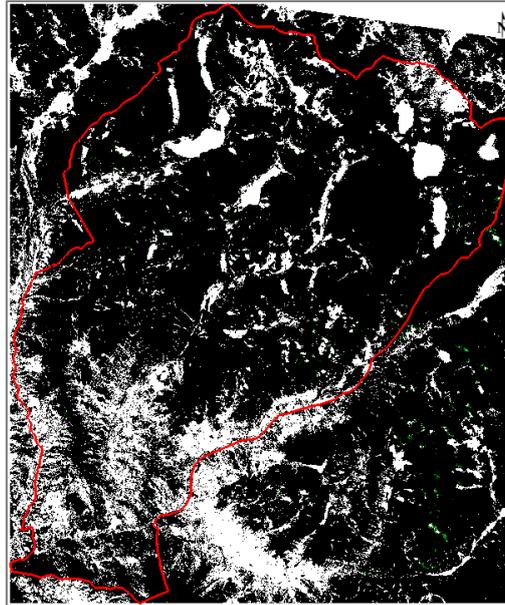
Se aplicó el índice CLI sobre la escena correspondiente al área de estudios, los píxeles en coloración naranja representan aquellos que tienen respuesta espectral correspondiente a los minerales: calcita, clorita y epidota; pertenecientes al tipo de alteración hidrotermal propilítica.

Figura 37
Índice ALI



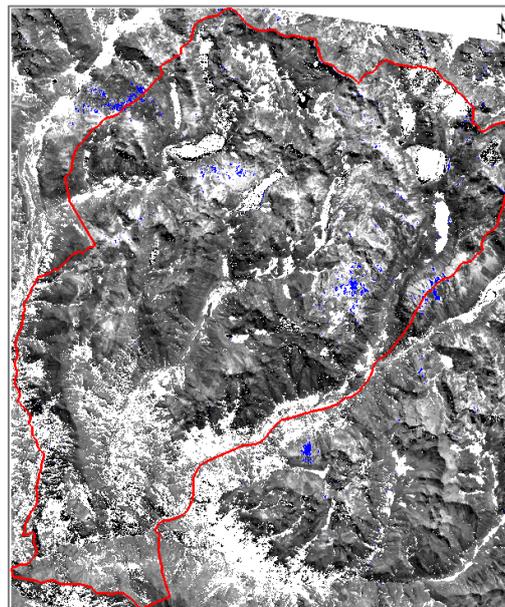
El índice ALI representa la alunita, los píxeles que presentan respuesta espectral tienen color rosa, con mayor presencia en las zonas noreste y noroeste dentro del área de estudio.

Figura 38
Índice KLI



Se aplicó el índice KLI sobre la escena correspondiente al área de estudios, los píxeles en coloración verde representan aquellos que tienen respuesta espectral correspondiente a la caolinita y dickita.

Figura 39
Integración OHIb - ALI - KLI



Se integraron los índices OHlb, ALI y KLI cuyos minerales resultantes corresponden a la alteración hidrotermal de tipo Argílica. En coloración azul se puede apreciar su concentración en la zona este y en menor proporción en el noroeste del área de estudio.

2.5.Discusión de Resultados

Posterior a la obtención de los resultados de cociente de bandas e índices de identificación litológica SWIR, se pueden identificar zonas que conforman ensambles mineralógicos propios de alteraciones hidrotermales específicas. En la zona suroeste se observan píxeles que responden al tipo de alteración argílica avanzada, con presencia de alunita, pirofilita, caolinita y dickita. Asimismo, en el sector centro sur se presenta la alteración argílica a filica, con ensambles de illita, moscovita y montmorillonita; y alteración propilítica con presencia de clorita, epidota y calcita. En la zona este se perciben píxeles con alteración propilítica y en la zona norte alteraciones argílica avanzada y argílica a filica. (Revisar Anexo)

III. APORTES DESTACABLES A LA EMPRESA/INSTITUCIÓN

Recopilación de información alfanumérica y gráfica para la elaboración de base de datos gis de comunidades campesinas para proyectos de exploraciones greenfield, elaboración de mapas para relaciones comunitarias, validación de entidades en función a contratos de usufructos o servidumbre entre empresa y comunidades campesinas.

Propuesta de identificación de alteraciones hidrotermales en áreas de interés a través del uso de imágenes satelitales ASTER, aplicando técnicas espectrales como composición RGB, cociente de bandas e índices de identificación litológica SWIR.

Implementación de herramientas GIS para recolección de datos en campo en tiempo real, para mantener un registro inmediato, estandarizado y georreferenciado; lo que permitió conocer la realidad de campo y tomar acciones en el corto plazo.

IV. CONCLUSIONES

4.1. En relación a los capítulos propuestos, resultados obtenidos y analizados, se llega a las conclusiones siguientes:

4.2. Las enseñanzas percibidas en mi formación profesional durante mi periodo de estudios en la Universidad Nacional Federico Villarreal en conjunto con las experiencias y conocimientos adquiridos, permiten que se pueda desarrollar el presente trabajo de suficiencia profesional.

4.3. Se aplicaron técnicas espectrales de corrección atmosférica, enmascaramiento de cuerpos de agua, vegetación y nieve. La composición de RGB 461, 469, 531, 461 y 943 para reconocimiento de óxidos y arcillas; los cocientes $4/6$, $4/5$, $5/8$ y $2/1$; los índices de identificación litológica Ohla, Ohlb, ALI, KLI, CLI; de los cuales se evidencia presencia de minerales de alteración tales como illita, moscovita, montmorillonita, alunita, pirofilita, caolinita, dickita, clorita, epidota, calcita, hematita y goetita.

4.4. Se concluye que existen seis zonas de alteración hidrotermal a partir de la elaboración de cartografía, las cuales resultan interesantes como áreas de prospección en materia de exploración minera.

V. RECOMENDACIONES

- 5.1. La metodología empleada podría ser adoptada por empresas o investigadores en materia de exploración geológica, teniendo en cuenta el uso de la escena Aster correcta para las zonas de interés.
- 5.2. Priorizar inicialmente el pre procesamiento para tener los valores correctos en los píxeles de la escena a evaluar, obteniendo valores de reflectancia que respondan correctamente al tipo de superficie en cuestión. Asimismo, es importante hacer la integración de bandas (layerstacking) y recorte específico de área de estudio.
- 5.3. Considerar el uso de una imagen en espectro visible para tener como referencia en la etapa de enmascaramiento, con la finalidad de afinar los valores de umbrales para la generación de vegetación, nieve y agua.
- 5.4. Realizar una revisión minuciosa al momento de integración de ensambles mineralógicos de métodos de índices y cocientes, con el objetivo de asociar de manera correcta los píxeles que representen litología similar. Asociar grupos de píxeles y considerar la geomorfología para establecer las zonas de alteración hidrotermal.

VI. REFERENCIAS

Cabellos C. (2022). *Caracterización de alteraciones hidrotermales mediante imágenes Aster y Sentinel 2, en la provincia del Santa Departamento de Ancash*. [Tesis pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional Universidad Nacional de Cajamarca. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/5277>

Paico L. (2022). *Determinación de zonas de alteración hidrotermal mediante imágenes Aster y Landsat en el distrito de Tantarica – Provincia de Contumazá*. [Tesis pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional Universidad Nacional de Cajamarca. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/5744>

Garro K. y Diaz L. (2020). *Prospección espectroscópica para la identificación de zonas mineralizadas en el distrito de Sorochuco, Cajamarca - 2020*. [Tesis pregrado, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional UPN. <https://hdl.handle.net/11537/24978>

Mamani T. (2017). *Aplicación de imágenes Aster en la detección de zonas de alteraciones hidrotermales, sector Titire, Carumas, Moquegua*. [Tesis pregrado, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional Universidad Nacional de Altiplano. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/4231>

Caiza E. (2018). *Estimación de zonas de alteración hidrotermal mediante interpretación de imágenes satelitales tipo Aster y uso del equipo Terraspec en la zona oriental de Cerro de Pasco, Perú*. [Tesis pregrado, Universidad Central del Ecuador]. Repositorio Institucional Universidad Nacional de Altiplano. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/14217>

Beiranvand Pour, A., Hashim, M. (2014) ASTER, ALI and Hyperion sensors data for lithological mapping and ore minerals exploration. *SpringerPlus*(3), 130.
<https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-130>

Perez D., D'dorico E. y Godeas M. (2010) Reconocimiento de alteración hidrotermal con el sensor Aster, en el curso medio del río Santa Cruz (31°40'S), provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 66(4), pp. 623-633.

VII. ANEXOS

Anexo A: Mapa de Alteraciones Hidrotermales

