



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**APLICACIÓN DE TELEDETECCIÓN Y CLASIFICACIÓN
SUPERVISADA EN EL RECONOCIMIENTO DE ZONAS DE
ALTERACIÓN HIDROTHERMAL EN EL DISTRITO MINERO
CHIMBEROS, REGIÓN DE ATACAMA**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de
Geólogo.

Profesor guía: Mg. Francisco Tapia Guerra

Javiera Belén Meriño Vega

Copiapó, Chile 2025



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**APLICACIÓN DE TELEDETECCIÓN Y CLASIFICACIÓN
SUPERVISADA EN EL RECONOCIMIENTO DE ZONAS DE
ALTERACIÓN HIDROTHERMAL EN EL DISTRITO MINERO
CHIMBEROS, REGIÓN DE ATACAMA**

Profesor guía: Mg. Francisco Tapia Guerra

Javiera Belén Meriño Vega

Copiapó, Chile 2025

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo marca el cierre de una etapa muy significativa en mi vida, llena de aprendizajes, desafíos y crecimiento, tanto en el ámbito personal como en el profesional. Agradezco infinitamente a todos quienes compartieron este camino a mi lado.

De manera especial, deseo expresar mi sincero agradecimiento a mi profesor guía Mg. Francisco Tapia, por su constante apoyo, orientación y compromiso durante el desarrollo de esta investigación. Su experiencia y dedicación fueron fundamentales para la concreción de esta tesis.

Extiendo también mi gratitud a mis compañeros y amigos de la universidad, así como a mis amigos y profesores del colegio, quienes me han acompañado en cada etapa de mi formación profesional, brindándome su apoyo e incentivo ante cada dificultad que se presentaba.

A mi familia, por sus valores y apoyo incondicional a lo largo de todo este proceso. Gracias por acompañarme con paciencia, motivarme en cada etapa y recordarme la importancia de perseverar y luchar por mis sueños, brindándome el ánimo y equilibrio necesario en los momentos más exigentes de estos años.

Finalmente, dedico este trabajo a todos aquellos que creyeron en mí y me impulsaron a superar los desafíos, aportando de distintas maneras a hacer posible este sueño que hoy se cumple.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Problema de investigación.....	2
1.2 Hipótesis.....	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo general.....	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.5 Ubicación y accesos	4
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 Yacimientos tipo skarn.....	6
2.2 Fundamentos de la teledetección.....	7
2.2.1 Sensor ASTER.....	8
2.2.2 Sensor Landsat 8.....	9
2.2.3 Sensor Sentinel-2	10
2.3 Técnicas de procesamiento para el análisis espectral	11
2.3.1 Band ratios (BR) y band math (BM).....	11
2.3.2 Combinaciones RGB	12
2.3.3 Spectral Angle Mapper (SAM).....	13
2.3.4 Teledetección aplicada a la exploración minera	14
CAPÍTULO 3: MARCO GEOLÓGICO	18
3.1 Geología regional	18
3.1.1 Grupo Chañarcillo (Kch2), Jurásico Superior - Cretácico Inferior.....	19
3.1.2 Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), Cretácico Inferior.....	19
3.1.3 Granodioritas, tonalitas y dioritas cuarcíferas de hornblenda (Ksg), Cretácico Superior bajo.....	20
3.1.4 Monzodioritas cuarcíferas, dioritas y monzonitas cuarcíferas (Kpg (a)), Cretácico Superior - Paleoceno.....	20
3.1.5 Depósitos aluviales (Qa), Cuaternario	20
3.2 Geología estructural.....	21
CAPÍTULO 4: MARCO METODOLÓGICO	22
4.1 Identificación de la mineralogía de alteración.....	23
4.1.1 Etapa de gabinete	23
4.1.2 Adquisición de imágenes satelitales	24
4.1.3 Corrección y preprocesamiento de imágenes satelitales.....	25
4.1.4 Procesamiento de imágenes satelitales ASTER.....	26
4.1.5 Procesamiento de imágenes satelitales Landsat 8.....	29
4.1.6 Procesamiento de imágenes satelitales Sentinel-2	30
4.2 Caracterización de las propiedades espectrales de las unidades geológicas.....	31
4.3 Definición de zonas con potencial de ocurrencia para la mineralización.....	32
4.4 Validación de las zonas de alteración hidrotermal detectadas mediante el procesamiento de imágenes satelitales	32

CAPÍTULO 5: RESULTADOS.....	34
5.1 Identificación de la mineralogía de alteración del área de estudio.....	34
5.1.1 Resultados derivados de imágenes satelitales de ASTER.....	34
5.1.2 Resultados derivados de imágenes satelitales de Landsat 8.....	54
5.1.3 Resultados derivados de imágenes satelitales de Sentinel-2.....	60
5.2 Caracterización de las propiedades espectrales de las unidades geológicas presentes en el área.	70
5.3 Resultados de la verificación espectral y de campo.	75
5.4 Validación de zonas de alteración hidrotermal detectadas mediante el procesamiento de imágenes satelitales	78
CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN	82
6.1. Comparación de resultados entre satélites.....	82
6.2. Identificación de mineralogía de alteración presente en el sector de estudio.	83
6.3. Caracterización de las propiedades espectrales en las unidades geológicas presentes en el área.	85
6.4. Interpretación de posible ocurrencia de zonas mineralizadas presentes en el sector de estudio	87
6.5. Validación de zonas de alteración hidrotermal detectadas mediante el procesamiento de imágenes satelitales	89
6.5.1 Consideraciones de los métodos de clasificación mineralógica	96
6.5.2 Limitaciones del análisis espectral con ASD TerraSpec.....	97
6.5.3 Potenciales estudios futuros.....	98
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES	100
CAPÍTULO 8: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101
CAPÍTULO 9: ANEXOS	112

RESUMEN

El presente estudio abordado en el distrito minero Chimberos-Tres Puntas, localizado 19 km al sur de Inca de Oro, región de Atacama, tiene como objetivo principal identificar y caracterizar la mineralogía de alteración, además de evaluar su relación con unidades intrusivas mineralizantes mediante el análisis de imágenes multiespectrales de los sensores ASTER, Landsat 8 y Sentinel-2. Para ello, se aplicaron técnicas de procesamiento en el *software* ENVI 6.1, empleando combinaciones RGB, *band ratios* (BR), *band math* (BM) y el algoritmo *spectral angle mapper* (SAM). Posteriormente, los resultados se validaron en terreno mediante la extracción de muestras en áreas donde se identificaron minerales asociados a alteraciones hidrotermales. Finalmente, se efectuó un análisis de espectroscopia de reflectancia (ASD TerraSpec) y descripción litológica de las muestras. Las técnicas aplicadas evidenciaron diversas mineralogías y alteraciones, incluyendo alteración argílica avanzada, filica, propilítica y mineralogía calcosilicatada, dominadas por alunita, caolinita, actinolita, granate, tremolita, vesuvianita, entre otros minerales. Asimismo, se reconocieron fases retrogradadas caracterizadas por el desarrollo de clorita, epidota y carbonatos. La coincidencia entre las anomalías espectrales de minerales y las aureolas metasomáticas descritas por Matthews *et al.* (2006), además de su relación con los laboreos mineros Hilda y Cecilia, validan la metodología empleada. ASTER, demostró alta sensibilidad en el rango TIR, permitiendo discriminar zonas con alteración y minerales calcosilicatados; Landsat 8, facilitó la delimitación regional de las áreas con alteración hidrotermal y estructuras; Sentinel-2, con su alta resolución espacial, definió con mayor detalle los contactos litológicos y de alteración. En conclusión, el enfoque multiespectral demostró ser eficiente, de bajo costo y replicable para la delimitación preliminar de halos metasomáticos en ambientes áridos; no obstante, se recomienda incorporar imágenes hiperespectrales, análisis geoquímicos (XRF, ICP-MS) y mineralógicos (DRX, QEMSCAN), para lograr una caracterización más precisa y detallada de la evolución metasomática del yacimiento.

TELEDETECCIÓN - ALTERACIÓN HIDROTERMAL - SKARN - ANÁLISIS
ESPECTRAL - PROSPECCIÓN MINERAL

ABSTRACT

The present study, conducted in the Chimberos-Tres Puntas mining district, located 19 km south of Inca de Oro in the Atacama Region, aims to identify and characterize alteration mineralogy and to evaluate its relationship with mineralizing intrusive units through the analysis of multispectral images from ASTER, Landsat 8, and Sentinel-2 sensors. For this purpose, image processing techniques were applied using ENVI 6.1 software, including RGB combinations, band ratios (BR), band math (BM), and the spectral angle mapper (SAM) algorithm. The results were later validated in the field through sample collection in areas where minerals associated with hydrothermal alterations were identified. Finally, reflectance spectroscopy analysis (ASD TerraSpec) and lithological descriptions of the samples were carried out. The applied techniques revealed various mineralogies and alteration types, including advanced argillic, phyllic, propylitic, and calc-silicate mineral assemblages dominated by alunite, kaolinite, actinolite, garnet, tremolite, vesuvianite, among other minerals. Retrograde phases characterized by the development of chlorite, epidote, and carbonates were also recognized. The correspondence between spectral mineral anomalies and metasomatic halos described by Matthews *et al.* (2006), along with their relation to the Hilda and Cecilia mining works, validates the applied methodology. ASTER demonstrated high sensitivity in the TIR range, allowing discrimination of zones with alteration and calc-silicate minerals; Landsat 8 facilitated regional delimitation of hydrothermal alteration areas and structures; and Sentinel-2, with its high spatial resolution, provided greater detail in defining lithological and alteration contacts. In conclusion, the multispectral approach proved to be efficient, low-cost, and replicable for the preliminary delineation of metasomatic halos in arid environments; however, it is recommended to incorporate hyperspectral imagery and geochemical (XRF, ICP-MS) and mineralogical (XRD, QEMSCAN) analyses to achieve a more precise and detailed characterization of the metasomatic evolution of the deposit.

REMOTE SENSING - HYDROTHERMAL ALTERATION - SKARN - SPECTRAL
ANALYSIS - MINERAL EXPLORATION

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

La teledetección es un conjunto de técnicas que permiten obtener información de la superficie terrestre a partir de la detección de la energía electromagnética emitida o reflejada por los objetos, utilizando sensores que no están en contacto directo con ellos (Chuvienco, 1996).

La exploración y caracterización de zonas de alteración hidrotermal son esenciales para identificar depósitos que son típicos en regiones con actividad magmática y tectónica compleja, como lo es en la región de Atacama. La presencia de yacimientos minerales se relaciona estrechamente con los procesos magmáticos y fallas tectónicas que facilitan la circulación de fluidos que se encuentran enriquecidos en minerales. Producto de esto se genera una alteración hidrotermal que modifica la roca huésped, generando zonas de interés que son detectables mediante las diversas técnicas de exploración, permitiendo localizar futuras áreas de interés para prospectos mineros (Pirajno, 2009). La historia geológica de la región de Atacama es caracterizada por una intensa actividad metalogénica durante el Jurásico hasta el Cretácico, lo cual favorece la formación de sistemas hidrotermales complejos y variados, tales como estratoligados (Rivera y Navarro, 2002; Maksaev *et al.*, 2006), IOCG-IOA (Sillitoe, 2003; Marschik y Fontboté, 2001), pórfidos cupríferos (Camus, 2003; Sillitoe y Perelló, 2005) y los yacimientos tipo skarn (Camus, 2003; Maksaev y Zentilli, 1999).

Adicionalmente, los depósitos tipo skarn son el resultado de procesos metasomáticos en los márgenes de intrusiones ígneas donde los fluidos hidrotermales ricos en componentes minerales interactúan con las rocas carbonatadas. Esta interacción da lugar a una mineralogía dominada por silicatos de calcio, hierro y aluminio, formando minerales como granate (andradita-grosularia), piroxenos (hedenbergita-dióxido), epidota y otros. La distribución de estos depósitos depende de factores como la temperatura, la composición del fluido y del protolito, así como del contexto tectónico y geológico en el que se desarrollan. Estos depósitos tienen un interés económico significativo debido a su capacidad para concentrar minerales de mena (Einaudi *et al.*, 1981).

El distrito minero Chimberos-Tres Puntas, ubicado en la región de Atacama, forma parte de una provincia metalogénica reconocida por sus depósitos de oro y plata de tipo epitermal y pórfido. Este distrito se encuentra en proximidad al histórico centro minero de Inca de Oro, que ha sido un importante foco de actividad minera, con explotación de vetas auríferas y brechas mineralizadas con cobre, oro y molibdeno (Matthews *et al.*, 2006).

Hoy en día podemos reconocer que la aplicación de técnicas de teledetección ha revolucionado la exploración minera al permitir la identificación remota de zonas de alteración hidrotermal de difícil acceso o muy extensas. Sensores satelitales como Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) y Sentinel-2 MultiSpectral Instrument (MSI) ofrecen datos multiespectrales que facilitan la detección de minerales indicativos de alteración (Rowan y Mars, 2003; Van der Meer *et al.*, 2012).

La zona de estudio fue analizada a partir de imágenes satelitales multiespectrales provenientes de los sensores ASTER, Landsat 8 OLI y Sentinel-2 MSI. Estos sensores fueron seleccionados por sus características espectrales y espaciales complementarias, que permiten una adecuada discriminación de las litologías y zonas de alteración hidrotermal en ambientes geológicos complejos. En este contexto, el presente estudio, busca contribuir al conocimiento y aplicación de la teledetección en la exploración de depósitos tipo skarn, demostrando su utilidad como herramienta complementaria en la identificación y caracterización de zonas de interés en ambientes áridos.

1.1 Problema de investigación

La teledetección se ha consolidado como una herramienta eficaz para la identificación de alteraciones hidrotermales asociadas a depósitos minerales, permitiendo optimizar los costos y tiempos de exploración frente a los métodos tradicionales (Sabins, 1999; Van der Meer *et al.*, 2012). Su aplicación ha resultado especialmente útil en ambientes áridos, donde las condiciones climáticas y la limitada accesibilidad dificultan la observación directa de afloramientos geológicos (Carranza *et al.*, 2008).

En este contexto, en el distrito minero Chimberos-Tres Puntas, la carta geológica publicada por Matthews *et al.* (2006), describe el desarrollo de una aureola metasomática desarrollada en calizas fosilíferas y areniscas calcáreas del Grupo Chañarcillo,

caracterizada por porfidoblastos de andradita-grosularia y superposición de una fase retrógrada con escapolita, calcita y micas blancas, sin embargo, no se detalla su zonación espacial. Esta falta de información limita la comprensión del desarrollo del sistema hidrotermal y dificulta la identificación de zonas con potencial mineralógico.

A su vez, pese a los avances en el uso de sensores remotos, aún existe escasa validación local sobre la efectividad de imágenes multiespectrales de los diversos sensores como ASTER, Landsat 8 y Sentinel-2, además del método SAM para la identificación de zonas alteradas en depósitos tipo skarn del norte de Chile. La limitada aplicación de estudios similares en este tipo de ambientes y depósitos impide establecer comparaciones confiables y evaluar la precisión de los resultados obtenidos mediante la teledetección. Además, la respuesta espectral de los minerales puede verse afectada por factores como la cobertura superficial o el grado de meteorización, lo que refuerza la necesidad de realizar estudios de validación en terreno (Crowley *et al.*, 2003).

Para ello, resulta necesario evaluar la capacidad de los sensores ASTER, Landsat 8 y Sentinel-2 para generar una caracterización precisa y confiable de alteraciones hidrotermales en depósitos skarn, contribuyendo al desarrollo de metodologías de exploración más eficientes, replicables y de menor costo (Rowan y Mars, 2003; Mars y Rowan, 2010). Surge así la interrogante sobre ¿Qué grado de correlación existe entre las anomalías espectrales detectadas por los sensores satelitales ASTER, Landsat 8 y Sentinel-2 con las observaciones geológicas validadas en terreno? ¿Qué sensor ofrece una mejor capacidad para discriminar zonas de alteración hidrotermal en un ambiente árido? ¿En qué medida la integración de técnica de procesamiento multiespectrales mejora la delimitación de aureolas metasomáticas en comparación con métodos convencionales? y ¿En qué medida los resultados obtenidos en el distrito Chimberos-Tres Puntas podrían extrapolarse a otros contextos geológicos con características similares del norte de Chile?.

1.2 Hipótesis

El uso combinado de imágenes satelitales ASTER, Landsat 8 y Sentinel-2, junto con técnicas avanzadas de procesamiento digital y análisis espectral, permitirá identificar y mapear con alta precisión las zonas de alteración hidrotermal en el sector sur del distrito minero Chimberos-Tres Puntas. Se espera que la integración de estos sensores, debido a

sus diferentes resoluciones espaciales y espectrales, facilitará la diferenciación de los minerales de alteración característicos, asociados a sistemas mineralizados de tipo skarn. Dado que los depósitos tipo skarn presentan alteraciones hidrotermales bien definidas, se plantea que el empleo de BR, BM, combinaciones RGB y SAM permitirá discriminar con mayor exactitud estas zonas, favoreciendo la identificación de patrones espaciales característicos. Asimismo, la integración de los resultados espectrales con la validación mediante espectroscopia de reflectancia (ASD TerraSpec) y análisis de campo, permitirá validar la relación entre las zonas alteradas identificadas y la mineralogía local. De esta manera, el estudio contribuirá al desarrollo de metodologías eficientes para la detección remota de alteraciones hidrotermales en depósitos tipo skarn, optimizando las estrategias de prospección minera y caracterización geológica del área de estudio.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Establecer un modelo espacial de las zonas de alteración hidrotermal presentes en el distrito minero Chimberos-Tres Puntas, aplicable para la exploración de zonas con potencial de mineralización.

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar la mineralogía de alteración presente en el sector de estudio.
- Caracterizar las propiedades espectrales de las unidades geológicas presentes en el área.
- Interpretar la posible ocurrencia de zonas mineralizadas en el sector de estudio.
- Validar las zonas de alteración hidrotermal detectadas mediante el procesamiento de imágenes satelitales.

1.5 Ubicación y accesos

El área de estudio se encuentra ubicada en la precordillera de la región de Atacama (Figura 1.1a), aproximadamente a 62,69 kilómetros al noreste de la ciudad de Copiapó en línea recta, y a 86 kilómetros de distancia transitando hacia el sur desde la Universidad de Atacama por la carretera Panamericana Norte Ruta 5 por 11 kilómetros, posteriormente

se toma la Carretera del Inca Ruta 31 por 16 kilómetros y finalmente por la Ruta C-17 por 59 kilómetros, al detener el tránsito por esta vía, hacia el costado izquierdo de la carretera se encontrará un acceso a un camino minero el cual permite la llegada hacia el área de estudio (Figura 1.1b) comprendida entre las coordenadas (7026000.00 N, 402600.00 E), (7022460.00 N, 402600.00 E), (7022460.00 N, 406800.00 E) y (7026000.00 N, 406800.00 E) en el sistema de coordenadas EPSG:32719 WGS 84 / UTM zone 19S.

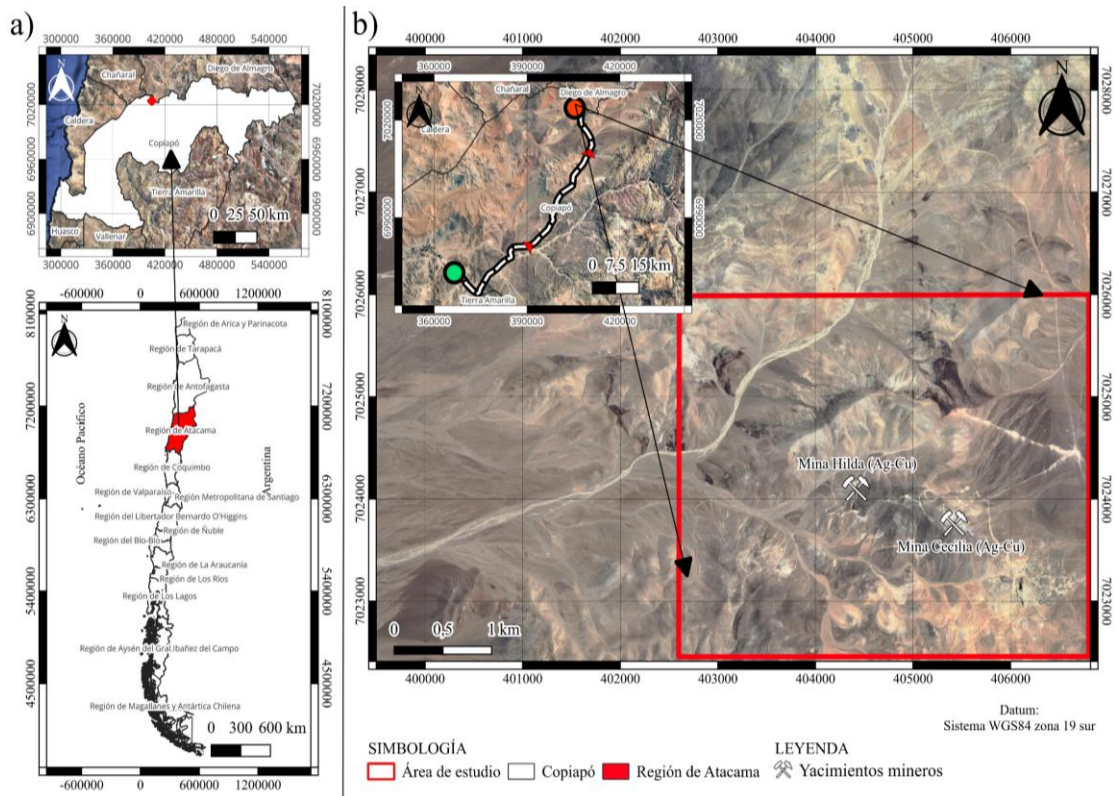


Figura 1.1. a) Ubicación del área de estudio a nivel nacional y comunal. b) Acceso al área de estudio desde la Universidad de Atacama, y delimitaciones en el recuadro de color rojo.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Yacimientos tipo skarn

Estos yacimientos se originan por procesos generados a partir de un metasomatismo de contacto, donde los fluidos hidrotermales, generalmente de origen magmático, reaccionan con rocas carbonatadas, produciendo un reemplazo metasomático caracterizado por el desarrollo de un ensamblaje mineralógico específico (Meinert *et al.*, 2005).

Desde el punto de vista genético, los skarn se asocian típicamente a intrusivos ígneos calcoalcalinos de composición intermedia a félsica, que liberan fluidos ricos en volátiles durante su etapa de cristalización tardía. Estos fluidos, al migrar a través de zonas permeables en el contacto con las calizas, dolomías o rocas carbonatadas silicificadas, donde generan reacciones metasomáticas que originan minerales con alto contenido de calcio, hierro y magnesio, como granate, piroxeno, wollastonita, epidota, vesuvianita, entre otros. Esta diversidad mineralógica está condicionada por la composición de los fluidos, la temperatura del sistema, la naturaleza de la roca huésped y la evolución química del sistema hidrotermal (Einaudi *et al.*, 1981).

Los skarn suelen ubicarse en los contactos de los intrusivos plutónicos con secuencias carbonatadas mesozoicas y paleozoicas (Sillitoe, 2010). Estos cuerpos de mineralización adoptan geometrías de mantos, chimeneas o lentes subverticales, controladas estructuralmente por fracturas, zonas de cizalla y contactos litológicos favorables. Los halos de alteración de skarn son zonales (Figura 2.1), presentando una secuencia característica desde una zona interna de granate y piroxeno hacia zonas externas con epidota, clorita, actinolita y carbonatos remanentes (Meinert *et al.*, 2005).

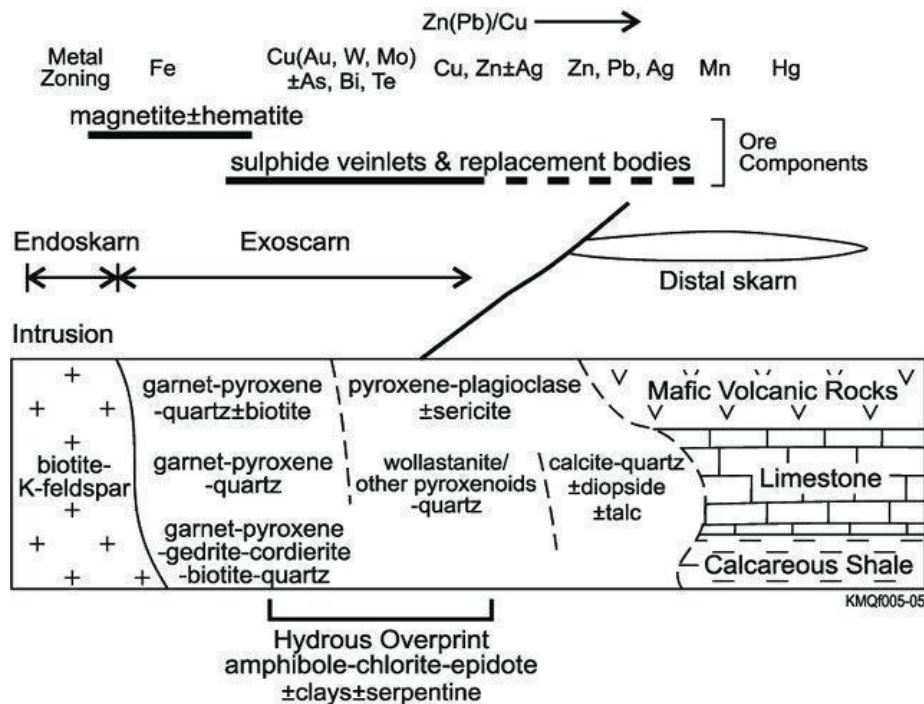


Figura 2.1. Estructura esquemática de los depósitos de skarn que muestra la mineralogía de alteración típica y la zonación de metales. Extraído de McQueen, (2005).

2.2 Fundamentos de la teledetección

La teledetección es una disciplina que permite obtener información sobre objetos o áreas situadas en la superficie terrestre, sin establecer contacto físico directo con ellos. Este proceso se basa en la detección y análisis de la energía electromagnética que los objetos reflejan o emiten, la cual es captada por los sensores (Chuvieco, 1996).

El principio básico de la teledetección radica en la interacción de la energía electromagnética con la superficie terrestre. Dicha energía puede ser absorbida, reflejada o transmitida por los objetos según sus características fisicoquímicas. La cantidad y calidad de energía reflejada o emitida varía en función del tipo de material y de la longitud de onda considerada en la región específica del espectro electromagnético que se considere (NASA ARSET, 2023; Lillesand *et al.*, 2015). Esto permite la discriminación y detección de litologías y alteraciones hidrotermales mediante sensores remotos multispectrales e hiperspectrales (Campbell y Wynne, 2011).

El espectro electromagnético (Figura 2.2) abarca un rango continuo de ondas que se clasifican en distintas categorías según su tamaño y frecuencia. Cada una de estas regiones

posee características particulares y se emplea en diversas aplicaciones de la teledetección (National Council of Educational Research and Training; 2006).

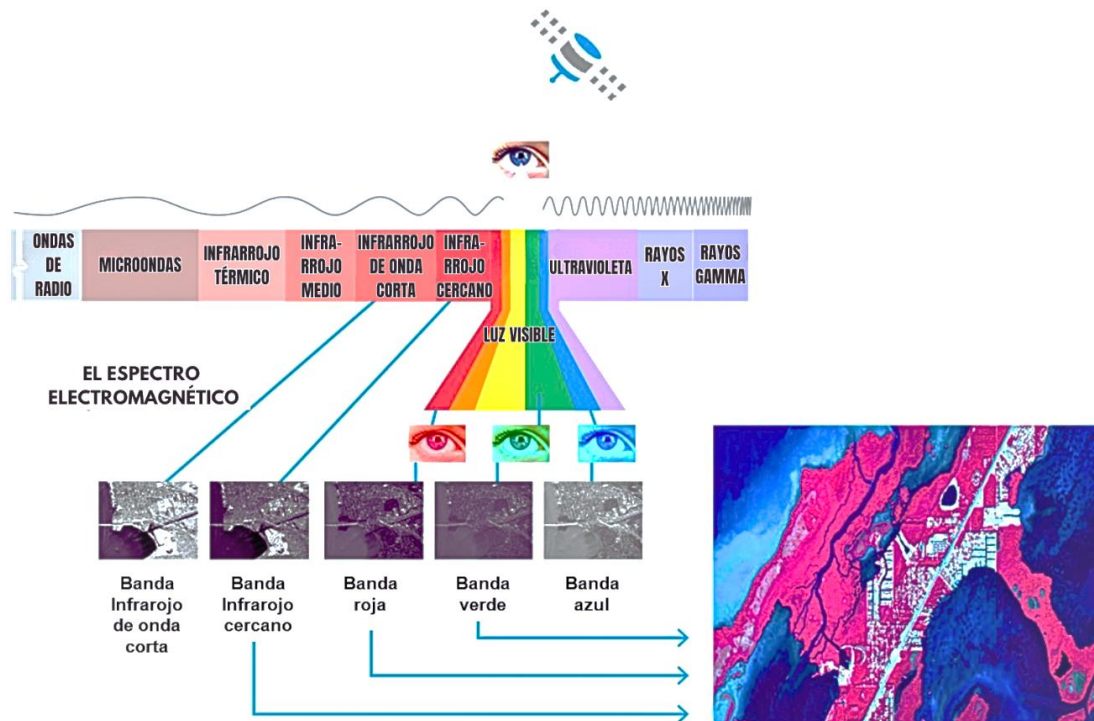


Figura 2.2. Bandas del espectro electromagnético que se utilizan para obtener imágenes satelitales. Modificado de Brown y Harder (2016).

El proceso de teledetección comprende varias etapas esenciales, entre las cuales se encuentran, la captación de datos mediante sensores remotos, transmisión de los datos a estaciones receptoras, preprocesamiento y procesamiento digital de las imágenes obtenidas, además del análisis e interpretación de las imágenes. Para lo cual, durante el preprocesamiento y procesamiento, se deben realizar correcciones radiométricas, geométricas y atmosféricas según sea el caso, para garantizar la calidad de los datos y su correcta interpretación. Posteriormente, los datos se analizan para identificar patrones, cambios y características específicas del área de estudio (Chuvieco, 1995).

2.2.1 Sensor ASTER

Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), se lanzó a bordo de la nave espacial Terra de la NASA en diciembre de 1999. Cubre una amplia región espectral con 14 bandas (Tabla 2.1), desde el visible hasta el infrarrojo

térmico, con alta resolución espacial, espectral y radiométrica. Además, posee una banda adicional de infrarrojo cercano retrospectivo que proporciona cobertura estéreo. La resolución espacial varía con la longitud de onda: 3 bandas espectrales (0,52–0,86 μm) con una resolución de 15 m en el visible y el infrarrojo cercano (VNIR), 6 bandas espectrales (1,60–2,43 μm) con una resolución de 30 m en el infrarrojo de onda corta (SWIR), y 5 bandas espectrales (8,125–11,65 μm) con una resolución de 90 m en el infrarrojo térmico (TIR) (Abrams *et al.* 2002; 2010).

Tabla 2.1. Características de los sensores de ASTER. Extraído de Abrams *et al.* (2002).

Subsistema	N.º de banda	Rango espectral (μm)	Resolución espacial
VNIR	1	0.52-0.60	15
	2	0.63-0.69	
	3N	0.78-0.86	
	3B	0.78-0.86	
SWIR	4	1.60-1.70	30
	5	2.145-2.185	
	6	2.185-2.225	
	7	2.235-2.285	
	8	2.295-2.365	
	9	2.360-2.430	
TIR	10	8.125-8.475	90
	11	8.475-8.825	
	12	8.925-9.275	
	13	10.25-10.95	
	14	10.95-11.65	

2.2.2 Sensor Landsat 8

El satélite Landsat 8, lanzado el año 2013, integra el histórico programa Landsat gestionado por la NASA y el United States Geological Survey (USGS). Este cuenta con dos sensores avanzados: Operational Land Imager (OLI), que capta datos multiespectrales de alta resolución, y Thermal Infrared Sensor (TIRS), el cual permite la captura de

información térmica, facilitando el análisis detallado de la superficie terrestre (USGS, 2019). Las bandas del satélite Landsat 8 (Tabla 2.2) se dividen en su sensor OLI que captura información de 9 bandas espectrales que abarcan desde el visible hasta el infrarrojo de onda corta (SWIR), con resoluciones espaciales de 30 m en las bandas multiespectrales y de 15 m en la pancromática. Por su parte, el TIRS cuenta con 2 bandas térmicas (banda 10 y 11) con una resolución espacial original de 100 m, posteriormente remuestreadas a 30 m para su compatibilidad con los productos OLI (Roy *et al.*, 2014).

Tabla 2.2. Características de los sensores de Landsat 8. Extraído de USGS, (2019).

Sensor	Banda	Rango espectral (μm)	Resolución (m)	Descripción
OLI	1	0.43 – 0.45	30	Azul profundo
	2	0.45 – 0.51	30	Azul
	3	0.53 – 0.59	30	Verde
	4	0.64 – 0.67	30	Rojo
	5	0.85 – 0.88	30	NIR
	6	1.57 – 1.65	30	SWIR 1
	7	2.11 – 2.29	30	SWIR 2
	8	0.50 – 0.68	15	Pancromática
	9	1.36 – 1.38	30	Cirrus
TIRS	10	10.60 – 11.19	100 (remuestreado a 30)	Térmica 1
	11	11.50 – 12.51	100 (remuestreado a 30)	Térmica 2

2.2.3 Sensor Sentinel-2

El sensor Sentinel-2 es parte del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA). Este fue lanzado en el año 2015, y transporta a bordo al sensor MultiSpectral Instrument (MSI), radiómetro multiespectral de alta resolución espacial y alta frecuencia temporal, clave en estudios ambientales, agrícolas y geológicos (Drusch *et al.*, 2012). El sensor captura imágenes en 13 bandas espectrales (Tabla 2.3), que cubren desde el visible hasta el infrarrojo de onda corta (SWIR), con resoluciones espaciales de 10, 20 y 60 m según la banda. La combinación de su cobertura espectral, resolución y frecuencia de

revisita (5 días) lo posiciona como uno de los sistemas satelitales más versátiles para el monitoreo terrestre (ESA, 2015).

Tabla 2.3. Características de los sensores de Sentinel-2. Extraído de Martínez, (2020).

Banda	Rango espectral (μm)	Resolución (m)	Descripción
B1	0.43 – 0.45	60	Aerosoles en atmósfera
B2	0.45 – 0.52	10	Azul
B3	0.54 – 0.57	10	Verde
B4	0.65 – 0.68	10	Rojo
B5	0.69 – 0.71	20	Red-edge 1 (vegetación)
B6	0.73 - 0.74	20	Red-edge 2
B7	0.77 – 0.79	20	Red-edge 3
B8	0.78 – 0.90	10	Infrarrojo cercano (NIR)
B8A	0.85 – 0.87	20	Infrarrojo cercano 2 (NIR)
B9	0.93 – 0.95	60	Vapor de agua
B10	1.36 – 1.39	60	Cirrus
B11	1.56 – 1.65	20	SWIR 1
B12	2.10 – 2.28	20	SWIR 2

2.3 Técnicas de procesamiento para el análisis espectral

El análisis espectral se fundamenta en la utilización de diversas técnicas para el procesamiento de imágenes multiespectrales, entre los métodos más empleados se encuentran los BR, BM, combinaciones RGB y SAM, los cuales contribuyen a una interpretación más precisa y objetiva de la información satelital (Kruse *et al.*, 1993; Rowan *et al.*, 2005).

2.3.1 *Band ratios* (BR) y *band math* (BM)

Los *band ratios* (BR) consisten en la división entre dos bandas espectrales con el objetivo de resaltar diferencias relativas de reflectancia (Figura 2.3). Esta técnica permite la identificación de materiales específicos cuya firma espectral se caracteriza por un contraste particular entre dos longitudes de onda (Sabins, 1999). En la geología, resulta útil para detectar zonas de alteración hidrotermal, específicamente mediante el realce de

minerales indicativos (Van der Meer *et al.*, 1997). Los *band math* (BM) son una herramienta algebraica que permite realizar operaciones matemáticas entre varias bandas espectrales para generar índices o combinaciones personalizadas. Esta técnica es fundamental en la detección de zonas de alteración hidrotermal, ya que permite crear indicadores espectrales sensibles a ciertos minerales (Sabins, 1999). En el sensor ASTER esta herramienta permite detectar presencia de minerales hidratados, los cuales presentan máximos o mínimos de reflectancia en longitudes de ondas específicas (Ninomiya, 2003).

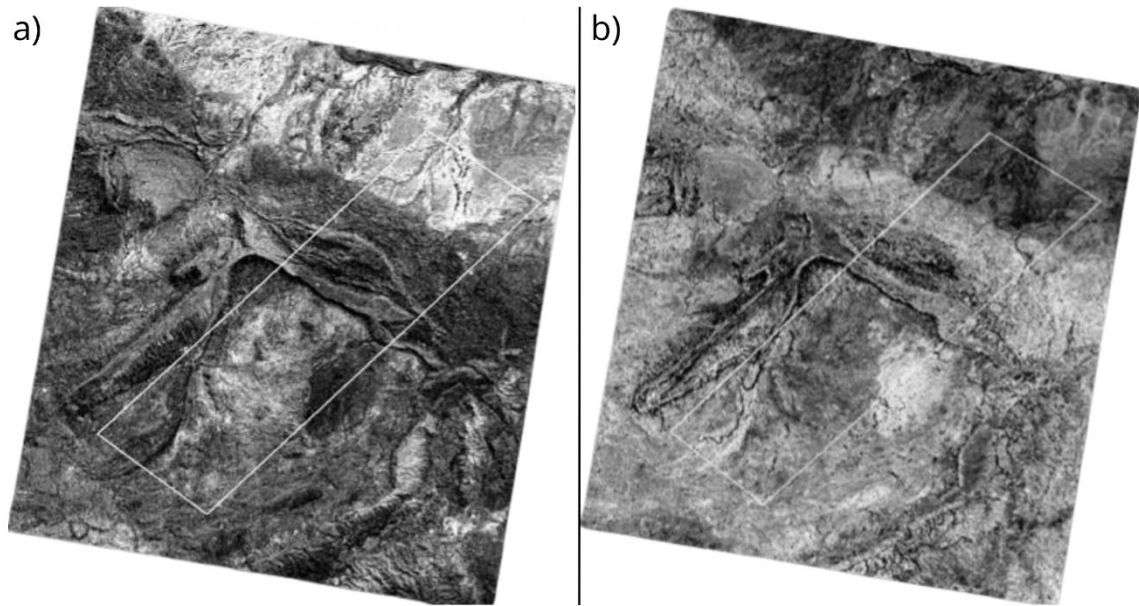


Figura 2.3. Ejemplo de técnica de procesamiento BR, extraída de Rowan *et al.* (2005). a) BR B2/B1 para identificar hierro férrico. b) BR B1/B2 para identificar hierro ferroso.

2.3.2 Combinaciones RGB

Las combinaciones RGB (Figura 2.4) consisten en la combinación de tres bandas espectrales, asignadas a los canales rojo, verde y azul, con el propósito de generar una representación multispectral. Esta técnica permite resaltar contrastes espectrales entre diferentes tipos de cobertura o materiales en la superficie, facilitando la interpretación visual de imágenes satelitales. Su aplicación es fundamental para la identificación de patrones espaciales y observación de variaciones superficiales asociadas a alteraciones o minerales, resultando útil para validar y distinguir zonas con potencial de mineralización o presencia de alteración hidrotermales (Drury, 2001).

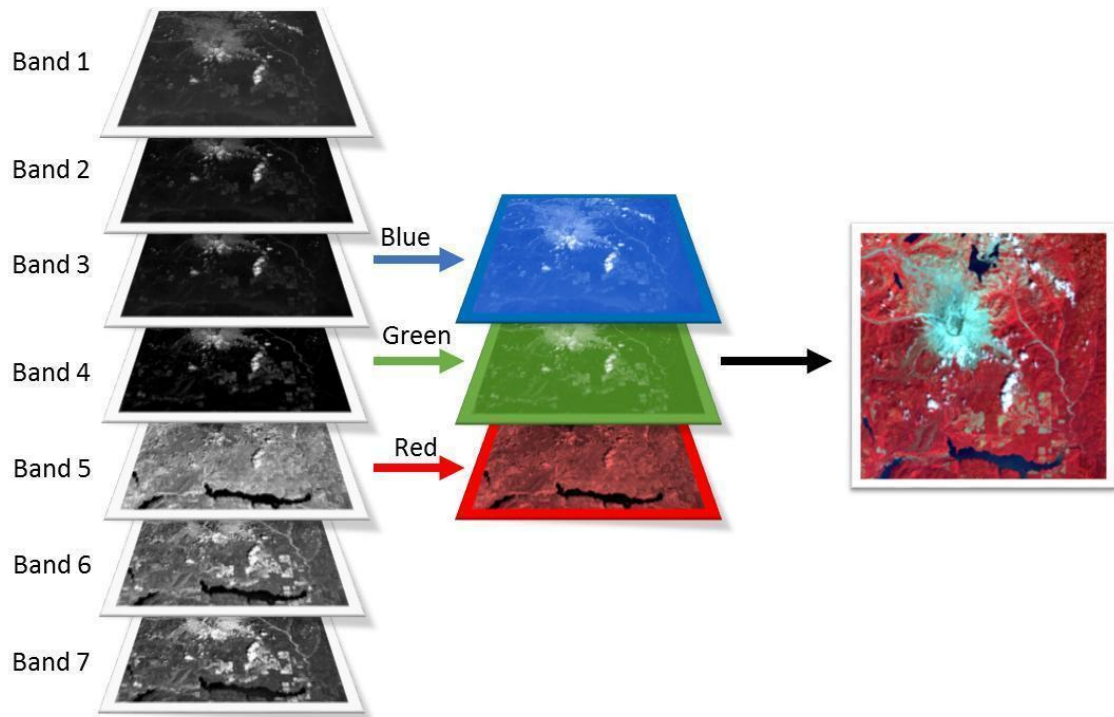


Figura 2.4. Imagen explicativa del desarrollo de una combinación RGB en falso color. En el caso de la figura, se dispone de una imagen satelital que consta de 7 bandas, de las cuales se seleccionan las bandas 5-4-3 para los canales RGB, resultando en una imagen en falso color, en la cual cada píxel exhibe un color resultante de la mezcla de proporciones variables de los canales de entrada seleccionados. Extraído de Humboldt State University, (2014).

2.3.3 Spectral Angle Mapper (SAM)

Es un método de clasificación supervisada (Figura 2.5) basada en la medición del ángulo (en radianes) entre el vector espectral de un píxel y el vector de un espectro de referencia en un espacio n-dimensional. Este enfoque es utilizado para la discriminación espectral de materiales geológicos, ya que se centra en la forma del espectro, ignorando su magnitud, siendo robusto frente a variaciones de iluminación o efecto albedo (Kruse *et al.*, 1993). SAM es un algoritmo que compara los espectros conocidos, los cuales pueden provenir de bibliotecas espectrales, archivos ASCII o regiones de interés (ROI), la imagen de entrada debe convertirse previamente a reflectancia aparente, de manera que las unidades de los datos coincidan con las de la biblioteca espectral de referencia (NV5 Geospatial Solutions, s. f.).

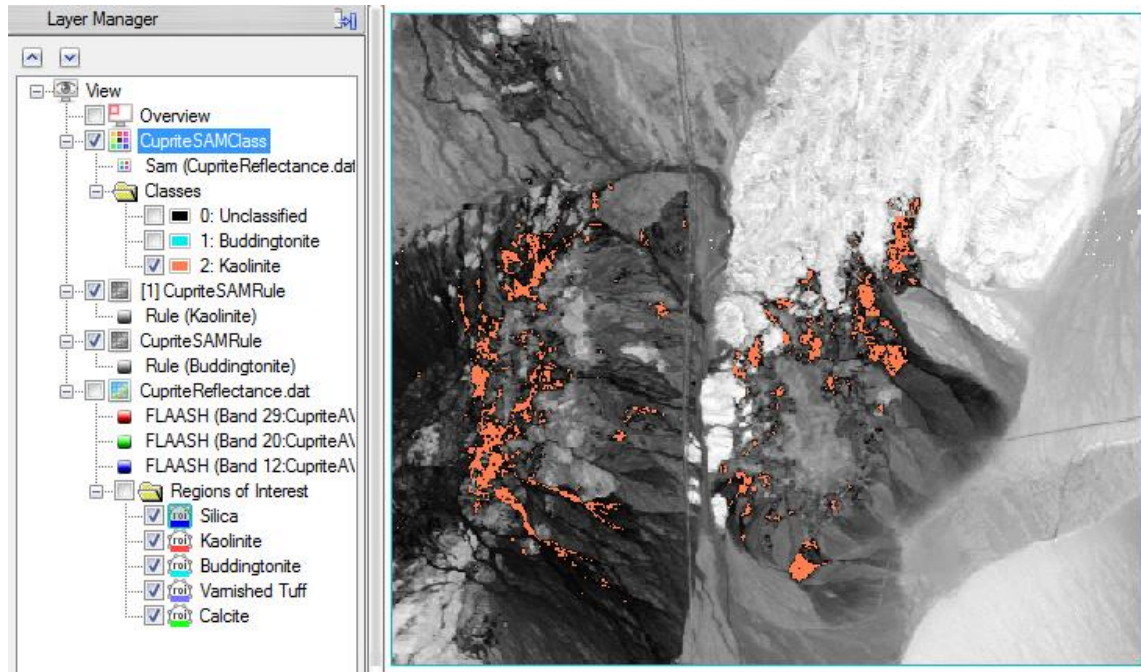


Figura 2.5. Distribución espacial de cuprita y caolinita mediante la aplicación de SAM, resaltado en color naranja. Extraído de NV5 Geospatial Solutions, Inc., (s. f.).

2.3.4 Teledetección aplicada a la exploración minera

La teledetección se ha consolidado como una herramienta estratégica para la exploración minera moderna, ya que permite una evaluación rápida, objetiva y repetible de la superficie terrestre con el fin de identificar recursos minerales y geológicos sin requerir presencia directa en terreno (Nature Research Intelligence, s. f.). Esta tecnología se basa en la adquisición y análisis de imágenes multispectrales generados por sensores remotos instalados en plataformas satelitales, posibilitando la detección de alteraciones hidrotermales y estructuras geológicas. La teledetección constituye una de las herramientas más valiosas en las etapas iniciales de prospección, ya que reduce costos, minimiza riesgos y orienta las campañas de exploración de campo (Sabins, 1999).

El uso de imágenes multispectrales obtenidas por sensores como ASTER, Landsat 8 y Sentinel-2, mediante técnicas como BR, BM y SAM, es esencial para la discriminación litológica, estructural y mineralógica a escala regional, permitiendo la delimitación preliminar de áreas con potencial económico (Carranza *et al.*, 2008). Estas metodologías constituyen una base sólida para generar mapas de alteración y guiar estudios de

prospección en terrenos con escasa cobertura vegetal o difícil acceso (EOS Data Analytics, 2023), como los del norte de Chile.

Durante los procesos de exploración, la identificación de zonas de alteración hidrotermal es crucial, ya que actúan como guías de mineralización en diversos yacimientos (Lowell y Guilbert, 1970). La teledetección multispectral permite reconocer firmas espectrales diagnósticas, las cuales a su vez, pueden ser comparadas con firmas teóricas de referencia (e.g. Kokaly *et al.*, 2017) de minerales indicadores como caolinita, clorita, óxidos de hierro, entre otros, los cuales presentan respuestas específicas en las regiones del NIR y SWIR del espectro electromagnético (Van der Meer *et al.*, 2012).

El reconocimiento de zonas de alteración hidrotermal, en combinación con el mapeo estructural y litológico, permite delimitar áreas prospectivas para la exploración e identificar zonas progradadas (granate, piroxeno, etc.) y retrogradadas (epidota, calcita, clorita, etc; Moradpour *et al.*, 2020). En este sentido, la teledetección proporciona una ventaja significativa al ofrecer cobertura entre escalas regionales y locales.

La integración de técnicas como BR y BM para la detección preliminar de anomalías espectrales, complementándose con el algoritmo SAM para la identificación de minerales específicos resultan efectivas en zonas áridas, donde la escasa cobertura vegetal favorece la detección de alteraciones superficiales (Carranza y Hale, 2002). Por su parte, SAM ofrece una clasificación más robusta, al comparar la similitud angular entre las firmas espectrales de referencia y los píxeles de la imagen, reduciendo la influencia del albedo y aumentando la confiabilidad en la identificación de minerales específicos (Kruse *et al.*, 1993; Pour y Hashim, 2014).

En Chile, en la actualidad la mayoría de los estudios se han centrado en sectores volcánicos de la zona central o en contextos geotérmicos (Aguilera *et al.*, 2016; Maza *et al.*, 2021), existiendo escasos antecedentes en distritos metalogénicos como el abordado en el presente estudio. En este sentido, la presente investigación busca contribuir al conocimiento regional mediante la integración de BR, BM y SAM, con datos de terreno y ASD TerraSpec, fortaleciendo la interpretación mineralógica y la caracterización de sistemas hidrotermales en el norte de Chile.

En base a la revisión bibliográfica se han destacado artículos emblemáticos con sus principales aportes como:

- **Carranza y Hale (2002):** Evaluaron la aplicación de técnicas multiespectrales BR y BM en la delimitación de zonas alteradas utilizando imágenes Landsat 7. Identificaron combinaciones espectrales efectivas para resaltar minerales de alteración como caolinita, illita y hematita, demostrando la utilidad de estas metodologías en la prospección.
- **Crósta *et al.* (2003):** Empleó imágenes ASTER para la detección de zonas de alteración argílica y argílica avanzada, asociadas a yacimientos epitermales en la Patagonia Argentina, utilizando análisis de componentes principales (PCA). Concluyeron que es eficaz para discriminar zonas con alunita y caolinita, validando los resultados con observaciones de campo y análisis espectrales.
- **Ninomiya (2003, 2012):** Definió y validó BR específicas derivadas de sensores ASTER para la identificación de minerales asociados a skarns, como epidota, calcita y granate. Sus estudios demostraron que estas combinaciones espectrales permiten discriminar con alta fiabilidad alteraciones de skarn y distinguirlas de litologías carbonatadas no alteradas.
- **Origel y Sánchez-Cárdenas (2010):** Implementaron técnicas ASTER y Landsat 7 para identificar alteraciones hidrotermales en el cinturón epitermal mexicano. Determinaron una alta correlación entre las anomalías espectrales detectadas asociadas a clorita y sericita, y los registros geológicos, validando la aplicabilidad de la teledetección multiespectral en ambientes tropicales.
- **Pour y Hashim (2014):** Aplicaron técnicas ASTER y ALI combinadas con algoritmos SAM y PCA para el mapeo de zonas de alteración hidrotermal en ambientes áridos del Medio Oriente. Concluyeron que la combinación de métodos supervisados (SAM) y no supervisados (PCA) mejora la diferenciación de zonas ricas en óxidos de hierro, caolinita y sericita, confirmando su efectividad para exploración mineral en áreas desérticas.
- **Sabins (1999):** Propuso la integración de sensores multiespectrales Landsat 5 y AVIRIS, junto con métodos de procesamiento digital de imágenes en exploración mineral. Estableció los fundamentos del análisis espectral aplicado a la teledetección geológica, demostrando que las variaciones en las firmas espectrales permiten inferir tipos de alteración y mineralogía superficial.

- **Van der Meer *et al.* (2012):** Desarrollaron una revisión exhaustiva de métodos espectrales aplicados a la detección de minerales, utilizando los sensores ASTER, Hyperion (EO-1) y Landsat 7; estableciendo criterios de diagnóstico espectral en las bandas SWIR y VNIR. Concluyeron que la combinación de índices espectrales y técnicas de desmezcla lineal mejora la identificación de minerales como alunita, illita y clorita.
- **Van der Werff y Van der Meer (2016):** Profundizaron en el uso de firmas espectrales hiperespectrales (HyMap e Hyperion) y su integración con datos multiespectrales (ASTER y Landsat 8), proponiendo modelos de interpretación espectral aplicables a diferentes contextos geológicos. Concluyeron que la fusión de datos de distinta resolución espectral y espacial optimiza la detección de minerales de alteración y la caracterización de ambientes hidrotermales.

CAPÍTULO 3: MARCO GEOLÓGICO

3.1 Geología regional

El sector de estudio está incluido en el área cubierta por la carta geológica de Inca de Oro escala 1:100.000 (Matthews *et al.*, 2006). La figura 3.1, muestra las principales unidades litológicas y estructuras geológicas descritas para el sector de estudio. El segmento de la carta muestra una serie de formaciones cretácicas y cuaternarias que corresponden en general a calizas, areniscas y rocas ígneas plutónicas pertenecientes al Grupo Chañarillo (Valanginiano-Aptiano), Formación Cerrillos (Albiano-Turoniano) y a rocas intrusivas del Cretácico Superior bajo (Matthews *et al.*, 2006).

El área de estudio se emplaza en el contexto tectónico de margen convergente activo del Jurásico Superior al Cretácico, caracterizado por una evolución tectono-magmática y sedimentaria que ha configurado la geología del norte de Chile (Charrier *et al.*, 2007). En este contexto, se reconocen unidades estratigráficas y cuerpos ígneos intrusivos que registran la dinámica de la cuenca y el arco magmático durante el Mesozoico.

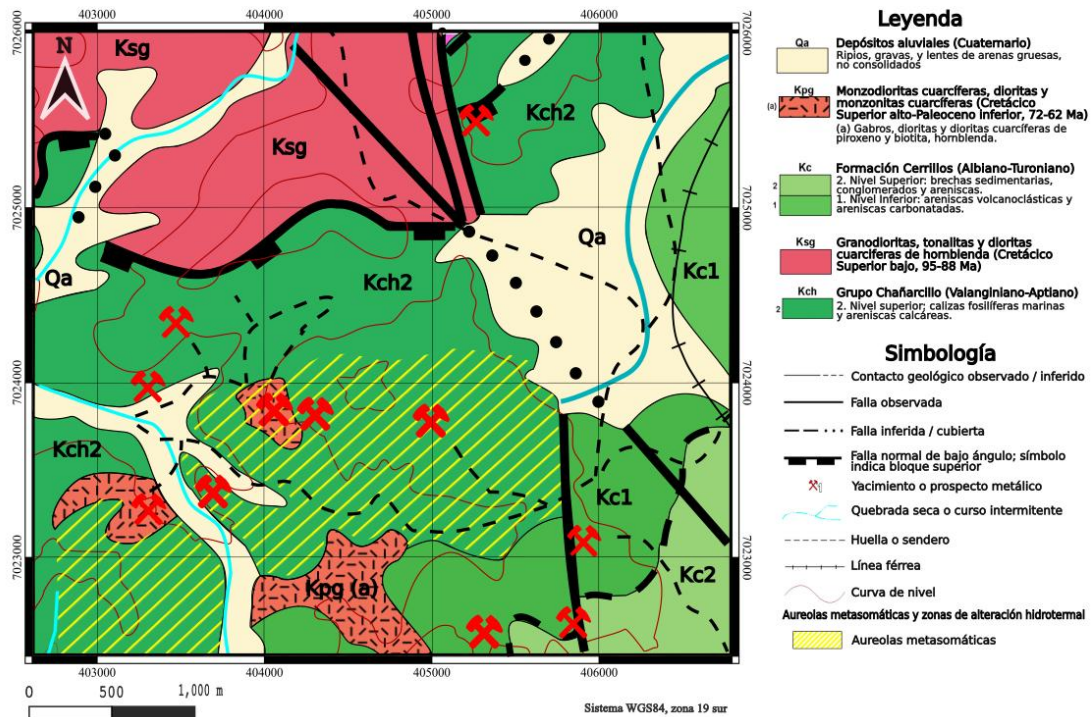


Figura 3.1. Carta geológica Inca de Oro, escala 1:100.000, recortada en el área de estudio.

Modificada de Matthews *et al.* (2006).

3.1.1 Grupo Chañarcillo (Kch2), Jurásico Superior - Cretácico Inferior

El Grupo Chañarcillo en el área de estudio se encuentra ubicado en el bloque centro-sur y suroeste del mapa, distribuido en varios cuerpos expuestos, está compuesto por una secuencia sedimentaria marina a continental, que incluye calizas y areniscas, principalmente mudstone y wakestones. Estas unidades se depositaron en una cuenca de trasarco asociada a un régimen tectónico extensional durante el Jurásico Superior al Cretácico Inferior. La presencia de fósiles marinos indica un ambiente de plataforma marina somera, mientras que las areniscas sugieren una transición hacia ambientes más continentales. Esto constituye una secuencia volcano-sedimentaria de ambiente de arco continental, que ha sido objeto de mineralización hidrotermal. Las edades se basan en correlaciones estratigráficas regionales y fósiles de invertebrados marinos hallados en las calizas (Matthews *et al.*, 2006).

3.1.2 Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), Cretácico Inferior

La Formación Cerrillos en el área de estudio se ubica en el bloque oriental y sureste, con mayor continuidad al este de los depósitos aluviales, sobreyace discordantemente al Grupo Chañarcillo y está constituida por una secuencia volcano-sedimentaria de edad Cretácico Inferior (Matthews *et al.*, 2006).

Miembro Kc1

Corresponde al miembro inferior de la Formación Cerrillos, la cual constituye la base de la formación y consiste predominantemente en conglomerados polimícticos y areniscas gruesas, con estructuras sedimentarias bien desarrolladas. Estas litologías reflejan procesos de sedimentación fluvial de alta energía, depositadas en un ambiente continental aluvial (Matthews *et al.*, 2006)

Miembro Kc2

Corresponde al miembro superior de la Formación Cerrillos, se caracteriza por una sucesión dominada por lavas andesíticas, intercaladas con tobas piroclásticas y brechas volcánicas. Las lavas poseen textura porfídica con fenocristales de plagioclasa y piroxeno

en una matriz microcristalina (Matthews *et al.*, 2006). Este miembro representa una fase predominantemente volcánica, asociada al desarrollo de un arco magmático activo, en un contexto de subducción durante el Mesozoico (Charrier *et al.*, 2007).

3.1.3 Granodioritas, tonalitas y dioritas cuarcíferas de hornblenda (Ksg), Cretácico Superior bajo

En el área de estudio se encuentra en el sector noroeste del mapa, al norte de las unidades del Grupo Chañarcillo (Kch2) y al oeste de los depósitos aluviales cuaternarios (Qa). Corresponde a un extenso cuerpo intrusivo, compuesto predominantemente por granodioritas, monzonitas y dioritas de color rosado a gris claro, textura fanerítica de grano medio a grueso. El cuerpo presenta contactos netos y localmente tectonizados con las unidades volcánicas y volcano-sedimentarias del Grupo Chañarcillo y Formación Cerrillos. En algunos sectores muestra aureolas de alteración hidrotermal, especialmente en sus márgenes. Esta unidad está asociada a zonas de mineralización de tipo pórfido Cu-Ag y vetas epitermales de sulfuros y óxidos de Fe-Cu-Au (Cornejo *et al.*, 1997).

3.1.4 Monzodioritas cuarcíferas, dioritas y monzonitas cuarcíferas (Kpg (a)), Cretácico Superior - Paleoceno

Corresponde a cuerpos menores de granodiorita de color rosado pálido a gris, se localiza en el sector centro-sur del área de estudio, en pequeños cuerpos intrusivos emplazados dentro del Grupo Chañarcillo (Kch2), posee una textura fanerítica de grano medio, este se presenta como pequeños stocks y plutones elongados. Presenta aureolas de alteración hidrotermal, asignada al Cretácico Superior - Paleoceno por su relación intrusiva con unidades cretácicas preexistentes y asociación tectono-magmática regional. Se le asocia a manifestaciones hidrotermales con mineralización de sulfuros y óxidos de Fe y Cu, destacando su potencial prospectivo a pequeña escala (Matthews *et al.*, 2006).

3.1.5 Depósitos aluviales (Qa), Cuaternario

En el Cuaternario, los procesos de erosión y sedimentación dieron lugar a la formación de depósitos aluviales. Estos depósitos, compuestos por gravas, arenas y limos, se encuentran en quebradas, terrazas y planicies aluviales. Su origen está asociado a la

meteorización y transporte de materiales desde las unidades geológicas preexistentes, en un ambiente árido (Matthews *et al.*, 2006).

3.2 Geología estructural

El distrito Chimberos está caracterizado por una compleja interacción entre unidades ígneas, sedimentarias y depósitos cuaternarios, desde el punto de vista estructural, se reconocen fallas de distinto tipo y jerarquía, controladas por una red de estructuras principalmente de rumbo NO-SE y N-S (Matthews *et al.*, 2006).

Las fallas normales de bajo ángulo predominan con rumbo preferente O-E, controlando el contacto entre las unidades Kch2 y Ksg. Esta falla muestra un desplazamiento significativo generando una disposición en bloques escalonados de las unidades. Este patrón estructural es consistente con los eventos extensionales que ocurrieron durante el Cretácico Superior-Paleógeno, donde se generó una diferenciación en bloques, separados por fallas normales y normales de bajo ángulo (Charrier *et al.*, 2007).

De igual forma, se reconocen sectores con aureolas metasomáticas asociadas a zonas de alteración hidrotermal, controladas estructuralmente por las fallas y estructuras preexistentes, las cuales favorecieron la circulación de fluidos mineralizantes. Estos ambientes hidrotermales se relacionan a las fases intrusivas tardías y su emplazamiento en las zonas de debilidad tectónica (Meinert *et al.*, 2005; Pirajno, 2009).

Por otra parte, la red de quebradas y drenajes intermitentes presenta una disposición que sigue parcialmente las trazas de las fallas, lo cual evidencia el control estructural sobre el modelo superficial actual.

CAPÍTULO 4: MARCO METODOLÓGICO

El presente capítulo describe detalladamente el enfoque metodológico empleado para alcanzar los objetivos propuestos en esta investigación, orientado a la identificación, caracterización y validación de zonas con presencia de alteraciones hidrotermales en el distrito minero Chimberos-Tres Puntas, mediante el uso de técnicas de preprocesamiento y procesamiento de imágenes multiespectrales de los sensores ASTER, Landsat 8 y Sentinel-2, además del análisis espectral y verificación en terreno.

El proceso metodológico se estructuró en cuatro etapas principales, cada una de ellas vinculada directamente con los objetivos específicos de este estudio. En primera instancia, se llevó a cabo la identificación de la mineralogía de alteración a partir del procesamiento de imágenes multiespectrales de los satélites ASTER, Landsat 8 y Sentinel-2. Posteriormente, se caracterizaron las propiedades espectrales de las unidades geológicas del área de estudio, estableciendo relaciones entre las firmas espectrales y las composiciones mineralógicas observadas. En una tercera etapa, se definieron las zonas con potencial de ocurrencia mineral mediante la integración de información espectral y geológica. Finalmente, se desarrolló la validación de los resultados a partir de espectroscopia de reflectancia (ASD TerraSpec) y descripción de muestras de mano, para corroborar la ocurrencia de los minerales y patrones identificados mediante los diversos satélites.

Estas etapas fueron desarrolladas mediante una secuencia lógica y sistemática que combina análisis digital, interpretación geológica y comprobación empírica, las cuales garantizaron un alto grado de confiabilidad en la interpretación de los resultados.

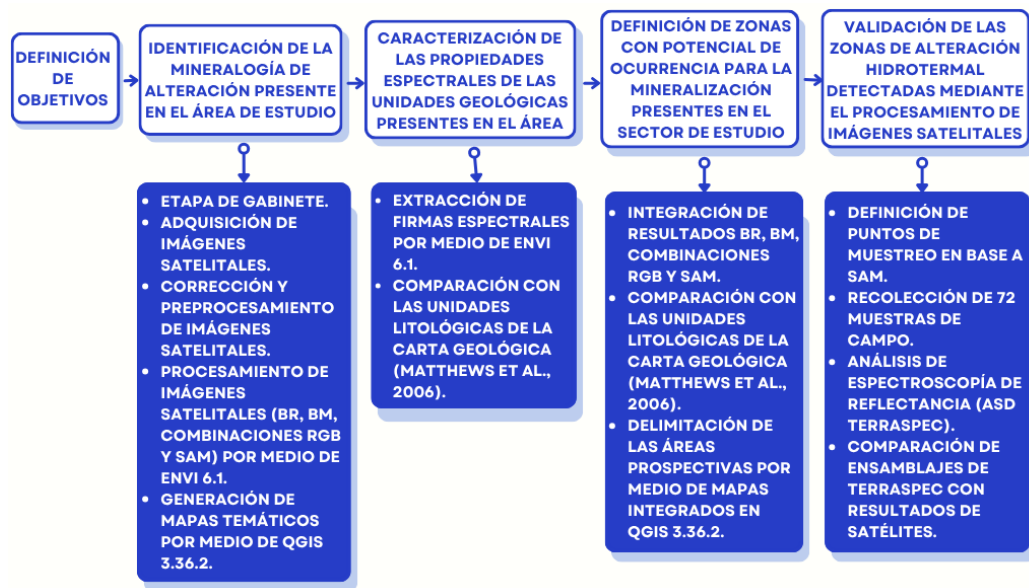


Figura 4.1. Diagrama de flujo general del marco metodológico en base a los pasos realizados para el cumplimiento de los objetivos específicos. Elaboración propia.

4.1 Identificación de la mineralogía de alteración

4.1.1 Etapa de gabinete

Con el objetivo de sustentar adecuadamente el enfoque metodológico adoptado, se realizó una revisión bibliográfica centrada en los fundamentos teóricos de la teledetección en la geología, con énfasis en su aplicación en los procesos de exploración minera y en la detección de alteraciones hidrotermales (BM, BR, combinaciones RGB y SAM). Esta revisión incluyó fuentes que abordan el uso de imágenes multispectrales, técnicas de procesamiento digital y criterios espectrales para la identificación de minerales indicadores de alteración. A partir de esta revisión, se estableció una base conceptual y metodológica robusta, que sirvió de soporte para la selección y aplicación de técnicas con un alto grado de confiabilidad y precisión.

Posteriormente, se definió el área de estudio mediante el *software* Google Earth Pro, el cual permitió una visualización preliminar del contexto geográfico y geológico del sector. Esta delimitación, consideró aspectos como la accesibilidad, los cambios litológicos, la presencia de estructuras geológicas, antecedentes de actividad minera y zonas de alteración hidrotermal.

4.1.2 Adquisición de imágenes satelitales

Para esta investigación se utilizaron imágenes multispectrales de acceso libre (Tabla 4.1), seleccionadas en función de su adecuada cobertura espacial y disponibilidad temporal. Se priorizó la adquisición de escenas con mínima cobertura nubosa, obtenidas preferentemente durante el periodo estival para optimizar la detección de las firmas espectrales. Las imágenes fueron seleccionadas a partir de plataformas oficiales de distribución de datos satelitales, garantizando su calidad radiométrica y compatibilidad con procesos posteriores de procesamiento digital.

Tabla 4.1. Detalles de las imágenes multispectrales utilizadas en el estudio. Elaboración propia.

Sensor / Satélite	ID de escena	Fecha de adquisición	Fuente de descarga
ASTER	AST_L1T_003121220031456 36_20150502123342_27155	12 de diciembre de 2003	NASA EarthData Search
Landsat 8	LC08_L1TP_001079_202501 14_20250127_02_T1	14 de enero de 2025	USGS EarthExplorer
Sentinel-2A	S2C_MSIL2A_20250328T14 3801_N0511_R096_T19JDL _20250328T211417.SAFE	28 de marzo de 2025	Copernicus Open Access Hub

La imagen obtenida del sensor ASTER posee 14 bandas espectrales, al tratarse de un producto Level 1T, esta se encuentra ortorrectificada mediante un modelo digital de elevación (DEM) y corregida geoméricamente, lo que asegura que la ubicación real de los píxeles coincida con la posición real en la superficie. En cuanto a la imagen obtenida desde el sensor Landsat 8, posee un total de 11 bandas espectrales, esta cuenta con una corrección geométrica y radiométrica estándar, lo que garantiza una precisión espacial para el análisis. Respecto a la imagen obtenida del sensor Sentinel-2, posee 13 bandas espectrales, y corresponde al producto de Level-1C, lo que implica que ha sido corregida geoméricamente y ortorrectificada, para así obtener resultados más precisos en cuanto a la ubicación real de los píxeles.

4.1.3 Corrección y preprocesamiento de imágenes satelitales

Para el satélite ASTER, el preprocesamiento se realizó mediante una secuencia de procedimientos (Figura 4.2) orientados a optimizar la calidad espectral y la precisión geométrica de la calidad de la imagen. Inicialmente, en el *software* ENVI 6.1, se efectuó la creación del *Layer Stack*, combinando las bandas multiespectrales en un solo archivo multibanda. Posteriormente, se aplicaron correcciones radiométricas para convertir los valores digitales (DN) a unidades físicamente significativas, garantizando la calidad y comparabilidad de los datos para realizar los minerales y alteraciones presentes en el área. Para ello, se utilizó la herramienta *Radiometric Calibration* para convertir los DN a radiancia, y luego se aplicó la función *IAR Reflectance Correction* para convertir la radiancia en reflectancia aparente, reduciendo los efectos atmosféricos. Finalmente, se ejecutó el recorte del área de estudio sobre la escena ya corregida.

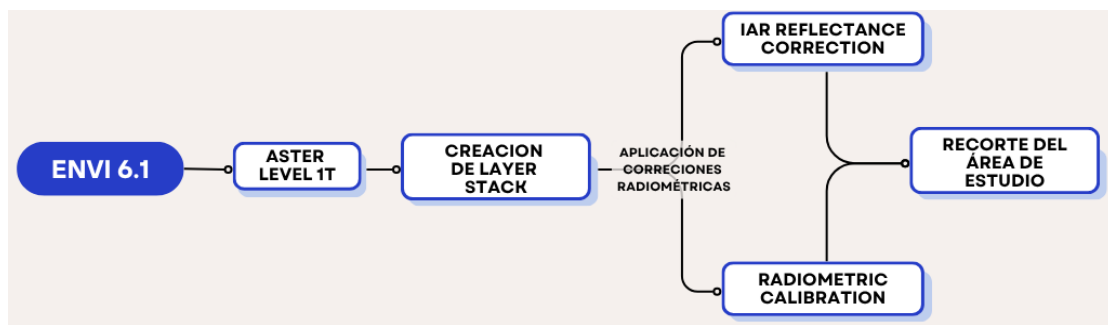


Figura 4.2. Diagrama de flujo del preprocesamiento aplicado a la imagen satelital de ASTER. Elaboración propia.

El preprocesamiento de la imagen procedente del satélite Landsat 8 se realizó en el *software* ENVI 6.1, con una serie de pasos que se orientan a optimizar la calidad espectral del producto (Figura 4.3). Luego, se procedió a la creación del *Layer Stack*, que consistió en la fusión de las bandas multiespectrales individuales en un único archivo multibanda. A continuación, se aplicaron correcciones radiométricas, comenzando por la *Radiometric Calibration*, que convierte los DN a unidades físicamente significativas, seguida de la corrección *IAR Reflectance Correction*, que transforma la radiancia en reflectancia aparente, compensando los efectos atmosféricos y estandarizando la respuesta espectral del sensor. Finalmente se realizó el recorte del área de estudio.

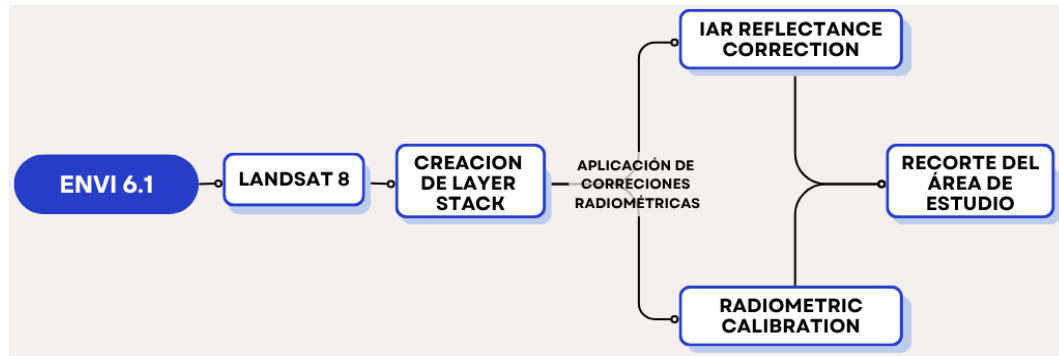


Figura 4.3. Diagrama de flujo del preprocesamiento aplicado a la imagen satelital de Landsat 8. Elaboración propia.

Para la imagen proveniente del sensor Sentinel-2A, el preprocesamiento (Figura 4.4) se realizó mediante el *software* SNAP 11, donde en primera instancia se efectuó el ajuste de la resolución espacial. A continuación la imagen se exporta al *software* ENVI 6.1, para realizar la creación del *Layer Stack*, combinando las bandas seleccionadas en un archivo multibanda, la cual permite un uso más eficiente en los posteriores procesamientos espectrales. Finalmente, se realizó el recorte del área de estudio.

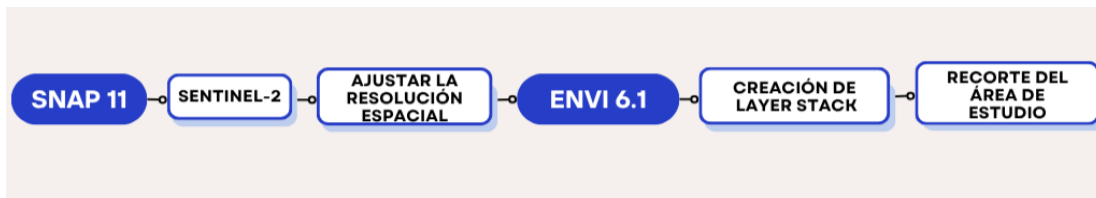


Figura 4.4. Diagrama de flujo correspondiente al preprocesamiento de la imagen satelital de Sentinel-2. Elaboración propia.

4.1.4 Procesamiento de imágenes satelitales ASTER

Luego del preprocesamiento para optimizar la calidad de la escena, se aplicaron diferentes técnicas espectrales para extraer información geológica y mineralógica, en el caso del satélite ASTER se utilizaron las siguientes herramientas del *software* ENVI 6.1.

a) *Band ratios (BR)* y *band math (BM)*

Los BR y BM empleados para detectar diversas alteraciones y minerales de interés en la imagen ASTER, se representan en la Tabla 4.2, indicando la combinación con sus respectivas bandas, propuestas por diversos autores.

Tabla 4.2. BR y BM aplicados al sensor ASTER. Elaboración propia.

Mineral/Alteración	BR-BM	Referencia
Zonas con alteración	$((B2/B3) \times (B4/B3))$	Salehi <i>et al.</i> (2019)
Silicato ferroso	(B5/B4)	Salehi <i>et al.</i> (2019)
Jarosita	(B4/B7)	El Janati (2019)
Óxido ferroso	(B5/B3)	Van der Meer <i>et al.</i> (2014)
Caolinita	(B7/B5)	Van der Meer <i>et al.</i> (2012)
Alteración portadora de iones OH	(B4/B5)	Van der Meer <i>et al.</i> (2012)
<i>Gossan</i>	(B4/B2)	Van der Meer <i>et al.</i> (2012)
Sílice	(B11/B10)	Van der Meer <i>et al.</i> (2012)
Sílice	(B11/B12)	Van der Meer <i>et al.</i> (2012)
Sílice	(B13/B10)	Van der Meer <i>et al.</i> (2012)
Carbonato	(B12/B14)	Van der Meer <i>et al.</i> (2012)
Óxidos	(B4/B1)	Origel y Sánchez-Cárdenas (2010)
Hematita	(B3/B1)	Origel y Sánchez-Cárdenas (2010)
Silicatos ferrosos	(B4/B3)	Origel y Sánchez-Cárdenas (2010)
Óxido férrico (Fe ³⁺)	(B2/B1)	Origel y Sánchez-Cárdenas (2010)
Alteración argílica avanzada	$((B4+B6)/B5)$	Origel y Sánchez-Cárdenas (2010)
Alteración filica	$((B5+B7)/B6)$	Origel y Sánchez-Cárdenas (2010)
Alteración propilítica	$((B7+B9)/B8)$	Rowan y Mars (2003)
Alteración argílica	(B5/B6)	Crósta <i>et al.</i> (2003)
Alteración filica	(B7/B6)	Crósta <i>et al.</i> (2003)
Alteración propilítica	(B9/B8)	Crósta <i>et al.</i> (2003)
Arcillas	$((B5 \times B7)/(B6 \times B6))$	Bierwith (2002)
Anfibolitas	(B6/B8)	Bierwith (2002)
Sílice	$((B11 \times B11)/B10/B12)$	Bierwith (2002)
Carbonato	(B13/B14)	Ninomiya (2002)

Mineral/Alteración	BR-BM	Referencia
Granate/Piroxeno	(B12/B13)	Ninomiya (2002)

b) Combinaciones de imágenes RGB

En este estudio, se generaron combinaciones RGB, mediante la aplicación de BR y BM, con el propósito de resaltar diferencias espectrales vinculadas a la presencia de diversos minerales y alteraciones hidrotermales de interés presentes en el área de estudio, generando una imagen para realizar posteriormente una interpretación visual.

c) Spectral Angle Mapper (SAM)

En este caso para el procesamiento de la imagen ASTER, su cobertura espectral en el rango SWIR, lo hace adecuado para emplear espectros de referencias de minerales indicativos de alteración hidrotermal, permitiendo identificar zonas con comportamientos espectrales similares. Para este estudio, se identificaron 29 firmas espectrales minerales, de los cuales 17 fueron reconocidos a partir de Beckman Mineral Spectral Library (minerals_beckman_3375.sli), entre los cuales incluyen: actinolita, albita, alunita, caolinita, clorita, dickita, diáspora, goetita, hematita, illita, jarosita, limonita, magnetita, pirofilita, sericita, sílice y turmalina; los otros 12 minerales fueron identificados por medio de la Johns Hopkins University Spectral Library (mineral_jhu_nicolet_2278.sli), reconocida por su espectroscopia de laboratorio en el rango VNIR, SWIR y TIR. Esta biblioteca permitió incorporar firmas que no estaban representadas adecuadamente en la librería Beckman, tales como: andradita, biotita, calcita, cuarzo, diópsido, epidota, grosularia, hedenbergita, hornblenda, tremolita, vesuvianita y wollastonita.

d) Generación de mapas temáticos

Como parte del análisis espectral e identificación de zonas de alteración y minerales, se llevó a cabo la generación de mapas a partir de los productos derivados de BR, BM, RGB y SAM, con el fin de visualizar las variaciones espectrales asociadas a la presencia de minerales indicadores de zonas de interés. Para ello, se procedió a exportar las imágenes al *software* QGIS 3.36.2, donde para su correcta interpretación, cada mapa fue caracterizado con los elementos técnicos esenciales, incluyendo coordenadas geográficas

(sistema UTM, WGS84 zona 19S), grillas, escala, leyenda y norte. La simbología fue estandarizada para mantener coherencia visual entre los diferentes productos, lo que facilitó su comparación e interpretación de los resultados. Estos mapas constituyeron una herramienta clave para la identificación de zonas con potencial geológico, al permitir una integración de la información espectral con un contexto geológico-estructural del área.

4.1.5 Procesamiento de imágenes satelitales Landsat 8

Para el procesamiento de la imagen de Landsat 8, se aplicaron diversas técnicas espectrales con el fin de extraer información relevante para la detección de alteraciones hidrotermales y mineralógicas, para ello se utilizaron las siguientes herramientas del *software* ENVI 6.1, una vez finalizado el preprocesamiento del ítem anterior:

a) *Band ratios (BR) y band math (BM)*

Los BR y BM empleados para detectar diversas alteraciones y minerales de interés en la imagen Landsat 8, se resumen en la Tabla 4.3, indicando la combinación de sus respectivas bandas, propuestas por diversos autores.

Tabla 4.3 BR y BM aplicados al sensor Landsat 8. Elaboración propia.

Mineral/Alteración	BR-BM	Referencia
Óxidos	(B4/B2)	Van der Werff y Van der Meer (2016)
Alteración portadora de iones OH	(B6/B7)	Van der Werff y Van der Meer (2016)
Óxido férrico	(B6/B5)	Van der Werff y Van der Meer (2016)
Óxido de hierro ferroso	(B4/B6)	Van der Werff y Van der Meer (2016)
Silicato ferroso	(B7/B6)	Van der Werff y Van der Meer (2016)
Óxidos de hierro	(B5/B1)	Sultán <i>et al.</i> (1986)
Minerales portadores de hidroxilo	(B5/B7)	Sultán <i>et al.</i> (1986)
Aluminosilicatos	((B5/B4)x(B3/B3))	Sultán <i>et al.</i> (1986)

b) Combinaciones de imágenes RGB

En este estudio, se generaron combinaciones RGB mediante la aplicación de BR y BM, con el propósito de enfatizar características espectrales vinculadas a la presencia de diversas alteraciones y minerales presentes en el área de estudio, lo cual aportó una aproximación visual para la interpretación geológica del sector.

c) Generación de mapas temáticos

Al igual que en el caso de la imagen ASTER, se generaron mapas temáticos a partir de los productos derivados de BR, BM y combinaciones RGB de la imagen Landsat 8, con el objetivo de visualizar las variaciones espectrales asociadas a minerales y zonas con potencial mineralógico. Las imágenes procesadas fueron exportadas a QGIS 3.36.2, donde se incorporaron los elementos cartográficos esenciales, además se aplicó una simbología estandarizada para mantener una coherencia visual entre los distintos productos, facilitando la comparación e interpretación integrada de los resultados.

4.1.6 Procesamiento de imágenes satelitales Sentinel-2

Para el análisis de las imágenes Sentinel-2 se implementaron diversas técnicas espectrales orientadas a la detección de alteraciones hidrotermales y unidades mineralógicas superficiales. Estas operaciones se efectuaron en el *software* ENVI 6.1, luego de completar el preprocesamiento descrito en la sección anterior.

a) Band ratios (BR) y band math (BM)

Las combinaciones BR y BM seleccionadas se resumen en la Tabla 4.4, estas se basaron en investigaciones previas, estas permitieron la detección de diversas alteraciones hidrotermales y asociaciones mineralógicas de interés.

Tabla 4.4. BR y BM aplicados al sensor Sentinel-2. Elaboración propia.

Mineral/Alteración	BR-BM	Referencia
Óxido férrico	(B11/B8)	Van der Werff y Van der Meer (2016)
Óxidos de hierro ferroso	(B4/B11)	Van der Werff y Van der Meer (2016)

Mineral/Alteración	BR-BM	Referencia
Alteración portadora de iones OH	(B11/B12)	Van der Werff y Van der Meer (2016)
Silicato ferroso	(B12/B11)	Van der Werff y Van der Meer (2016)
Óxidos de hierro	(B4/B2)	Van der Werff y Van der Meer (2016)
Hierro férrico	(B4/B3)	Van der Werff y Van der Meer (2016)
Hierro ferroso	((B12/B8)+(B3/B4))	Van der Werff y Van der Meer (2016)
Vegetación/Caolinita	(B8/B4)	Van der Werff y Van der Meer (2016)

b) Combinaciones de imágenes RGB

En este estudio, se generaron combinaciones RGB mediante la aplicación de BR y BM, con el propósito de enfatizar características espectrales vinculadas a la presencia de diversas alteraciones y minerales presentes en el área de estudio, aportando una aproximación visual para la interpretación geológica del sector. Estas combinaciones se definieron con base en trabajos previos de detección mineralógica en sistemas hidrotermales.

c) Generación de mapas temáticos

Al igual que en el caso de la imagen ASTER y Landsat 8, se generaron mapas temáticos a partir de los productos derivados de BR, BM y combinaciones RGB, con el objetivo de visualizar las variaciones espectrales asociadas a minerales y zonas con potencial mineralógico. Las imágenes procesadas fueron exportadas a QGIS 3.36.2, donde se incorporaron los elementos cartográficos esenciales, además se aplicó una simbología estandarizada para mantener una coherencia visual entre los distintos productos, facilitando la comparación e interpretación integrada de los resultados.

4.2 Caracterización de las propiedades espectrales de las unidades geológicas

Para caracterizar espectralmente las unidades geológicas presentes en el área de estudio, se utilizaron las firmas espectrales extraídas desde la imagen procesada del sensor ASTER, donde se delimitaron las áreas según las alteraciones detectadas mediante los BR

y BM en conjunto a la carta geológica de Matthews *et al.* (2006) para identificar las unidades geológicas afectadas, en la cual se identificaron las unidades intrusivas Ksg y Kpg(a), además de las unidades volcano-sedimentarias Kc1, Kc2 y Kch2. Las firmas se obtuvieron mediante la herramienta *Spectral Profile* en el *software* ENVI 6.1, donde se generaron curvas de reflectancia promedio por unidad, a partir de las bandas VNIR y SWIR. Esto permitió asociar la respuesta espectral con diversas composiciones mineralógicas, lo cual facilitó la interpretación geológica posterior.

4.3 Definición de zonas con potencial de ocurrencia para la mineralización

Para definir las zonas con posible ocurrencia mineral, se integraron los resultados derivados del análisis espectral con la información geológica-estructural de la carta geológica de Matthews *et al.* (2006). Para ello se utilizaron los diversos productos generados (BR, BM, combinaciones RGB y SAM), desde los satélites ASTER, Landsat 8 y Sentinel-2. Posteriormente, estos fueron integrados en el *software* QGIS 3.36.2, donde se compararon las diversas alteraciones y minerales identificados con las unidades geológicas y estructuras presentes. La delimitación de áreas prospectivas se realizó a partir de patrones coincidentes, validando su asociación con dominios estructurales favorables y con antecedentes geológicos del distrito minero Chimberos-Tres Puntas.

4.4 Validación de las zonas de alteración hidrotermal detectadas mediante el procesamiento de imágenes satelitales

Para validar las zonas de alteración hidrotermal detectadas mediante el procesamiento de imágenes satelitales, se integraron análisis espectrales con información geológica y datos de terreno. En una primera etapa, se realizó una comparación espacial entre los mapas generados a partir de las técnicas BR, BM, RGB y SAM con la carta geológica de Matthews *et al.* (2006), evaluando la coincidencia entre las zonas espectralmente alteradas y las unidades litológicas o estructuras geológicas favorables para la circulación de fluidos mineralizantes.

Luego, se efectuó la recolección de 72 muestras de campo cuya distribución espacial fue planificada en base a los resultados de la clasificación espectral SAM (Tabla 4.5) extraída del procesamiento de la imagen ASTER utilizando firmas espectrales de

referencia de la Johns Hopkins University Spectral Library y Mineral Beckman Spectral Library. Se priorizaron las zonas con alta probabilidad de contener minerales indicadores de ambiente skarn, tales como: alunita, andradita, dickita, diópsido, dolomita, epidota, grosularia, hedenbergita, illita, pirofilita, tremolita, vesuvianita y wollastonita. Sin embargo, fue importante considerar que cada muestra estaba acompañada por otras asociaciones minerales, las cuales se encontraban solapadas en el mismo punto de interés.

Posterior a la recolección, las muestras fueron analizadas de manera macroscópica visual, describiendo y fotografiándose mediante una lupa binocular con cámara integrada, disponible en el Laboratorio de Petrotectónica de la Universidad de Atacama.

Finalmente, las muestras fueron evaluadas mediante espectroscopía de reflectancia utilizando un equipo ASD TerraSpec, instrumento que midió la firma espectral en el rango VNIR-SWIR (350-2500 nm). Esta técnica identificó minerales a partir de sus reflectancias y absorciones características en longitudes de onda específicas, validando directamente las coincidencias entre los datos de terreno y los resultados del procesamiento satelital de ASTER.

A partir de los resultados espectrales, se organizaron ensamblajes mineralógicos, en base a los minerales detectados de manera conjunta en cada muestra. Esta clasificación permitió sistematizar la información y facilitó la diferenciación de asociaciones minerales. Esta asociación fue clave para establecer relaciones comparativas entre los datos espectrales de laboratorio y las unidades de alteración identificadas.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS

Luego de realizar el preprocesamiento y procesamiento de las imágenes, en este capítulo se abordó los resultados obtenidos a partir de los datos proporcionados por los satélites ASTER, Landsat 8 y Sentinel-2. Los resultados fueron estructurados de manera diferenciada según cada satélite, con el fin de destacar sus respectivas capacidades espectrales, resoluciones y niveles de respuesta frente a diversas alteraciones y asociaciones minerales identificadas en el área de estudio.

5.1 Identificación de la mineralogía de alteración del área de estudio

En esta sección, la información fue estructurada de manera que facilitara su interpretación y análisis. Para ello, los productos satelitales se organizaron conforme al sensor utilizado, abordando específicamente los resultados asociados a la identificación de la mineralogía de alteración presente en el área de estudio.

5.1.1 Resultados derivados de imágenes satelitales de ASTER

El análisis de la imagen proveniente de ASTER permitió examinar la respuesta espectral en el rango VNIR, SWIR y TIR. Debido a su resolución espectral en estos rangos, se utilizaron diversas combinaciones de bandas con el objetivo de identificar variaciones minerales y fases alteradas asociadas al skarn.

a) *Band ratios y band math*

El procesamiento espectral mediante la aplicación de diversos BR en la imagen ASTER orientados a la detección de sílice (Figura 5.1), permitió identificar que los mayores índices de reflectancia se concentraron hacia el sector NE, que coincidieron con afloramientos del Grupo Chañarcillo (Kch2) y con sectores de la Formación Cerrillos (Kc1). Estos valores de reflectancia presentaron una disminución gradual hacia el sector SO donde se encontraba el Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que en los sectores SE y NO presentaron valores más bajos, correspondientes al cuerpo intrusivo asociados a la unidad Ksg y la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2).

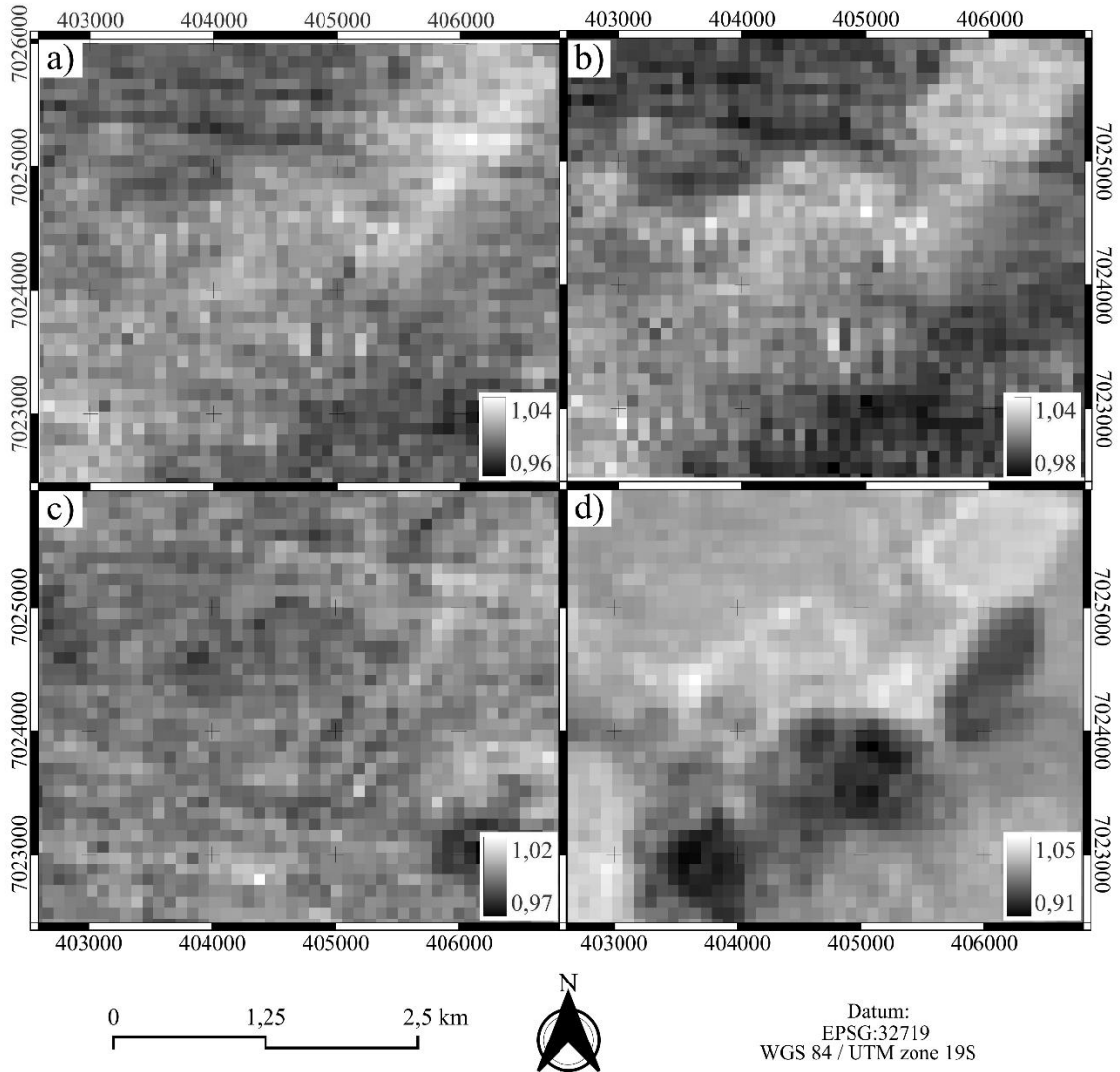


Figura 5.1. Mapas en escala de grises generados a partir de BR. a) BR que se utilizó para resaltar minerales ricos en sílice. b) BR que se utilizó para resaltar minerales ricos en sílice. c) BR que se utilizó para resaltar minerales ricos en sílice. d) BR que se utilizó para resaltar minerales ricos en sílice. Elaboración propia.

Para la detección de la alteración filica, se emplearon diversas combinaciones de BR y BM (Figura 5.2), debido a que no existía una banda específica para reconocerla directamente. Los resultados mostraron que las zonas de mayor reflectancia se concentraron principalmente hacia el sector NO y parte del sector E del área de estudio, asociadas principalmente a la unidad intrusiva Ksg y Formación Cerrillos (Kc1). En el sector SE se visualizó una zona de menor reflectancia asociada a la Formación Cerrillos

(Kc1 y Kc2), mientras que en los sectores centrales, SO y NE se observó una distribución más homogénea de los valores de reflectancia, sobre el Grupo Chañarcillo (Kch2).

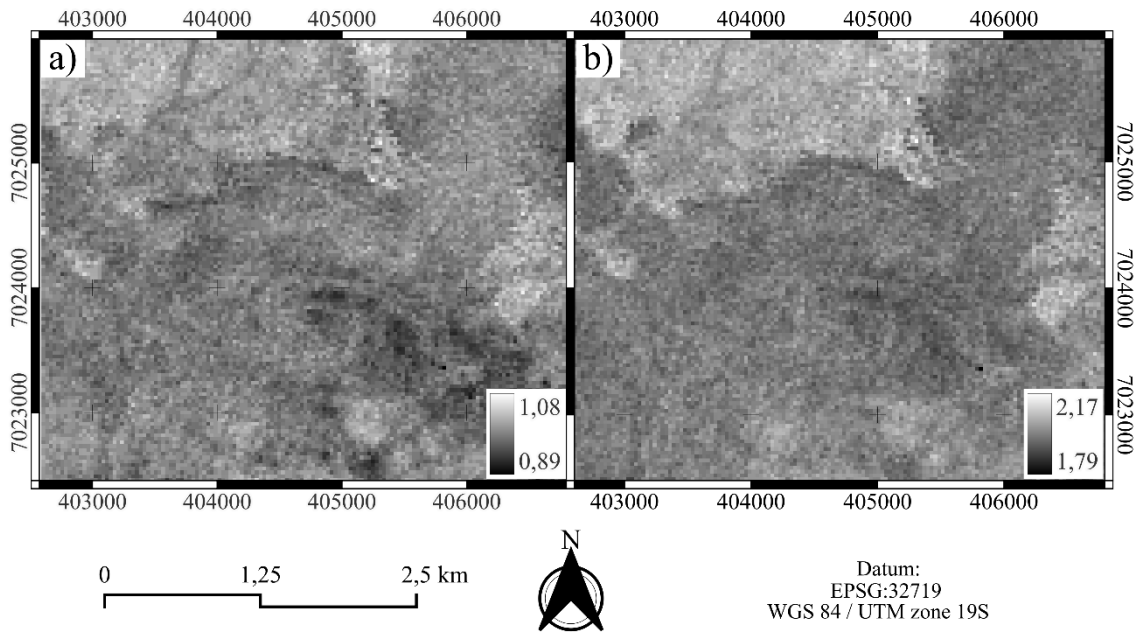


Figura 5.2. Mapas en escala de grises generados a partir de BR y BM. a) BR que se utilizó para resaltar la alteración filica. b) BM que se utilizó para resaltar alteración filica. Elaboración propia.

Para identificar la alteración propilítica presente en la zona de estudio, se utilizaron diversas combinaciones de BR y BM (Figura 5.3). Los resultados mostraron que las zonas de mayor reflectancia se concentraron principalmente en el sector NE y parte del sector central asociándose al Grupo Chañarcillo (Kch2) y a la Formación Cerrillos (Kc1). En los sectores SO y S presentaron valores intermedios a bajos, sobre el intrusivo Kpg(a) y Grupo Chañarcillo (Kch2).

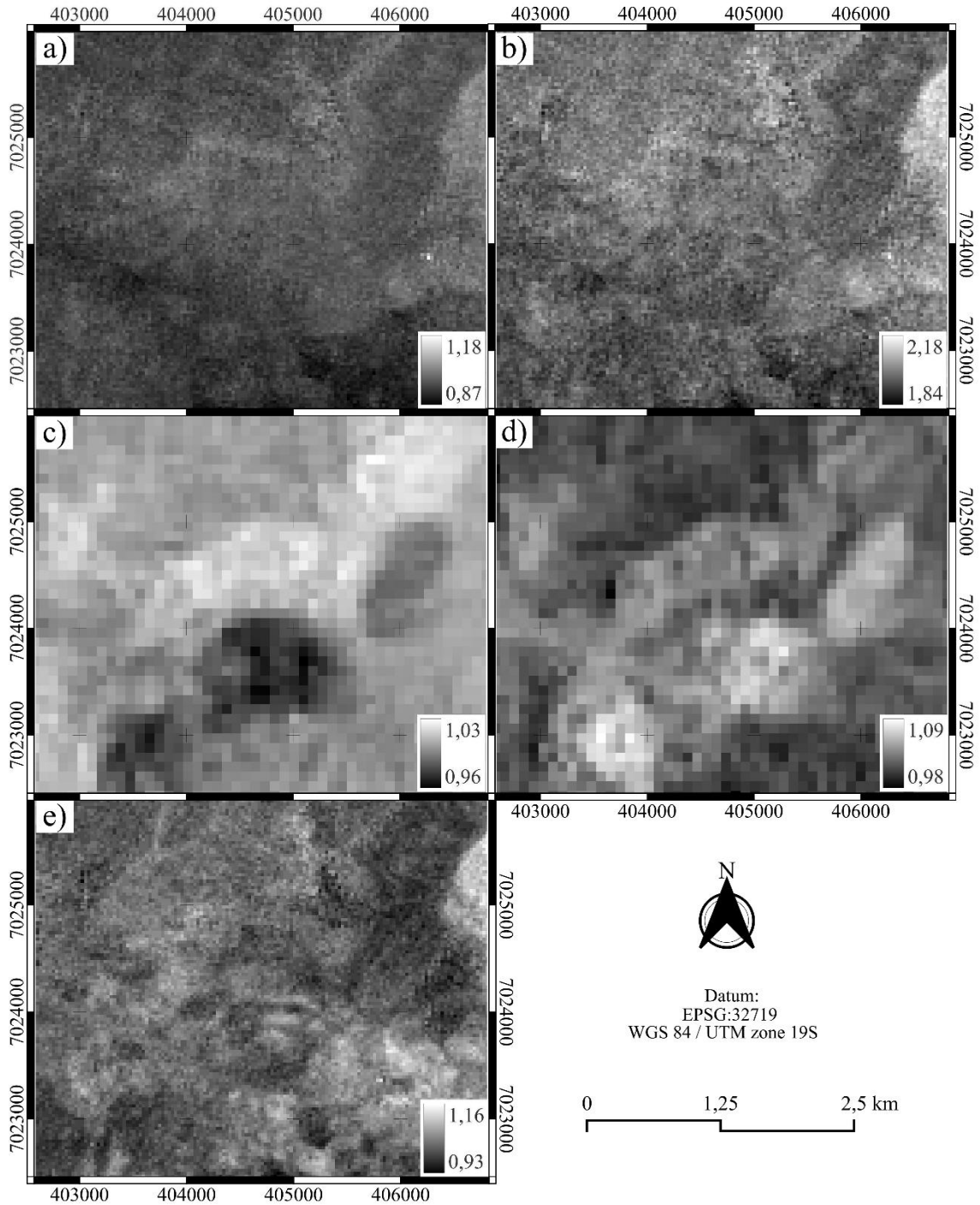


Figura 5.3. Mapas en escala de grises generados a partir de BR y BM. a) BR que se utilizó para resaltar la alteración propilítica. b) BM que se utilizó para resaltar la alteración propilítica. c) BR que se utilizó para identificar carbonatos. d) BR que se utilizó para identificar carbonatos. e) BR que se utilizó para identificar anfíboles. Elaboración propia.

Para determinar zonas con alteración argílica avanzada se aplicaron BR y BM (Figura 5.4), para identificar aquellas zonas que fueran indicativas mediante la alta reflectancia. Los resultados mostraron que las zonas de mayor reflectancia se concentraron principalmente en el sector NO y parte del sector SE, asociadas principalmente a la unidad intrusiva Ksg y la Formación Cerrillos (Kc1). En el sector central, SO y NE se visualizó una zona de menor reflectancia o más homogénea en algunos casos asociada al Grupo Chañarcillo (Kch2), intrusivo Kpg(a) y parte de la Formación Cerrillos (Kc2).

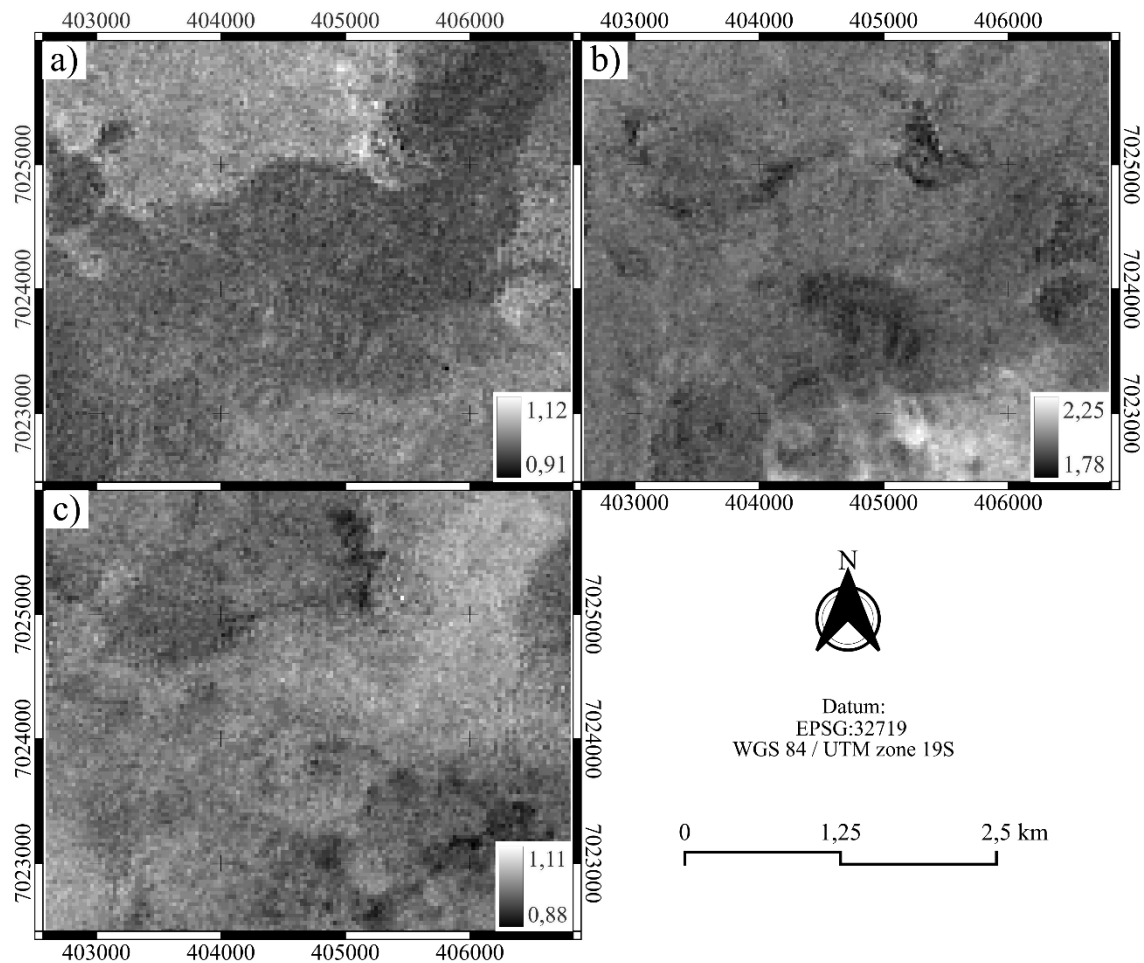


Figura 5.4. Mapas en escala de grises generados a partir de BR y BM. a) BR que se utilizó para resaltar la alteración argílica avanzada. b) BM que se utilizó para resaltar la alteración argílica avanzada. c) BR que se utilizó para resaltar la presencia de caolinita. Elaboración propia.

Para la identificación general de minerales del grupo de las arcillas, se aplicó una BM (Figura 5.5), destinada a resaltar firmas espectrales características de estos minerales. El resultado obtenido mostró que la zona de mayor reflectancia se concentró principalmente

hacia el sector NO y parcialmente en parte del sector E, asociado al intrusivo Ksg y la Formación Cerrillos (Kc1). En el sector SO, zona central y NE, se visualizó una distribución homogénea de la reflectancia, esta se observó sobre el Grupo Chañarcillo (Kch2), intrusivo Kpg(a) y parte de la Formación Cerrillos (Kc2).

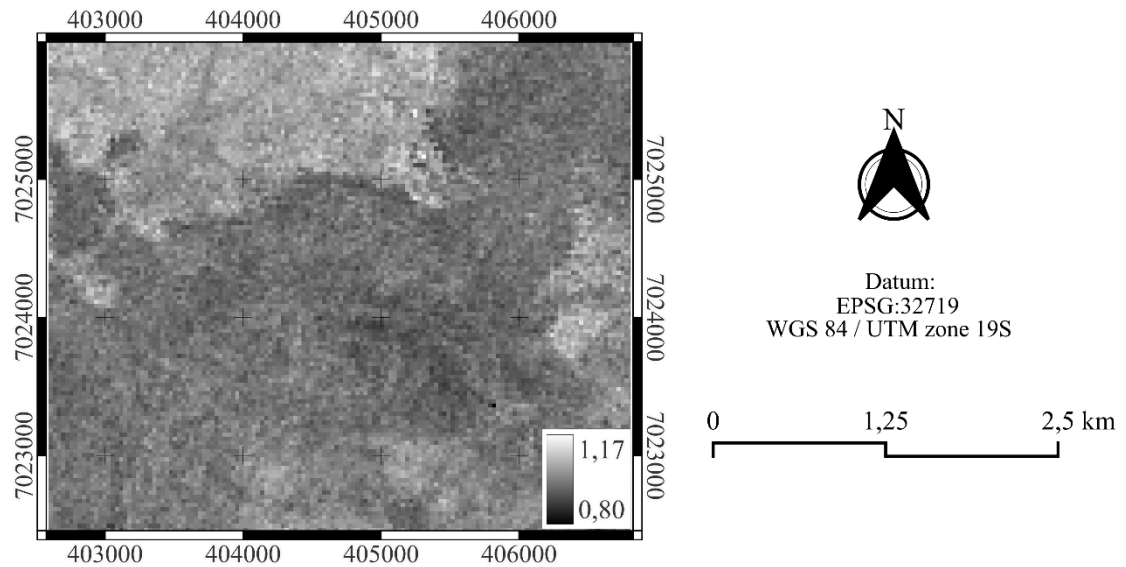


Figura 5.5. Mapa en escala de grises generado a partir de la BM que se utilizó para resaltar la presencia de arcillas. Elaboración propia.

Para el análisis espectral orientado a la identificación de zonas con presencia de óxidos de hierro, se emplearon diversos BR (Figura 5.6). Los resultados evidenciaron zonas con mayor reflectancia hacia el SE y N del área, asociados principalmente a la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2) y al intrusivo Ksg respectivamente, mientras que en el sector central, NE y SO, se visualizó una distribución homogénea de la reflectancia, esta se observó sobre el Grupo Chañarcillo (Kch2), intrusivo Kpg(a) y parte de la Formación Cerrillos (Kc2).

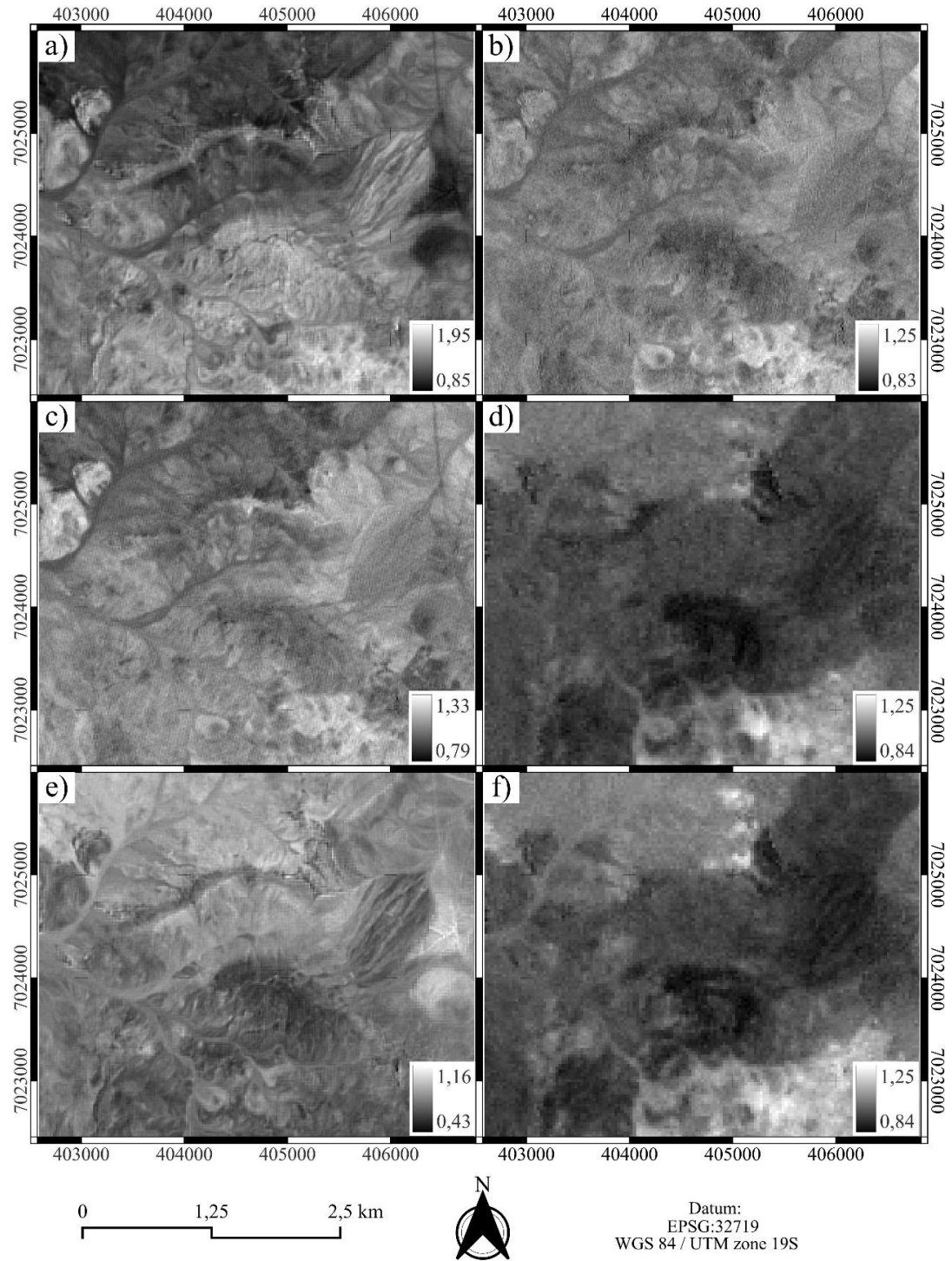


Figura 5.6. Mapas en escala de grises generados a partir de operaciones BR. a) BR que se utilizó para resaltar óxidos. b) BR que se utilizó para resaltar concentraciones de óxido ferroso. c) BR que se utilizó para resaltar zonas con hematita. d) BR que se utilizó para identificar minerales portadores de iones OH. e) BR que se utilizó para identificar óxido férrico. f) BR que se utilizó para identificar zonas con presencia de jarosita. Elaboración propia.

Para identificar zonas y rocas ricas en silicatos ferrosos se utilizaron combinaciones de BR (Figura 5.7). Los resultados evidenciaron zonas con mayor reflectancia en la zona SO a NE, asociados principalmente al Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que en el sector NO y SE, se visualizó una distribución homogénea de menor reflectancia, sobre el intrusivo Ksg y la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2).

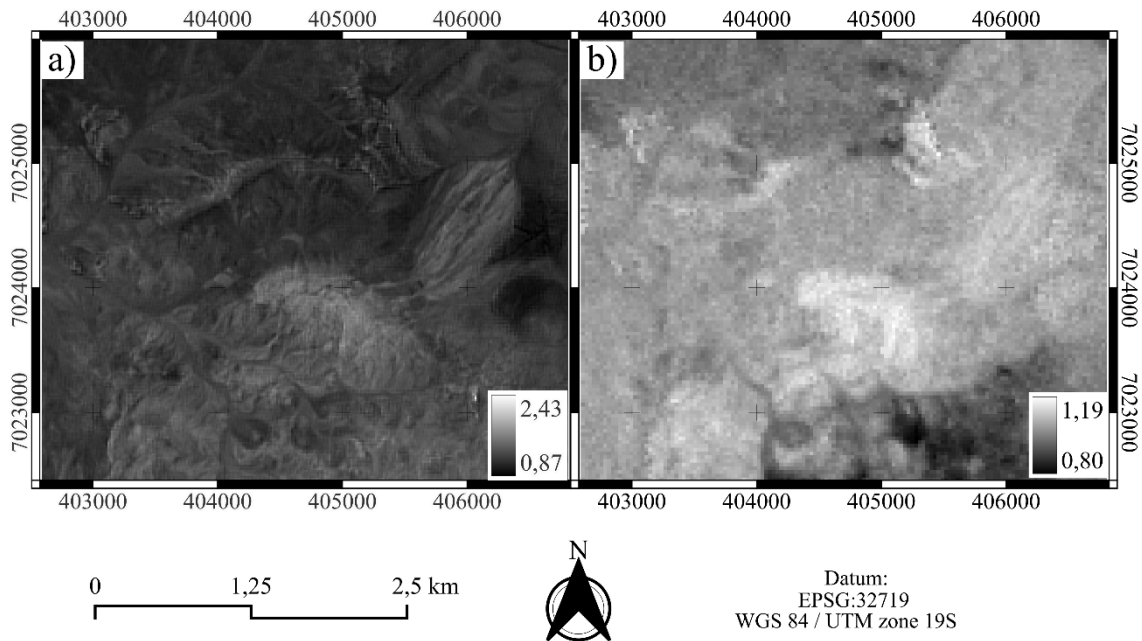


Figura 5.7. Mapas en escala de grises generados a partir de BR. a) BR que se utilizó para resaltar silicatos ferrosos. b) BR que se utilizó para resaltar silicatos ferrosos. Elaboración propia.

Finalmente, se empleó una BR para resaltar zonas compatibles con el desarrollo de *gossans* (Figura 5.8a), en la cual se observó una zona de alta reflectancia distribuida desde el sector SO al NE, distribuida sobre el intrusivo Kpg(a) y el Grupo Chañarcillo (Kch2), a su vez, en sus alrededores se visualizó una distribución menor de reflectancia en las otras unidades geológicas. Mientras que por otro lado, se aplicó una BR para resaltar firmas espectrales correspondientes a granate y piroxeno (Figura 5.8b), los resultados permitieron visualizar una zona de alta reflectancia distribuida desde el sector SO al sector NE, sobre el Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), y en sus alrededores se visualizó una distribución menor de reflectancia. Finalmente, se utilizó una BM para la discriminación de zonas con alteración (Figura 5.8c) en la cual se identificó un patrón de alta reflectancia

desde el sector SO al sector NE, sobre el intrusivo Kpg(a) y el Grupo Chañarcillo (Kch2), y alrededor se visualizó una menor de reflectancia en las unidades contiguas.

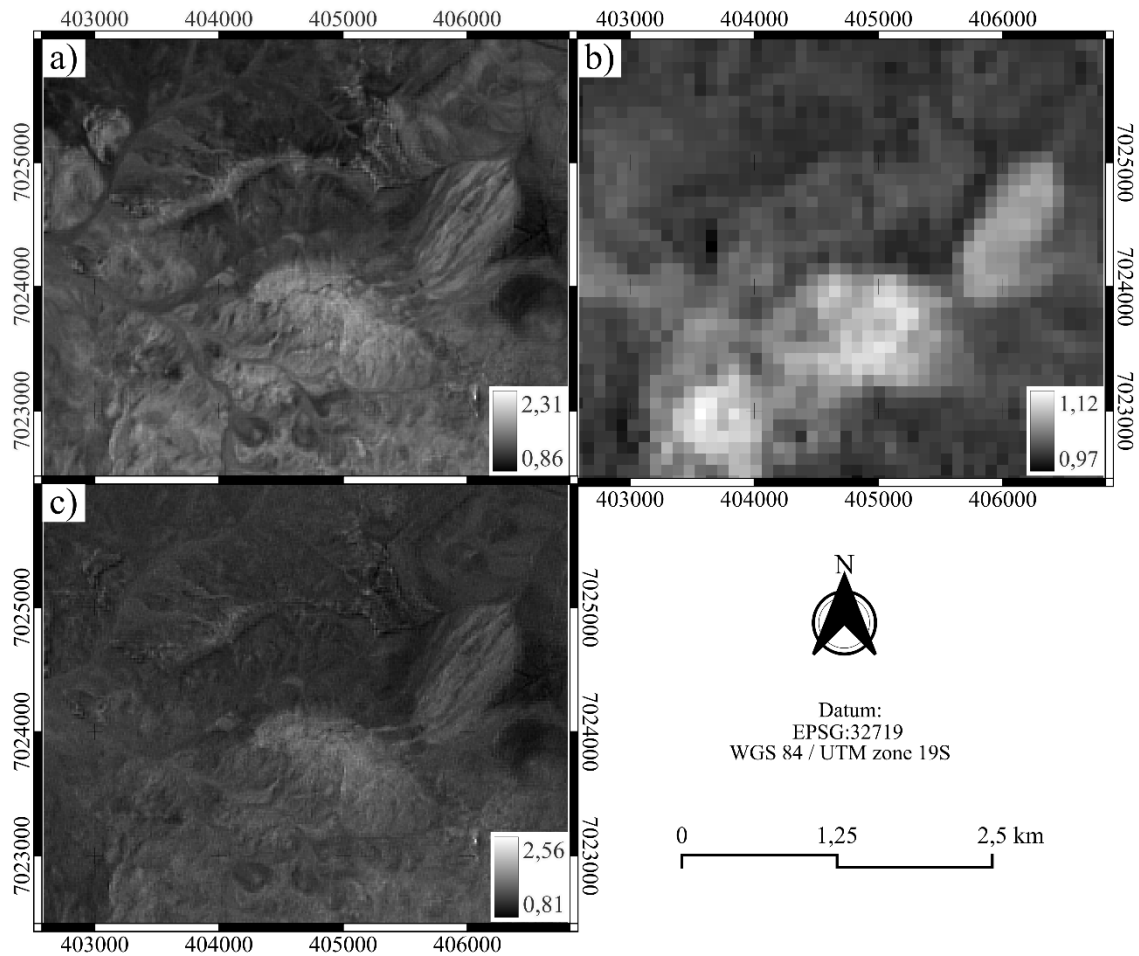


Figura 5.8. Mapas en escala de grises generados a partir de operaciones BR y BM. a) BR que se utilizó para resaltar zonas con desarrollo de *gossan*. b) BR que se utilizó para resaltar granate/piroxeno. c) BM que se utilizó para resaltar zonas con alteración. Elaboración propia.

b) Combinaciones RGB

En cuanto a las combinaciones RGB, estas se definieron a partir de combinaciones de bandas documentadas en la bibliografía y algunas se ajustaron a las características espectrales de las zonas de interés (Anexo 9.1). El criterio de selección se orientó a resaltar patrones de respuesta espectral asociadas a alteraciones hidrotermales típicas de sistemas tipo skarn. Estas relaciones permitieron realzar en contrastes cromáticos la presencia relativa de minerales indicadores, facilitando la diferenciación de unidades litológicas y la delimitación de cuerpos mineralizados.

En la primera combinación RGB (Figura 5.9a) se asignó al canal rojo la BR de alteración argílica, al canal verde la BR de alteración filica, y al canal azul la BR de caolinita; donde se visualizó una distribución clara de caolinita desde el SO al NE, afectando principalmente al Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que para la alteración argílica avanzada se concentró menormente en los sectores NO y SE del área afectando al intrusivo Ksg y la Formación Cerrillos (Kc1), y la alteración filica se centró en los sectores NO y SE del área afectando al intrusivo Ksg y la Formación Cerrillos (Kc1), sin embargo, en la zona central se distribuyó de manera homogénea.

Para la segunda combinación RGB (Figura 5.9b) se le designó al canal rojo la BM de arcillas, al canal verde la BR de anfíbolita y al canal azul la BR de alteración portadora de iones OH; en la cual se identificó una distribución clara de arcillas y minerales portadores de iones OH desde el SO al NE, afectando principalmente al Grupo Chañarcillo (Kch2), el intrusivo Kpg(a) y parte de la Formación Cerrillos (Kc1), mientras las anfíbolitas se concentró en su mayoría en el sector E, afectando a la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2).

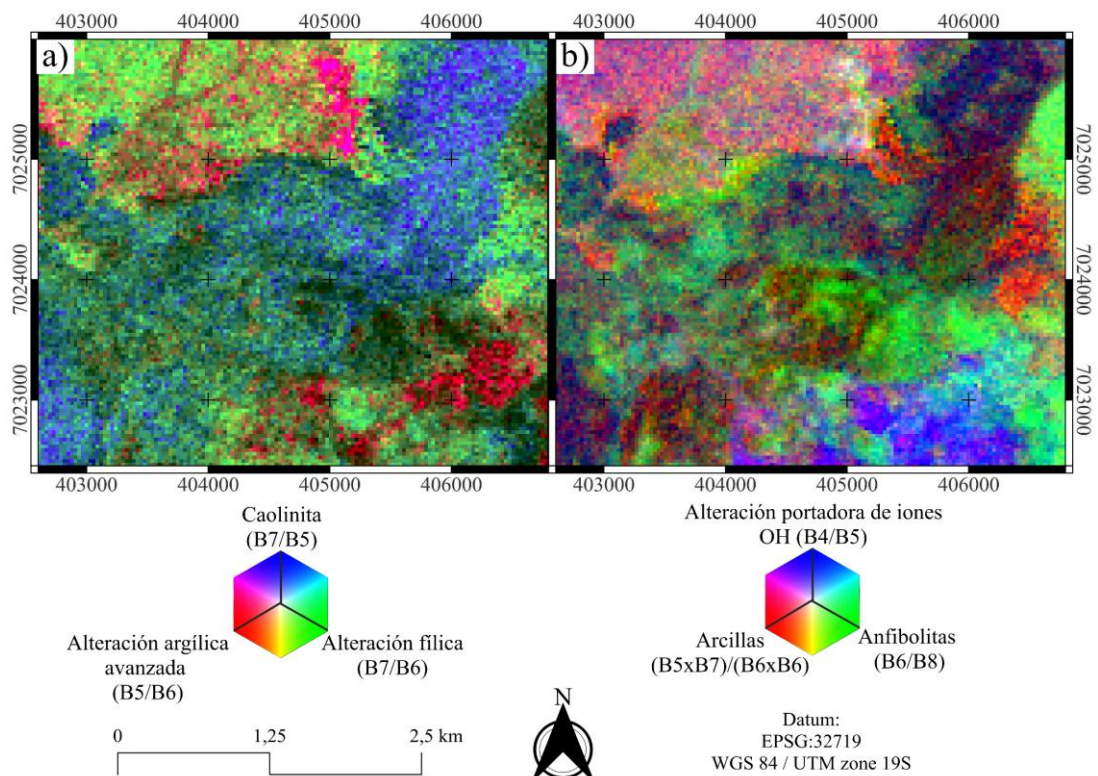


Figura 5.9. a) Combinación RGB que se utilizó para identificar presencia de arcillas. b) Combinación RGB que se utilizó para identificar presencia de arcillas. Elaboración propia.

Para diferenciar zonas con un desarrollo de *gossan* se aplicaron diversas combinaciones de BR. En la primera combinación RGB (Figura 5.10a) se asignó al canal rojo la BR de *gossan*, al canal verde la BR de alteración portadora de iones OH y al canal azul la BR de alteración argílica; donde se visualizó una distribución clara de zonas con presencia de *gossan* y alteración argílica desde el SO hacia el NE, afectando principalmente al Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que al SE del área se observó una distribución de *gossan* con alteración portadora de iones OH afectando a la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), y hacia el NO se identificó una distribución homogénea de alteración argílica afectando al intrusivo Ksg.

La segunda combinación RGB (Figura 5.10b) se le designó al canal rojo la B6 correspondiente a SWIR, al canal verde la B2 asociada a VNIR y el canal azul a la B1 vinculada a VNIR; se observó una distribución desde el SO al NE de la B6 y B1, afectando principalmente al Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), al SE del área se visualizó una distribución de la B2 y B6 afectando a la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), hacia el NO se identificó una distribución de la B1 y B2 afectando al intrusivo Ksg.

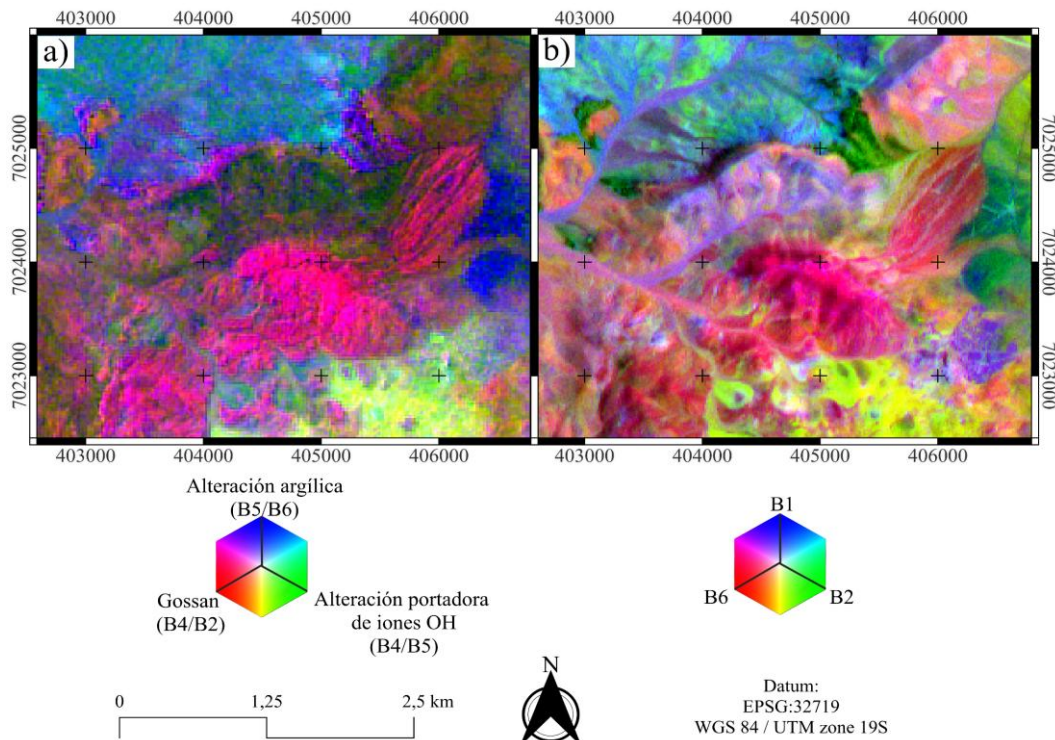


Figura 5.10. a) Combinación RGB que se utilizó para identificar zonas con desarrollo de *gossan*. b) Combinación RGB que se utilizó para identificar zonas con desarrollo de *gossan*. Elaboración propia.

A fin de poner en evidencia áreas con presencia de sílice, carbonato y granate/piroxeno, se aplicaron diversas combinaciones RGB de las BR y BM. La primera combinación RGB (Figura 5.11a) se le asignó al canal rojo la BM de sílice, al canal verde la BR de carbonato y al canal azul la BR de granate/piroxeno; se identificó una distribución clara de zonas con presencia de granate/piroxeno y sílice desde el SO al NE, afectando principalmente al Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que al SE y NO del área se visualizó una distribución de carbonato afectando a la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2) y al intrusivo Ksg respectivamente.

Para la segunda combinación RGB (Figura 5.11b) se designaron al canal rojo la BR de sílice, al canal verde la BR de sílice y al canal azul la BR de sílice; se observó un patrón con presencia de sílice desde el SO al NE, afectando principalmente al Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), además al SE y NO se visualizó otra distribución de sílice más homogénea afectando a la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2) y al intrusivo Ksg,

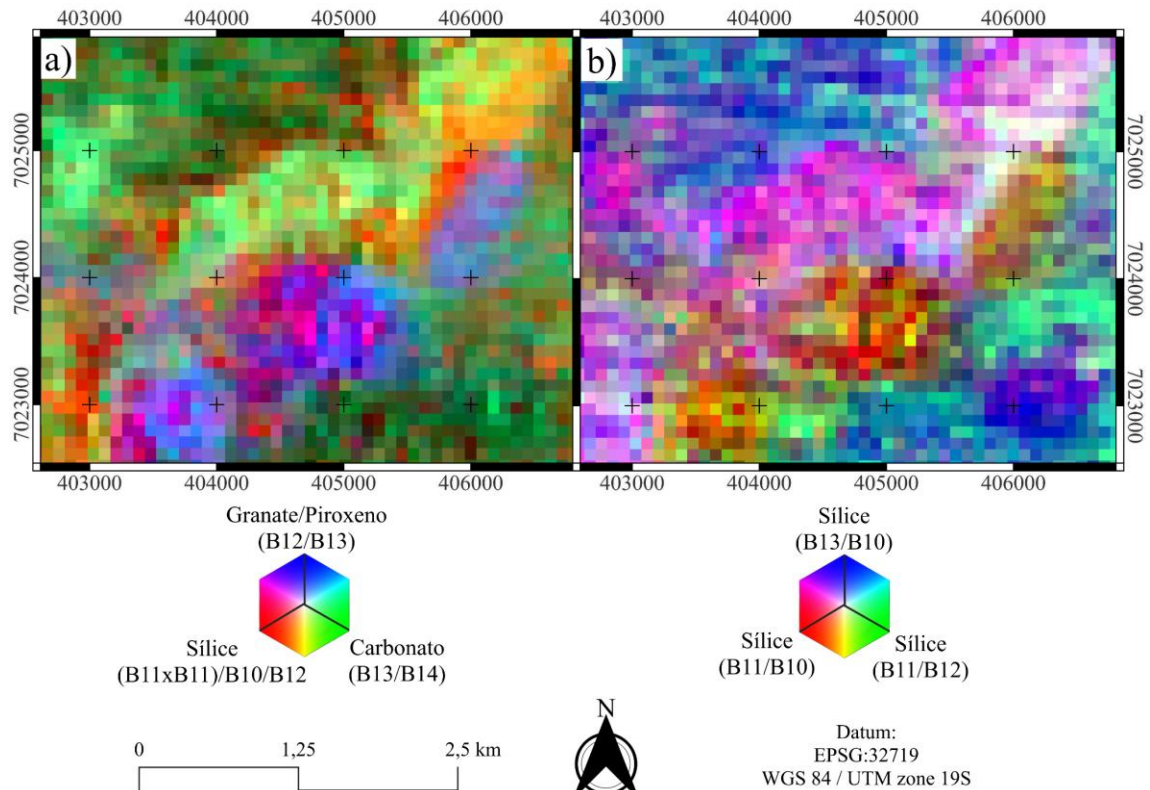


Figura 5.11. a) Combinación RGB que se utilizó para identificar presencia de sílice, carbonato y granate/piroxeno. b) Combinación RGB que se utilizó para identificar presencia de sílice.

Elaboración propia.

Para realizar una discriminación de zonas con alteración para realzar zonas alteradas frente a rocas frescas, se emplearon diversas combinaciones de BM y BR. El primer RGB (Figura 5.12a) se combinó la BR de óxidos en el canal rojo, en el canal verde la BR de hematita y en el canal azul la BR de carbonato; se identificó una zona realzada con óxidos y carbonatos desde el SO al NE, afectando principalmente al Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que al SE del área se visualizó una distribución de óxidos y hematita afectando a la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), y hacia el NO se observó una distribución homogénea de carbonato y hematita sobre el intrusivo Ksg.

En el segundo RGB (Figura 5.12b) se combinó en el canal rojo la B12 correspondiente a TIR, en el canal verde la B5 correspondiente a SWIR, y en el canal azul la B3 correspondiente a VNIR; se visualizó una zona con dominio de la B5 en el centro de la imagen sobre el Grupo Chañarcillo (Kch2), en el SO y NE se observó una distribución de la B12 y la B5, afectando al Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que al SE del área se identificó la B3 y B5 afectando a la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), hacia el NO se visualizó una distribución homogénea de la B3 y la B12 afectando al intrusivo Ksg.

El tercer RGB (Figura 5.12c), se utilizó en el canal rojo la BR de jarosita, en el canal verde la BR de óxidos y en el canal azul la BM de discriminación de zonas con alteración; se reconoció una zona realzada con áreas alteradas desde el SO al NE, afectando al Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que al SE del área se visualizó una distribución de los tres canales afectando a la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), y hacia el NO se observó una distribución de zonas alteradas con jarosita sobre el intrusivo Ksg.

El cuarto RGB (Figura 5.12d) se combinó en el canal rojo la BR de jarosita, en el canal verde la BR de silicatos ferrosos y en el canal azul la BR de óxido férrico (Fe^{3+}); se distinguió una zona con silicatos ferrosos desde el SO al NE, afectando principalmente al Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que al SE del área se visualizó una distribución de los tres canales sobre la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), y hacia el NO se observó una distribución homogénea de jarosita sobre el intrusivo Ksg.

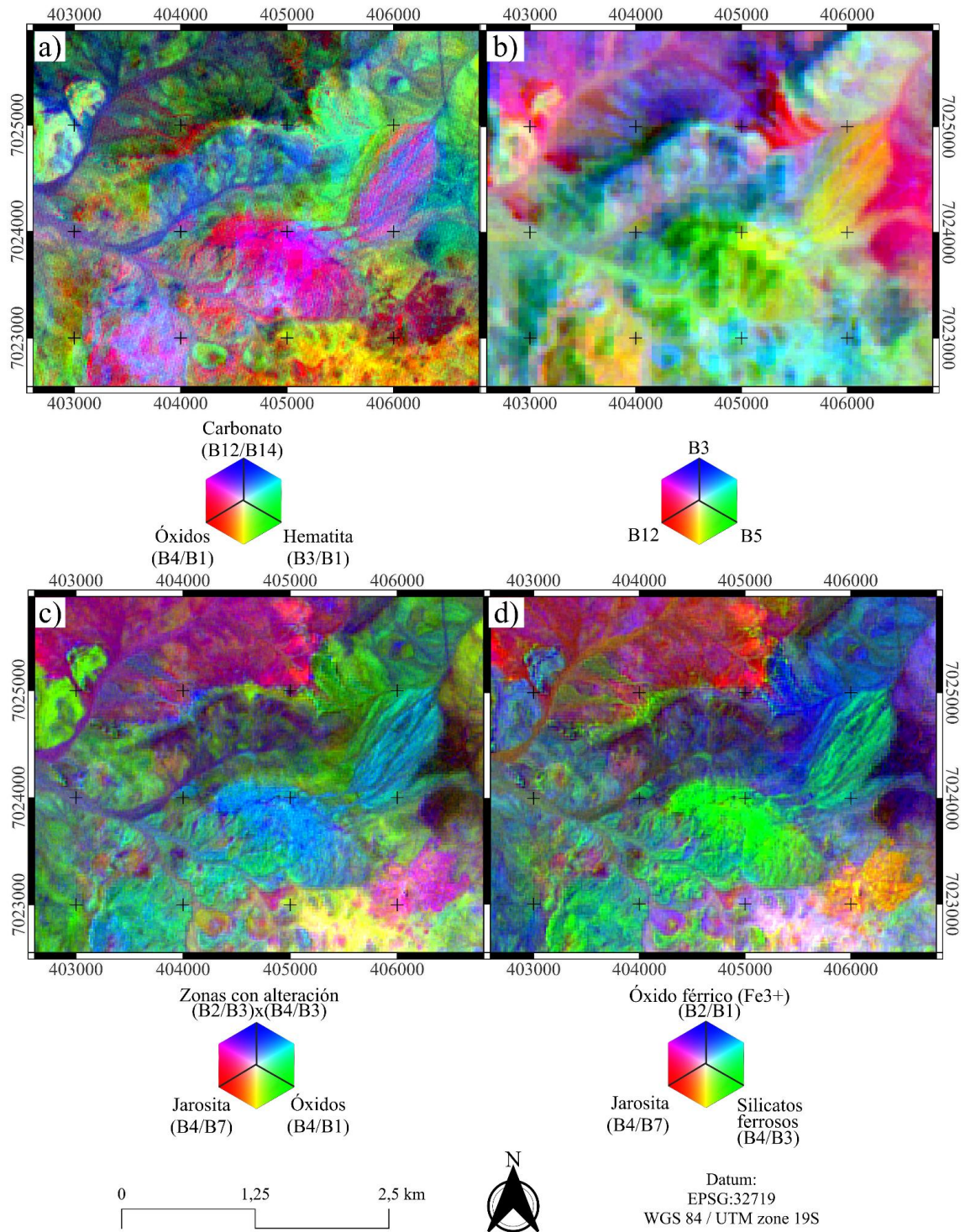


Figura 5.12. a) Combinación RGB utilizada para zonas con alteración. b) Combinación RGB utilizada para zonas con alteración. c) Combinación RGB utilizada para zonas con alteración. d) Combinación RGB utilizada para zonas con alteración. Elaboración propia.

Para enfatizar sectores con presencia de estructuras, contrastes geológicos y patrones de alteración se realizaron diversas combinaciones RGB. El primer RGB (Figura 5.13a) combinó en el canal rojo la B7 correspondiente a SWIR, en el canal verde la B4 correspondiente a SWIR y en el canal azul la B2 correspondiente a VNIR; se visualizó una zona realzada con la B7 desde el SO al NE, en el Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que al SE del área se identificó la B4 afectando a la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), en el NO se observó la B2 sobre el intrusivo Ksg.

En el segundo RGB (Figura 5.13b) se combinó en el canal rojo la B13 correspondiente a TIR, en el canal verde la B12 correspondiente a TIR, y en el canal azul la B10 correspondiente a TIR; se identificó una zona realzada con la B10 y B12 desde el SO al NE, además de una zona paralela de la B12 y B13, que afectan al Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que al NO y SE se distinguió la B13 y la B10 sobre la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2) y al intrusivo Ksg.

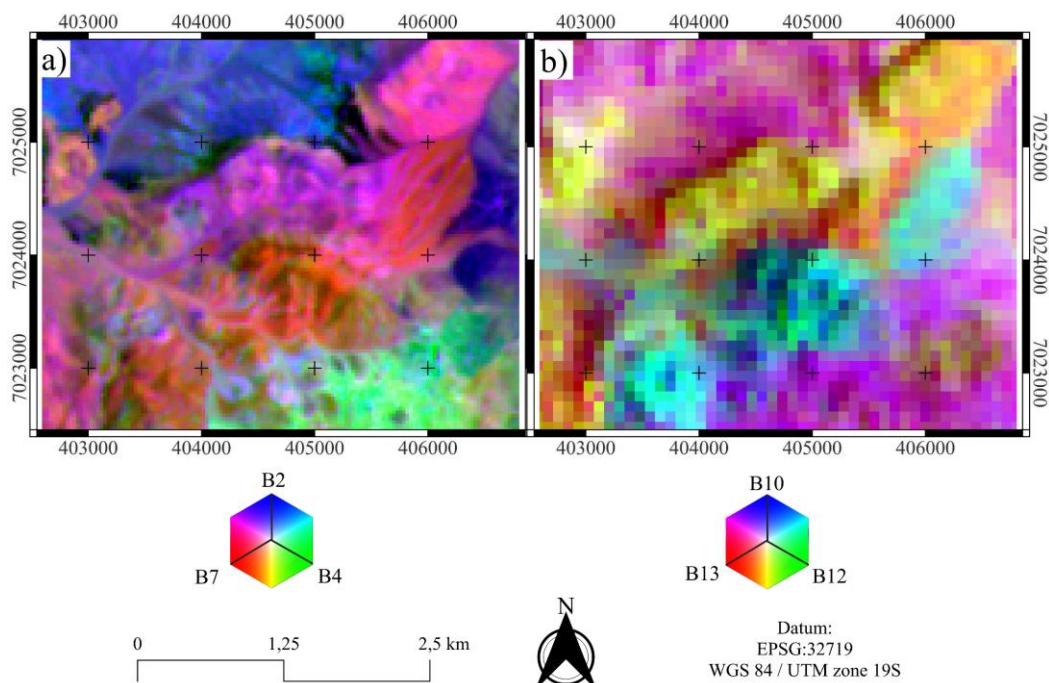


Figura 5.13. a) Combinación RGB que se utilizó para identificar presencia estructuras, contrastes geológicos y patrones de alteración. b) Combinación RGB que se utilizó para identificar presencia estructuras, contrastes geológicos y patrones de alteración. Elaboración propia.

Con el fin de resaltar áreas que presentan alteración filica, propilítica y argílica avanzada se realizaron diversas combinaciones de RGB con los BR y BM. En la primera

combinación RGB (Figura 5.14a) se le asignó al canal rojo la BM de alteración argílica avanzada, al canal verde la BM de alteración filica y al canal azul la BM de alteración propilítica; se identificó una zona realzada con los tres canales desde el SO al NE, afectando principalmente al Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que al SE del área se visualizó una distribución de alteración filica y argílica avanzada afectando a la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), y hacia el NO se observó una distribución homogénea de alteración filica afectando al intrusivo Ksg.

Para la segunda combinación RGB (Figura 5.14b), al canal rojo se le asignó la BM de alteración argílica avanzada, al canal verde la BR de alteración argílica y al canal azul la BM de alteración filica; se reconoció una zona realzada con los tres canales desde el SO al NE, afectando principalmente al Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que al SE del área se visualizó una distribución de los tres canales afectando a la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), y hacia el NO se identificó una distribución homogénea de alteración argílica y filica sobre el intrusivo Ksg.

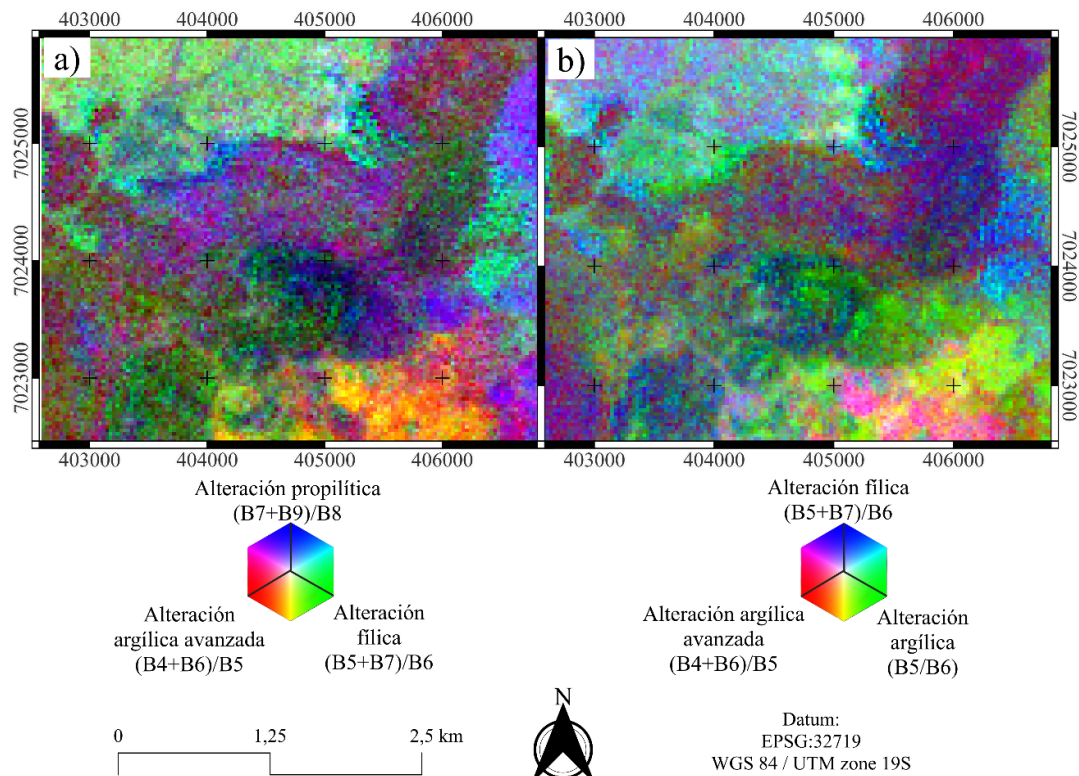


Figura 5.14. a) Combinación RGB utilizada para identificar presencia alteración filica, alteración propilítica y alteración argílica avanzada. b) Combinación RGB utilizada para identificar presencia alteración filica, propilítica y argílica avanzada. Elaboración propia.

Para poner en evidencia zonas con presencia de óxidos, silicatos ferrosos y zonas de interés para un yacimiento tipo skarn, se realizaron diversas combinaciones RGB. En primer lugar (Figura 5.15a) se le asignó al canal rojo el BR de óxido férrico, al canal verde el BR de granate/piroxeno y al canal azul la BR de carbonato; se observó una zona realzada con granate/piroxeno desde el SO al NE, paralelamente se visualizó un área con carbonatos, estas afectaron principalmente al Grupo Chañarcillo (Kch2) y al intrusivo Kpg(a), al SE del área se identificó una distribución de carbonato afectando a la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), hacia el NO y E se distinguió una distribución homogénea de óxido férrico afectando al intrusivo Ksg y Formación Cerrillos (Kc1).

Para la segunda combinación (Figura 5.15b) se le designó al canal rojo la BR de óxido férrico, al canal verde la BR de óxido ferroso y al canal azul la BR de silicato ferroso; se reconoció una zona realzada con óxido férrico y silicatos ferrosos desde el SO al NE, que afectaron principalmente al Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que al SE del área se visualizó una distribución de óxido férrico afectando a la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), y hacia el NO se observó una distribución homogénea de óxido ferroso afectando al intrusivo Ksg.

En el tercer RGB (Figura 5.15c) se le asignó al canal rojo la BR de óxido férrico, al canal verde la BR de óxido de hierro ferroso y al canal azul la BR de alteración portadora de iones OH; se identificó una zona realzada con óxido férrico y óxido de hierro ferroso desde el SO al NE, que afectaron principalmente al Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que al SE del área se visualizó una distribución de óxido férrico y alteración portadora de iones OH afectando a la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), mientras que hacia el NO y E se distinguió una distribución homogénea de óxido de hierro ferroso afectando al intrusivo Ksg y Formación Cerrillos (Kc1) respectivamente.

Al cuarto RGB (Figura 5.15d) se le designó al canal rojo la BR de alteración portadora de iones OH, al canal verde la BR de óxido férrico y al canal azul la BR de silicatos ferrosos; se distinguió una zona realzada con óxido férrico y silicatos ferrosos desde el SO al NE, que afectaron principalmente al Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que al SE del área se visualizó una distribución de óxido férrico y alteración portadora de iones OH afectando a la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), mientras que hacia

el NO se observó una distribución homogénea de alteración portadora de iones OH afectando al intrusivo Ksg.

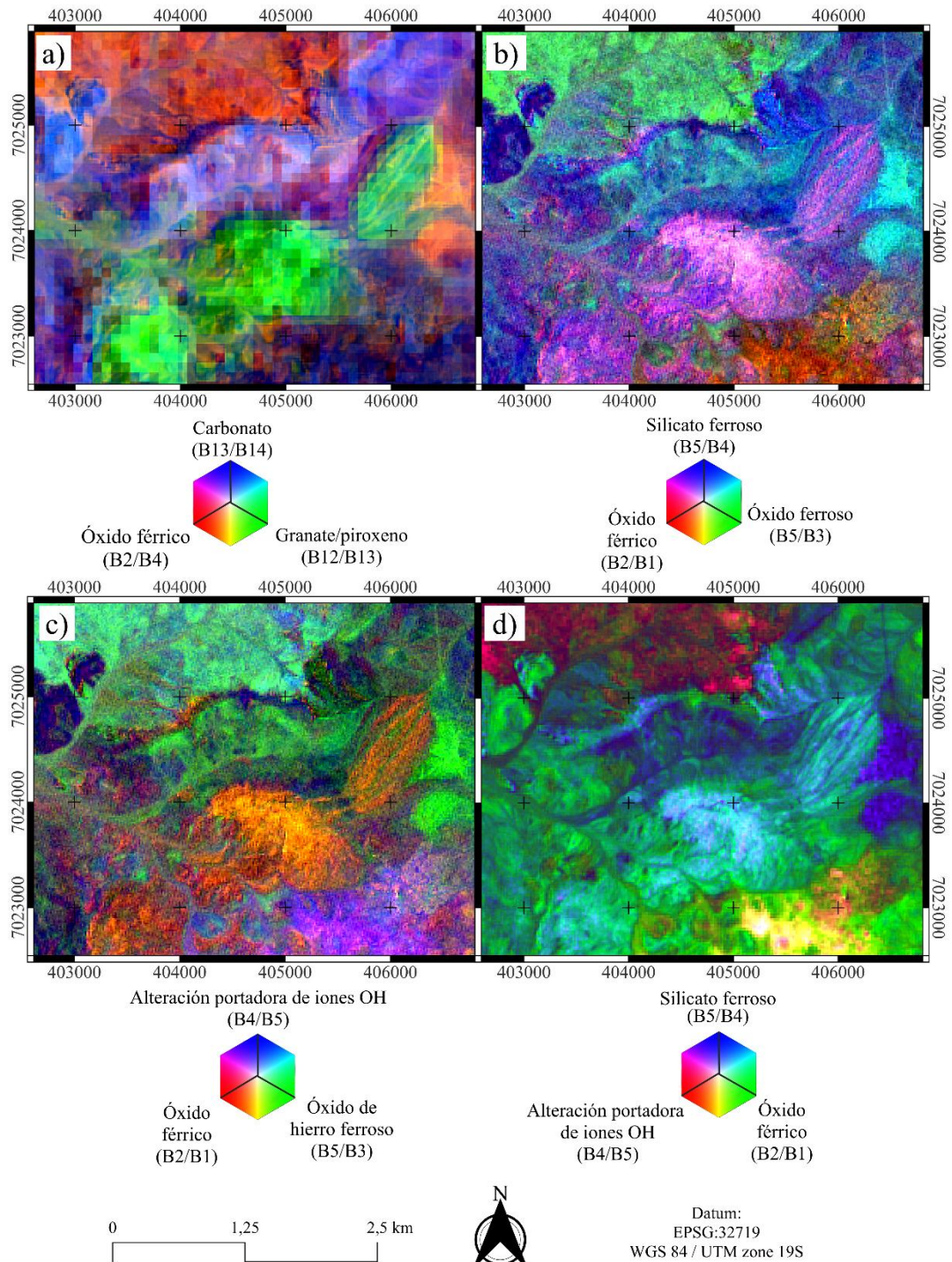
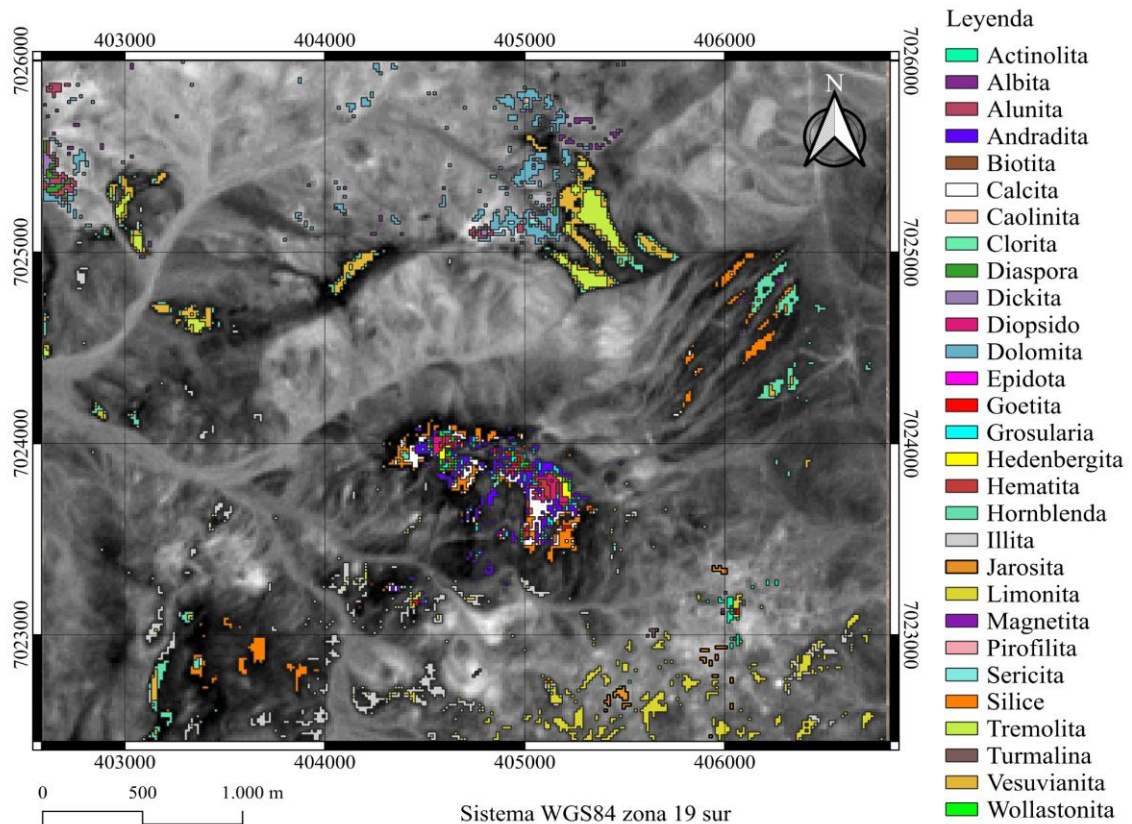


Figura 5.15. a) Combinación RGB utilizada para identificar presencia de óxidos y calcosilicatos. b) Combinación RGB utilizada para la presencia de óxidos y silicatos ferrosos. c) Combinación

RGB utilizada para identificar presencia de óxidos y minerales hidroxílicos. d) Combinación RGB utilizada para identificar presencia de óxidos y silicatos ferrosos. Elaboración propia.

c) *Spectral angle mapper (SAM)*

El análisis realizado mediante el mapeo de ángulo espectral (SAM) permitió identificar un total de 29 minerales de diferentes clases. Sin embargo para la detección de estos se utilizaron dos librerías espectrales; para actinolita, albita, alunita, caolinita, clorita, diáspora, dickita, dolomita, goetita, hematita, illita, jarosita, limonita, magnetita, pirofilita, sericita, sílice y turmalina, se utilizó la Beckman Mineral Spectral Library (Anexo 9.2). Mientras que para andradita, biotita, calcita, diópsido, epidota, grosularia, hedenbergita, hornblenda, tremolita, vesuvianita, wollastonita se empleó Johns Hopkins University Spectral Library (Anexo 9.3). La integración de los resultados de SAM permitió generar un mapa de distribución mineralógica (Figura 5.16).



5.1.2 Resultados derivados de imágenes satelitales de Landsat 8

El análisis de la imagen de Landsat 8, permitió examinar la respuesta espectral en los rangos VNIR y SWIR. Sus bandas permitieron realzar contrastes espectrales, otorgando una base para estudios de alteración y caracterización litológica asociadas a skarn.

a) *Band ratios y band math*

Los BR y BM para Landsat 8, se orientaron con el objetivo de realzar zonas con alteraciones y minerales de interés en los sistemas de tipo skarn, donde fue posible resaltar diversas áreas dentro de la zona de estudio. Para la identificación de minerales aluminosilicatados se aplicó una BM (Figura 5.17). El resultado mostró una mayor reflectancia sobre sector NO, cercana al contacto entre el intrusivo Ksg y el Grupo Chañarcillo (Kch2), y desde el sector SO al NE se observó una distribución homogénea sobre el Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a).

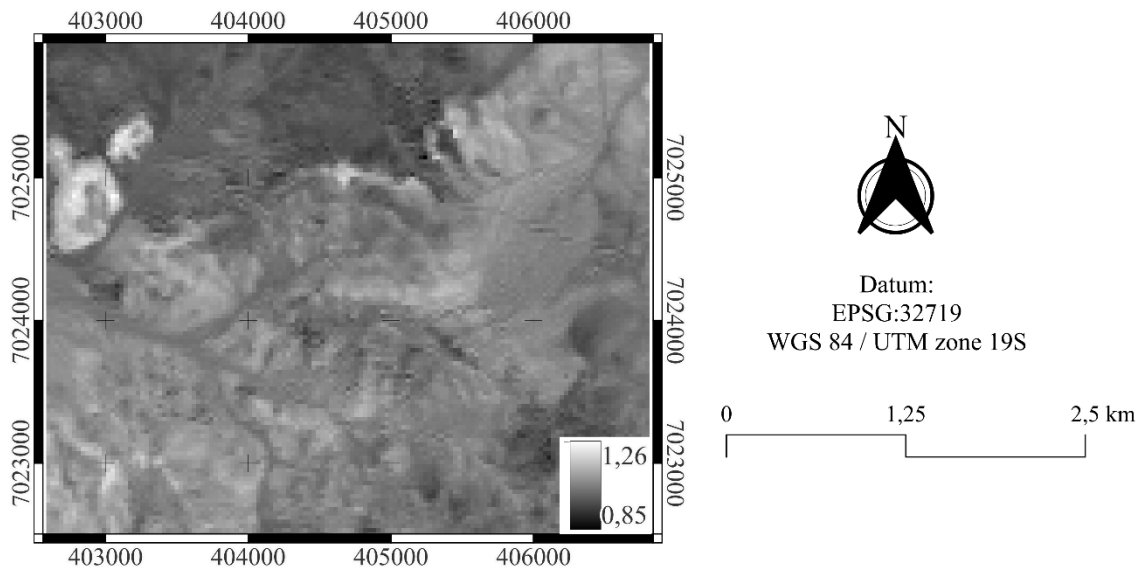


Figura 5.17. Mapa en escala de grises generado a partir de BM que se utilizó para detectar aluminosilicatos.

Para el análisis espectral orientado a la identificación de zonas con presencia de óxidos de hierro, se emplearon diversos BR y BM (Figura 5.18). Los resultados mostraron que las zonas con mayor reflectancia se concentraron en el sector N, NO y centro, afectando principalmente el Grupo Chañarcillo (Kch2), el intrusivo Kpg(a) y Ksg. Mientras que hacia los otros sectores se observó una distribución más homogénea.

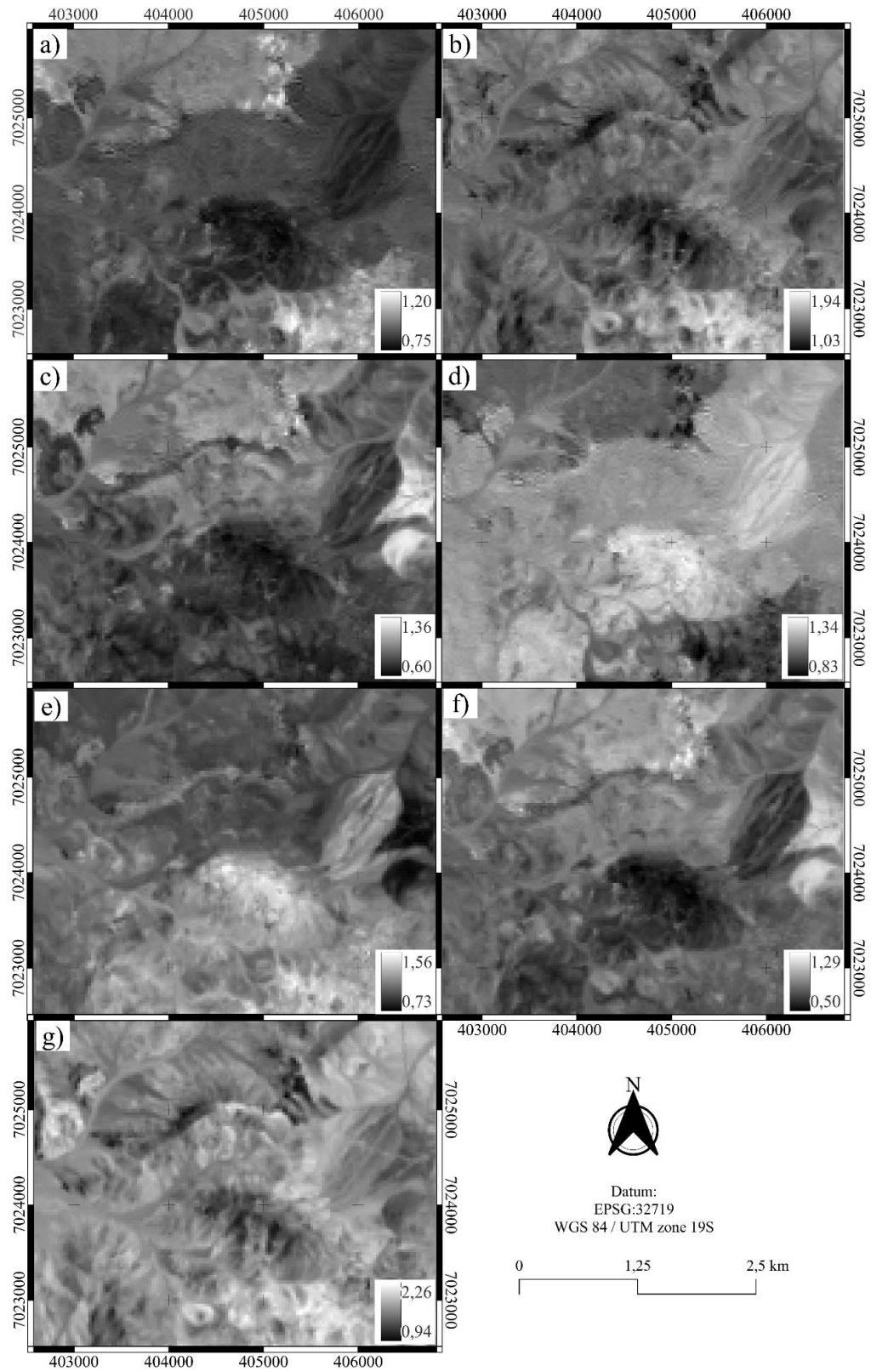


Figura 5.18. Mapas en escala de grises generados a partir de BR. a) BR que se utilizó para resaltar zonas con minerales portadores de iones OH. b) BR que se utilizó para identificar zonas

con presencia de óxidos. c) BR que se utilizó para reconocer áreas con concentraciones de óxido de hierro ferroso. d) BR que se utilizó para distinguir silicatos ferrosos. e) BR que se utilizó para realzar áreas con presencia de óxido férrico. f) BR que se utilizó para resaltar zonas con presencia de minerales hidroxílicos. g) BR que se utilizó para resaltar la presencia de óxidos de hierro. Elaboración propia.

b) Combinaciones RGB

Para el sensor Landsat 8, las combinaciones se establecieron a partir de la bibliografía (Anexo 9.4), estas con el propósito de identificar regiones con una respuesta espectral asociada a diversas zonas de interés en base a alteraciones y minerales de interés. Estas combinaciones permitieron generar diversos contrastes cromáticos en el área de estudio.

Con el fin de resaltar áreas que presentan rocas ricas en sílice y carbonato, se empleó el RGB (Figura 5.19), en la cual para el canal rojo se designó la BR de óxidos, en el canal verde la BR de zonas con minerales portadores de iones OH y en el canal azul la BR de óxido férrico; se identificó una zona realzada con óxido férrico desde el SO al NE con óxidos a su alrededor, que afectaron al Grupo Chañarcillo (Kch2) e intrusivo Kpg(a), mientras que al SE del área se identificó la alteración portadora de iones OH y óxidos afectando a la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), y hacia el NO se distinguió una distribución homogénea de alteración portadora de iones OH afectando al intrusivo Ksg.

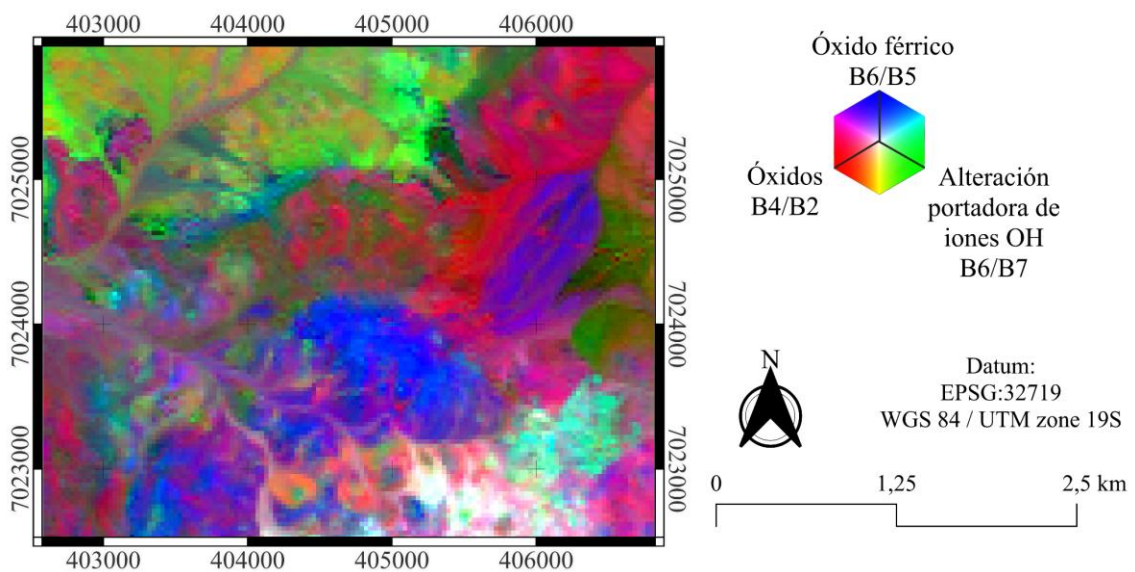


Figura 5.19. Combinación RGB que se utilizó para identificar zonas con rocas ricas en sílice y carbonato. Elaboración propia.

Con el objetivo de discriminar zonas según la litología, para el primer RGB (Figura 5.20a) se designó al canal rojo la B7 correspondiente a SWIR, al canal verde la B4 correspondiente a rojo y al canal azul la B1 correspondiente a azul profundo; se identificó una zona realzada con la B7 y B1 desde el SO al NE, que afectaron al Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que al SE del área se visualizó una distribución de la B7 y B4 afectando a la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), y hacia el NO una distribución homogénea de la B4 afectando al intrusivo Ksg.

En el segundo RGB (Figura 5.20b) se designó al canal rojo la BR de óxidos de hierro, al canal verde la BR de minerales portadores de hidroxilo y al canal azul la BM de aluminosilicatos; se observó una zona realzada con aluminosilicatos desde el SO al NE, que afecta principalmente al Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que al SE del área se visualizó una distribución de óxidos de hierro y minerales portadores de hidroxilo sobre a la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), y hacia el NO una distribución homogénea de minerales portadores de hidroxilo afectando al intrusivo Ksg.

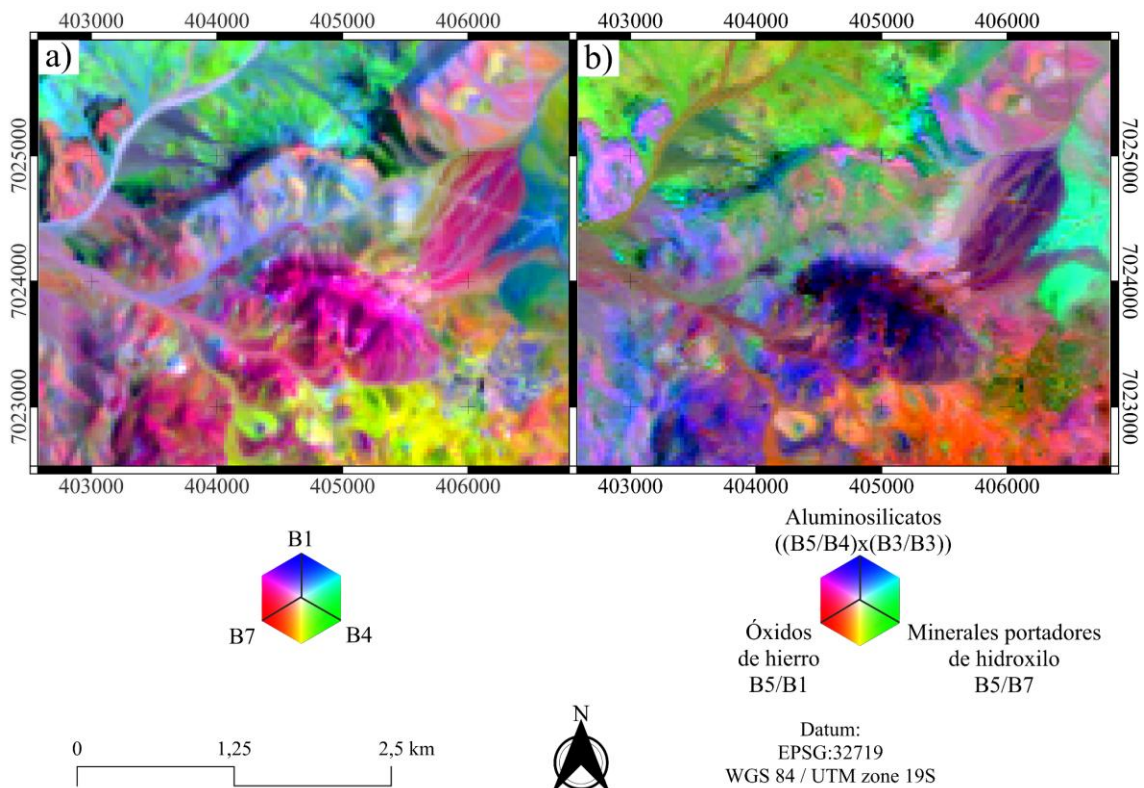


Figura 5.20. a) Combinación RGB utilizada para identificar las litologías. b) Combinación RGB utilizada para identificar las litologías. Elaboración propia.

Para identificar zonas con presencia de óxidos, se realizaron diversos RGB, entre ellos en el primer RGB (Figura 5.21a), se designó al canal rojo la BR de óxido férrico, al canal verde la BR de óxidos de hierro ferroso y al canal azul la BR de silicato ferroso; se reconoció una zona realzada con óxido férrico y silicatos ferrosos desde el SO al NE con silicatos ferrosos a su alrededor, que sobre el Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que al SE del área se visualizó una distribución de óxido férrico sobre la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), y hacia el NO se observó una distribución homogénea de óxido de hierro ferroso afectando al intrusivo Ksg.

En el segundo RGB (Figura 5.21b), se designó para el canal rojo la BR de óxido férrico, en el canal verde la BR de óxido de hierro ferroso y en el canal azul la BR de alteración portadora de iones OH; se observó una zona realzada con óxido férrico y óxidos de hierro ferroso desde el SO al NE, sobre el Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), al SE del área se identificó la presencia de alteración portadora de iones OH y óxido férrico sobre la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), y hacia el NO se visualizó una distribución de óxido de hierro ferroso y alteración portadora de iones OH afectando principalmente al intrusivo Ksg.

Finalmente, en el tercer RGB (Figura 5.21c), se le designó al canal rojo la BR de alteración portadora de iones OH, al canal verde la BR de óxido férrico y al canal azul la BR de silicato ferroso; se reconoció una zona realzada con alteración portadora de iones OH y óxidos de hierro desde el SO al NE sobre el Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que al SE del área se visualizaron distribuciones de silicatos ferrosos y alteración portadora de iones OH sobre la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), hacia el NO se distinguió una distribución homogénea de óxido de hierro y en menor medida silicatos ferrosos afectando al intrusivo Ksg.

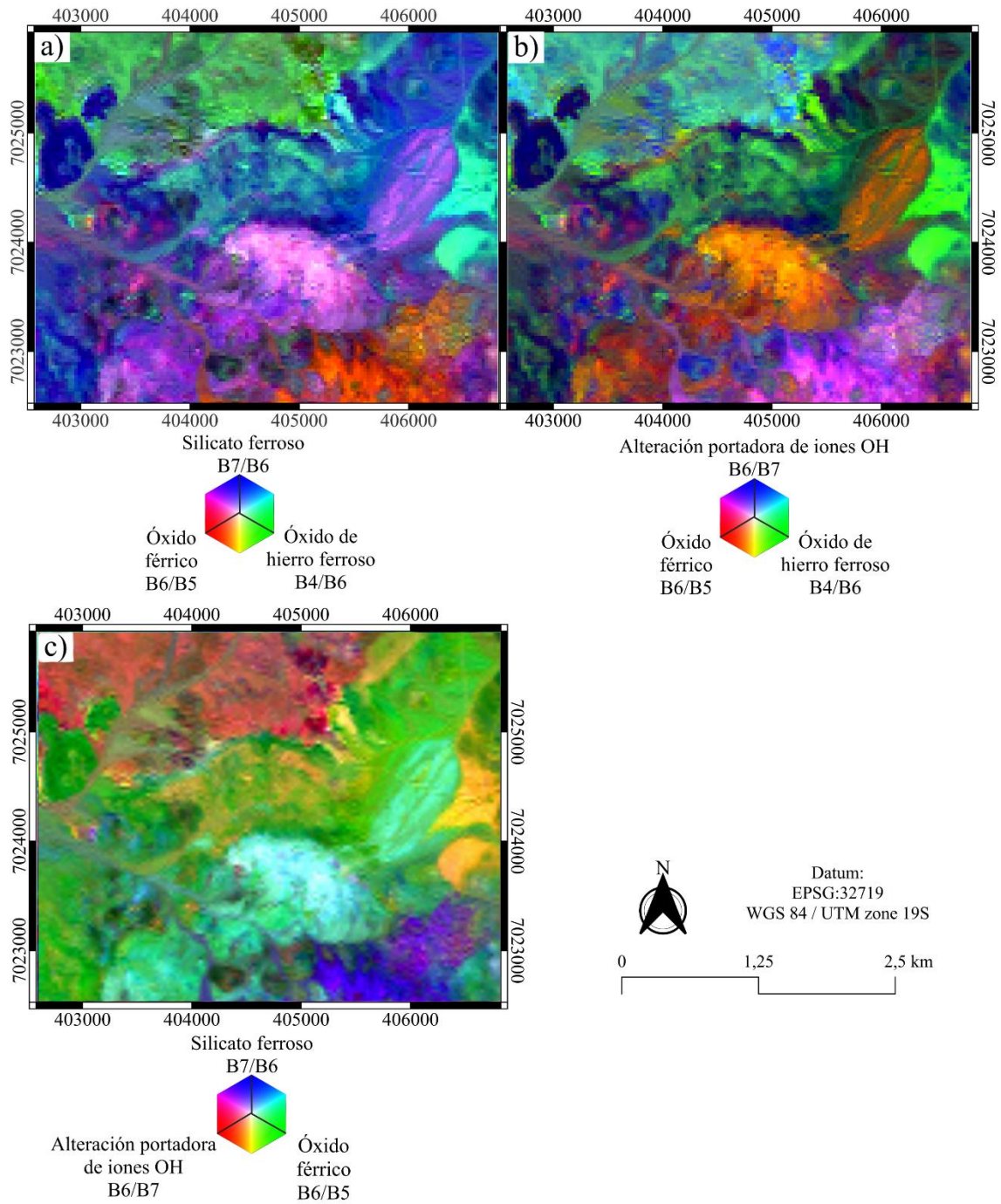


Figura 5.21. a) Combinación RGB que identificó zonas con presencia de óxidos y silicatos ferrosos. b) Combinación RGB que identificó zonas con presencia de óxidos y minerales portadores de iones OH. c) Combinación RGB que identificó zonas con presencia de óxidos, y minerales portadores de iones OH y silicatos ferrosos. Elaboración propia.

5.1.3 Resultados derivados de imágenes satelitales de Sentinel-2

Los resultados espectrales de Sentinel-2 en el rango VNIR-SWIR, constituyeron una base importante para la detección de minerales hidratados, óxidos de hierro y carbonatos, siendo ampliamente aplicado debido a su resolución espacial entre los 10 y 60 m.

a) Band ratios y band math

En el caso del sensor Sentinel-2, los BR y BM fueron aplicados con el propósito de resaltar sectores vinculados a alteraciones hidrotermales y asociaciones minerales características de sistemas de tipo skarn. Para ello, se utilizaron aquellos que permitieron diferenciar contrastes espectrales y además, delimitar áreas con firmas espectrales distintivas dentro de la región analizada.

Para identificar zonas con presencia de óxidos de hierro, se emplearon diversas combinaciones BR y BM (Figura 5.22). Los resultados realzaron zonas con mayor reflectancia en el sector SE, central y N coincidiendo con la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), Grupo Chañarcillo (Kch2) y los intrusivos Ksg y Kpg(a). Los otros sectores mostraron una distribución más homogénea o de menor reflectancia en algunos casos.

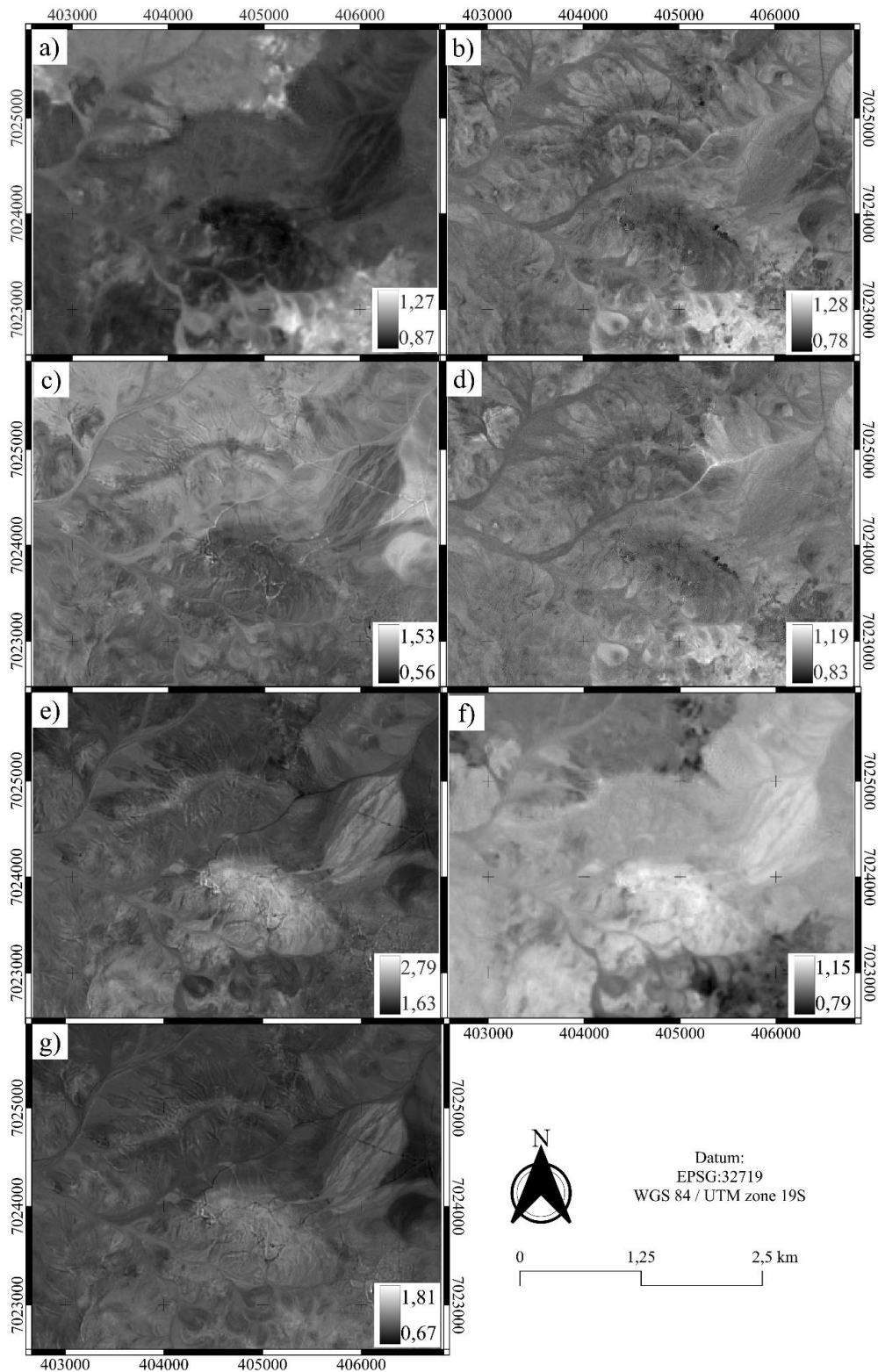


Figura 5.22. Mapas en escala de grises generados a partir de operaciones BR y BM. a) BR utilizada para realzar zonas con minerales portadores de iones OH. b) BR utilizada para identificar áreas con presencia de óxidos de hierro. c) BR utilizada para identificar zonas

compatibles con concentraciones de óxido de hierro ferroso. d) BR utilizada para reconocer concentraciones de hierro férrico (Fe^{3+}). e) BM utilizada para reconocer concentraciones de hierro ferroso (Fe^{2+}). f) BR utilizada para distinguir silicatos ferrosos. g) BR utilizada para determinar zonas asociadas a óxido férrico. Elaboración propia.

Para el realce de vegetación y caolinita se utilizó un BR (Figura 5.23). El resultado mostró una zona de mayor reflectancia ubicada en el sector NO del área cercana al contacto entre el intrusivo Ksg y el Grupo Chañarcillo (Kch2), desde el sector SO al NE se identificó una distribución homogénea coincidiendo con el Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), en las otras áreas y unidades geológicas se visualizaron reflectancias más homogéneas o de menor intensidad.

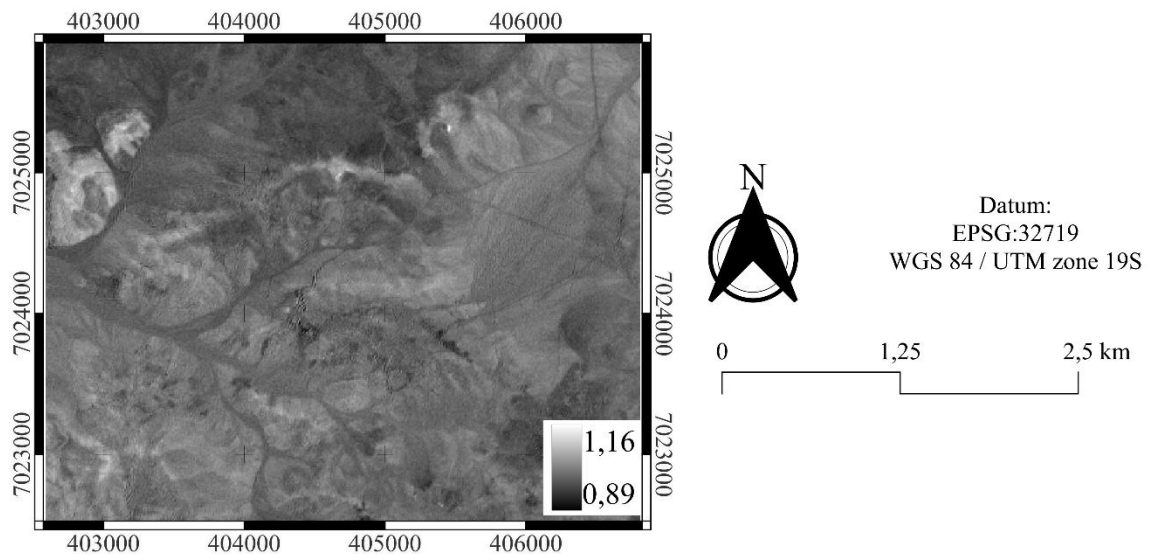


Figura 5.23. Mapa en escala de grises generado a partir del BR que se utilizó para identificar áreas con presencia de vegetación/caolinita. Elaboración propia.

b) Combinaciones RGB

Las combinaciones RGB aplicadas al sensor Sentinel-2, fueron definidas por diversas referencias bibliográficas (Anexo 9.5), para distinguir sectores que presentaban una respuesta espectral asociada a alteraciones y minerales por medio de BR y BM.

En primer lugar (Figura 5.24a) para el canal rojo se le asignó la BR de óxido férrico, para el canal verde la BR de óxido de hierro ferroso y para el canal azul la BR de alteración portadora de iones OH; se observó un realce de óxido férrico y óxidos de hierro ferroso

desde el SO al NE en el Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que al SE del área se visualizó una distribución de óxido férrico y alteración portadora de iones OH sobre la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), y hacia el NO se identificó una distribución homogénea de óxido de hierro ferroso sobre el intrusivo Ksg.

Para la segunda combinación RGB (Figura 5.24b) se le designó al canal rojo la BR de óxido férrico, al canal verde la BR de óxido de hierro ferroso y al canal azul la BR de silicato ferroso; en el SO y NE se reconoció una zona realzada con óxido férrico y silicato ferroso sobre el Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), al SE del área se visualizó una zona de óxido férrico en la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), en el NO se distinguió una distribución homogénea de óxido de hierro ferroso en el intrusivo Ksg.

En el tercer RGB (Figura 5.24c) se le asignó al canal rojo la BR de alteración portadora de iones OH, al canal verde la BR de óxido férrico y al canal azul la BR de silicato ferroso; se identificó una zona con óxido férrico y silicato ferroso desde el SO al NE que afectaron principalmente al Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que al O y SE del área se visualizó una distribución de óxido férrico sobre la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2) y Grupo Chañarcillo (Kch2), y hacia el NO se reconoció una distribución de alteración portadora de iones OH afectando al intrusivo Ksg.

Al cuarto RGB (Figura 5.24d) se le asignó al canal rojo la B12 correspondiente a SWIR, al canal verde la B8 correspondiente a NIR y al canal azul la B2 correspondiente a azul; se visualizó una zona con la B12 y B2 desde el SO al NE sobre el Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que al SE del área se identificó una distribución de la B12 y B8 sobre la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), y hacia el NO se observó una distribución de la B8 afectando al intrusivo Ksg.

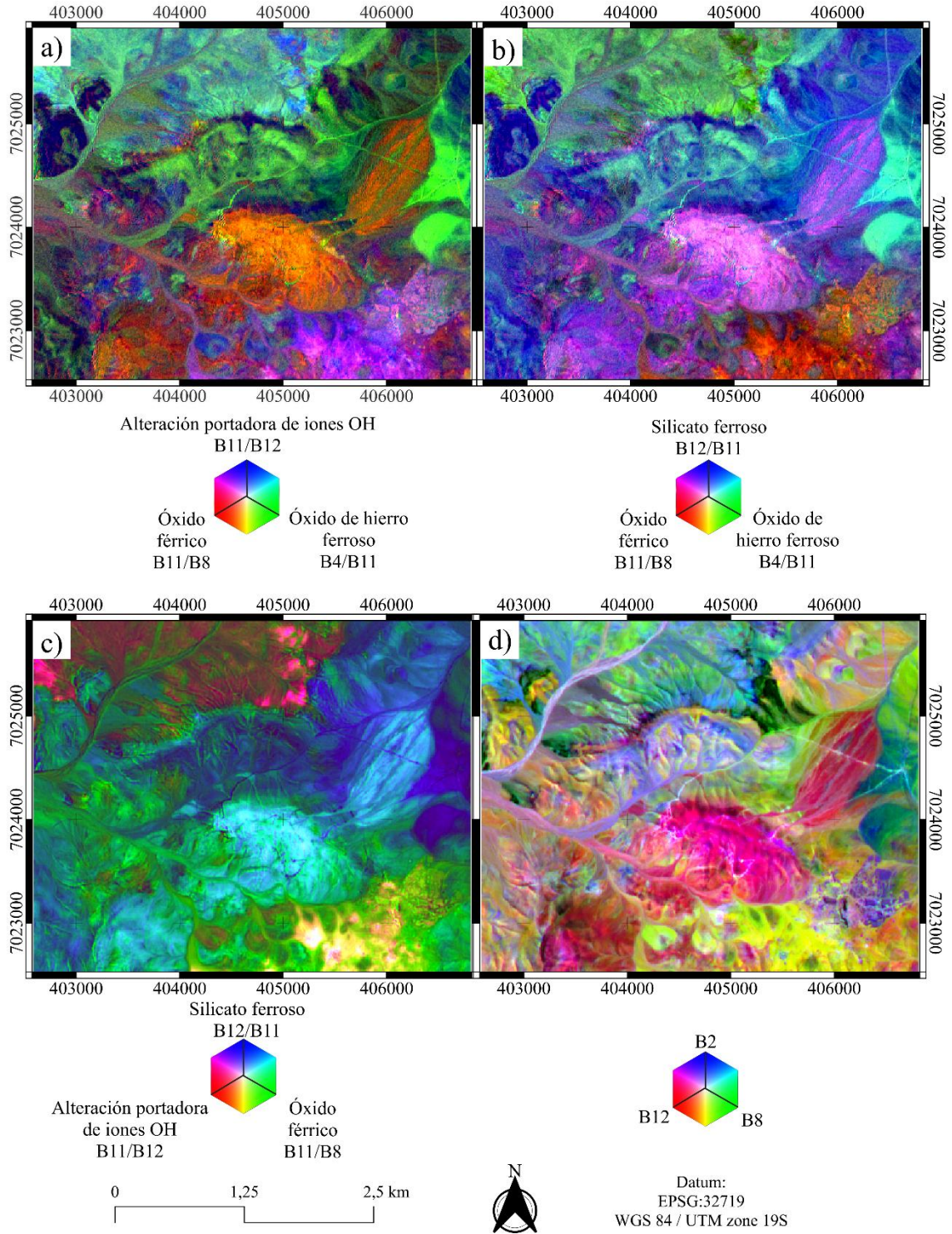


Figura 5.24. Combinación RGB utilizada para identificar zonas con presencia de óxidos. a) Combinación RGB utilizada para identificar zonas con presencia de óxidos. b) Combinación RGB utilizada para identificar zonas con presencia de óxidos. c) Combinación RGB utilizada

para identificar zonas con presencia de óxidos. d) Combinación RGB utilizada para identificar zonas con presencia de óxidos. Elaboración propia.

Para realzar zonas con presencia de alteración fílica (micas y sericita) y arcillas en general, se utilizó la combinación RGB (Figura 5.25) donde al canal rojo se le asignó la BR de alteración portadora de iones OH, al canal verde el BR de óxido de hierro y al canal azul la BR de silicato ferroso; se reconoció una zona realzada con silicato ferroso desde el SO al NE sobre el Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que al SE y NO del área se visualizó una distribución homogénea de óxido de hierro sobre la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), Grupo Chañarcillo (Kch2), el intrusivo Kpg(a) y Ksg, donde también se observó alteración portadora de iones OH.

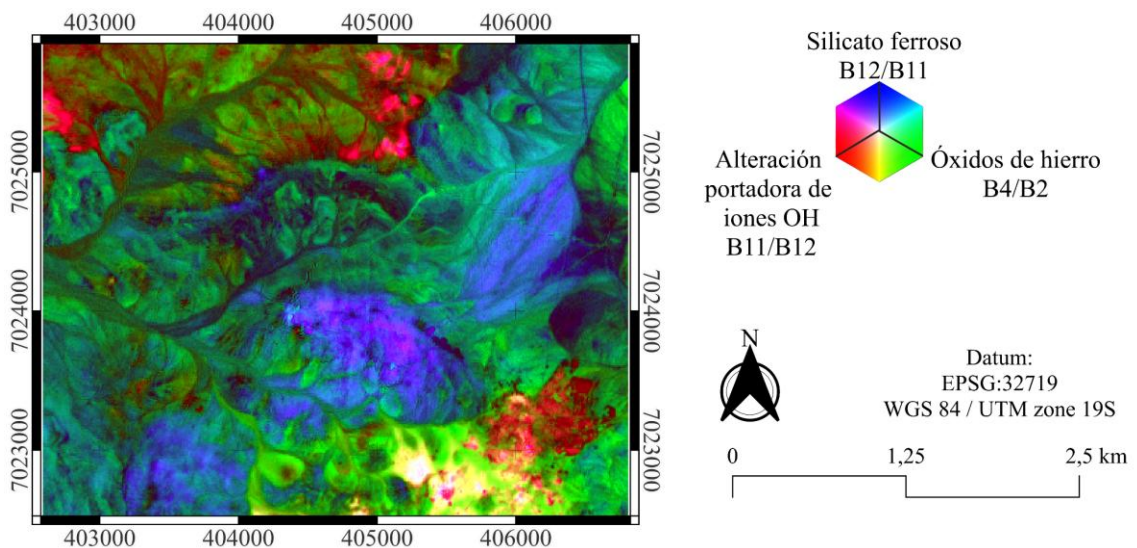


Figura 5.25. Combinación RGB utilizada para identificar zonas con presencia de alteración fílica y arcillas. Elaboración propia.

Para identificar zonas con presencia de óxidos de hierro y arcillas, se utilizaron diversas combinaciones RGB. En primer lugar (Figura 5.26a) para el canal rojo se le asignó la B2 correspondiente a azul, para el canal verde la B5 correspondiente a NIR y para el canal azul la B7 correspondiente a SWIR; se observó un realce de la B7 desde el SO al NE y parte del NO en el Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que al SE del área se visualizó una distribución de la B7 y B5 sobre la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), y hacia el NO se visualiza la B5 afectando al intrusivo Ksg.

Para la segunda combinación (Figura 5.26b) se designó al canal rojo la BR de hierro férrico, al canal verde la BR de alteración portadora de iones OH y al canal azul la BM hierro ferroso; se identificó una zona con hierro ferroso desde el SO al NE en el Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que al SE del área se visualizó una distribución de hierro férrico y alteración portadora de iones OH sobre la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), y hacia el NO se observó una distribución de alteración portadora de iones OH afectando al intrusivo Ksg.

En el tercer RGB (Figura 5.26c) se le asignó al canal rojo la BR de alteración portadora de iones OH, al canal verde la BR de óxidos de hierro y al canal azul la BR de óxidos de hierro ferroso; se observó un realce de óxido de hierro ferroso desde el SO al NE en el Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que al SE del área se visualizó una distribución de óxido de hierro y alteración portadora de iones OH sobre la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), y hacia el NO se identificó una distribución de óxido de hierro ferroso con alteración portadora de iones OH afectando al intrusivo Ksg.

Al cuarto RGB (Figura 5.26d) se le designó al canal rojo la BR de alteración portadora de iones OH, al canal verde la BR de silicato ferroso y al canal azul la BR de óxido férrico; se observó un realce de óxido férrico y silicato ferroso desde el SO al NE en el Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que desde el SE al NO del área se visualizó una distribución de óxido férrico sobre la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), el Grupo Chañarcillo (Kch2). y el intrusivo Kpg(a), hacia el NO se distinguió una distribución de alteración portadora de iones OH y óxido férrico sobre el intrusivo Ksg.

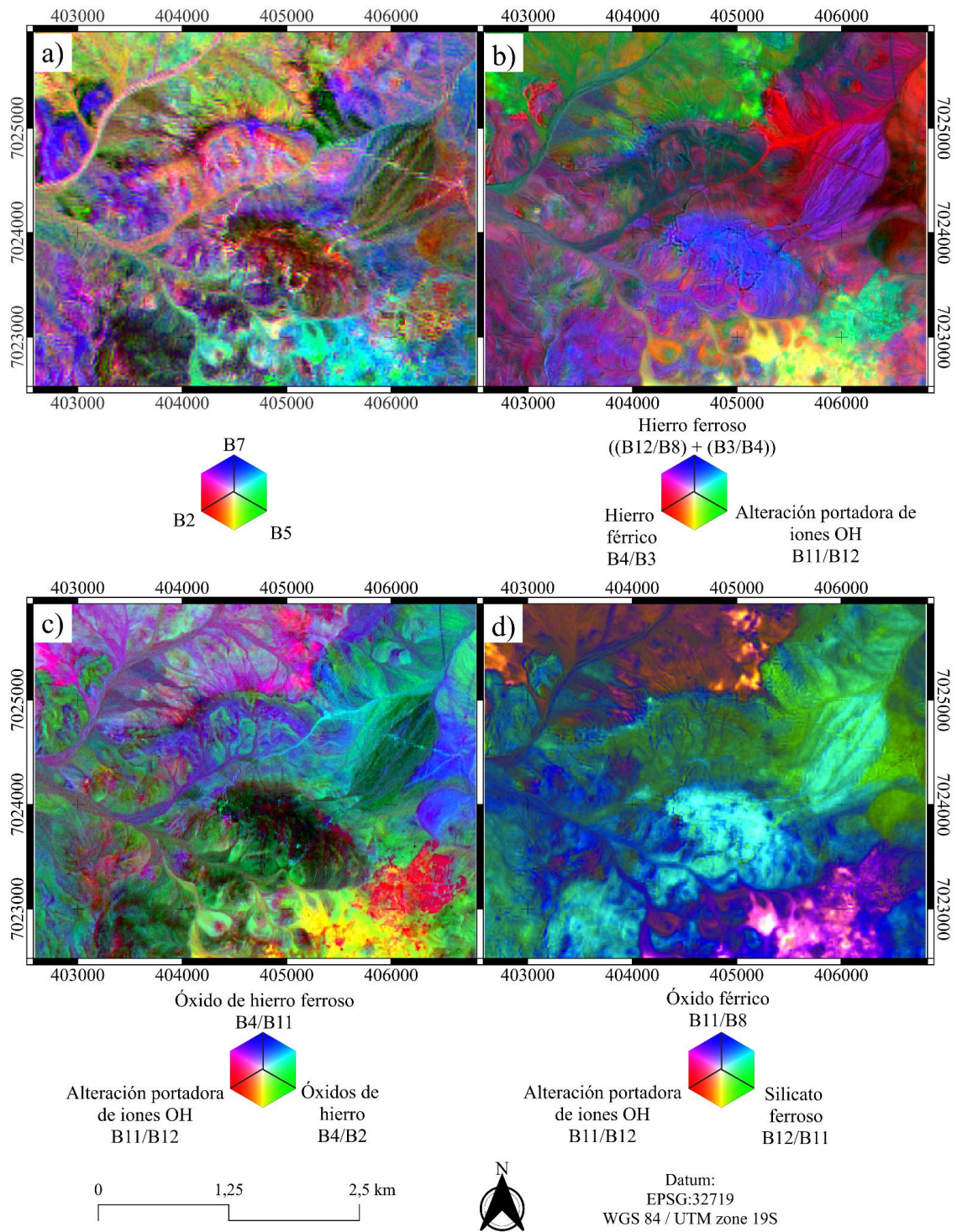


Figura 5.26. a) Combinación RGB utilizada para identificar zonas con presencia de óxidos de hierro. b) Combinación RGB utilizada para identificar zonas con presencia de óxidos. c) Combinación RGB utilizada para identificar zonas con presencia de óxidos de hierro. d) Combinación RGB utilizada para identificar zonas con presencia de óxidos. Elaboración propia.

Para identificar zonas con presencia de vegetación, cuerpos de agua y zonas alteradas, se utilizaron diversas combinaciones RGB. En primer lugar (Figura 5.27a) para el canal rojo se le asignó la B2 correspondiente a azul, para el canal verde la B8 correspondiente a NIR y para el canal azul la B12 correspondiente a SWIR; se observó un realce de la B12 y B2 desde el SO al NE en el Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que en el SE del área se visualizó una distribución de B12 y B8 sobre la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), hacia el NO se identificó una distribución de la B8 en el intrusivo Ksg.

Para la segunda combinación RGB (Figura 5.27b) se le designó al canal rojo la BR de alteración portadora de iones OH, al canal verde la BR de vegetación/caolinita y al canal azul la BR de óxidos de hierro; se observó un realce de la vegetación/caolinita desde el SO al NE en el Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que en el SE del área se distinguió una distribución de óxido de hierro y alteración portadora de iones OH sobre la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), hacia el NO se visualizó una distribución de la alteración portadora de iones OH en el intrusivo Ksg.

En el tercer RGB (Figura 5.27c) se le asignó al canal rojo la BR de óxidos de hierro, en el canal verde la BR de óxido férrico y en el canal azul la BR de alteración portadora de iones OH; se observó un realce de óxido férrico desde el SO al NE en el Grupo Chañarcillo (Kch2) y el intrusivo Kpg(a), mientras que en el SE del área se visualizó una distribución de óxido férrico y alteración portadora de iones OH sobre la Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2), y hacia el NO se reconoció una distribución de la alteración portadora de iones OH en el intrusivo Ksg.

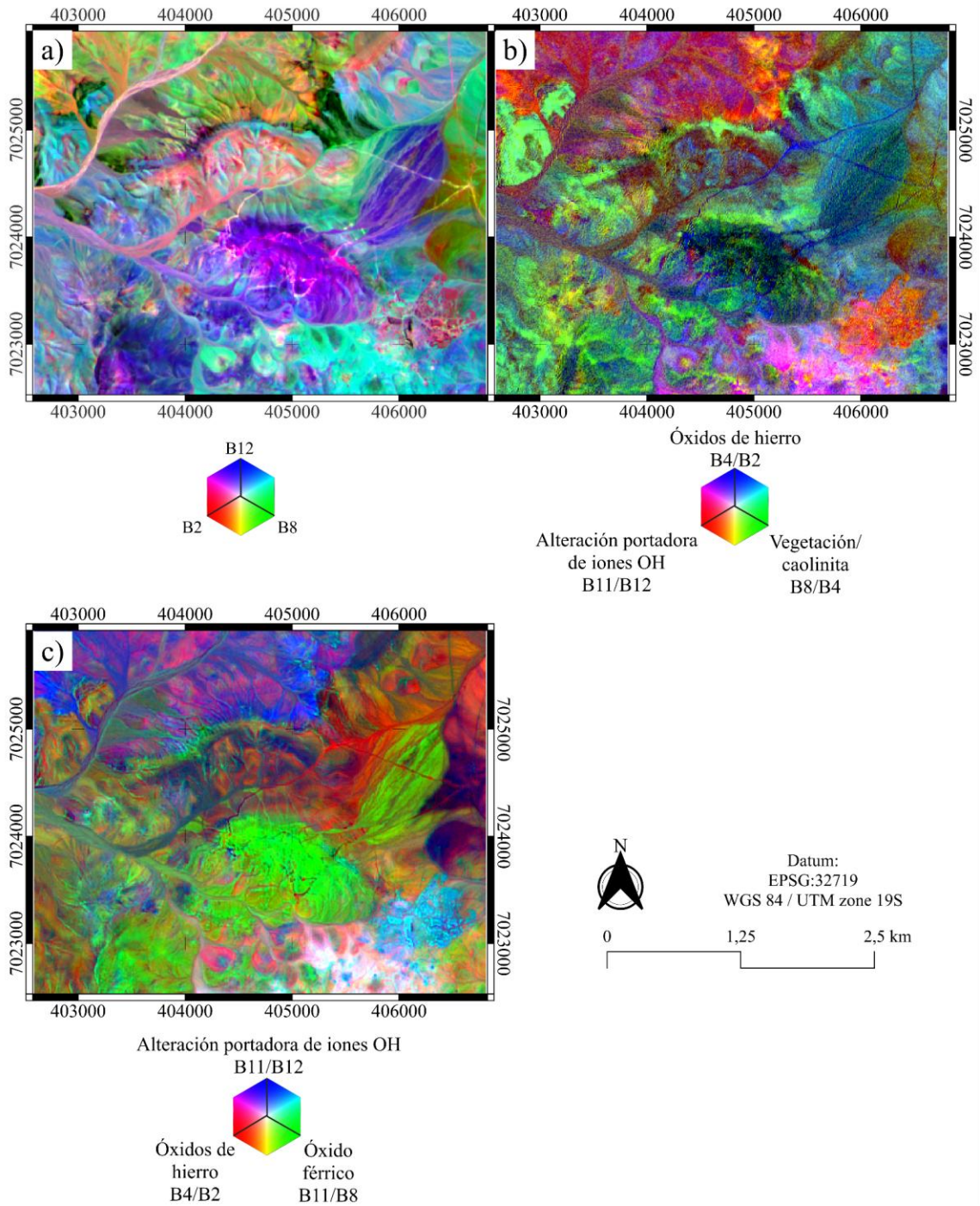


Figura 5.27. a) Combinación RGB utilizada para identificar zonas con presencia de vegetación, cuerpos de agua y zonas alteradas. b) Combinación RGB utilizada para identificar zonas con presencia de vegetación, cuerpos de agua y zonas alteradas. c) Combinación RGB utilizada para identificar zonas con presencia de vegetación, cuerpos de agua y zonas alteradas. Elaboración propia.

5.2 Caracterización de las propiedades espectrales de las unidades geológicas presentes en el área.

La caracterización de las propiedades espectrales de las unidades geológicas constituyó una herramienta fundamental para diferenciar litologías y reconocer patrones asociados a procesos geológicos. Cada tipo de roca o alteración en el área presentaba firmas espectrales distintivas, que permitieron su identificación y delimitación en contraste con las unidades geológicas presentes en la zona de estudio.

A partir de la BR aplicada a la imagen ASTER, orientada a resaltar zonas de alteración portadora de iones OH, se delimitó el área de interés para la extracción de la firma espectral. Este procedimiento permitió identificar las respuestas espectrales más representativas de la reflectancia de los minerales hidratados presentes en el área de estudio. En cuanto a la firma espectral obtenida (Figura 5.28a), se observaron incrementos de la reflectancia en los $\sim 0,6 \mu\text{m}$, $\sim 1,65 \mu\text{m}$ y $\sim 2,3 \mu\text{m}$, así como absorciones características en los $\sim 0,8 \mu\text{m}$ y $\sim 2,2 \mu\text{m}$. Esta firma espectral fue extraída en el sector delimitado como Formación Cerrillos (Kc1) según Matthews *et al.* (2006).

A partir de la BR aplicada a la imagen ASTER, orientada a resaltar zonas con presencia de óxido férrico, se delimitó el área de interés para la extracción de la firma espectral. Este procedimiento permitió identificar la respuesta espectral más representativa de la reflectancia presente en el área de estudio. En cuanto a la firma espectral obtenida (Figura 5.28b), se observaron máximos de reflectancia en los $\sim 0,6 \mu\text{m}$, $\sim 1,6 \mu\text{m}$ y $\sim 2,3 \mu\text{m}$, así como absorciones características en los $\sim 0,8 \mu\text{m}$ y $\sim 2,2 \mu\text{m}$. Esta firma espectral fue extraída en el sector delimitado como Formación Cerrillos (Kc1) según Matthews *et al.* (2006).

Mediante la aplicación de la BR aplicada a la imagen ASTER, orientada a resaltar zonas con presencia de óxidos, se delimitó el área de interés para la extracción de la firma espectral. Este procedimiento permitió identificar la respuesta espectral más representativa de la reflectancia presente en el área de estudio. En cuanto a la firma espectral obtenida (Figura 5.28c), se observaron máximos de reflectancia en los $\sim 0,6 \mu\text{m}$, $\sim 1,65 \mu\text{m}$ y $\sim 2,3 \mu\text{m}$, así como absorciones características en los $\sim 0,8 \mu\text{m}$ y en el rango de $\sim 2,1-2,2 \mu\text{m}$. Esta firma espectral fue extraída en el sector delimitado como Formación Cerrillos (Kc2), registrada en la carta geológica según Matthews *et al.* (2006).

Utilizando la BR aplicada a la imagen ASTER, orientada a resaltar zonas con presencia de alteración propilítica, se delimitó el área de interés para la extracción de la firma espectral. Este procedimiento permitió identificar la respuesta espectral más representativa para esta alteración en el área de estudio. En cuanto a la firma espectral obtenida (Figura 5.28d), se observaron máximos de reflectancia en los $\sim 0,6 \mu\text{m}$ y $\sim 2,2 \mu\text{m}$, así como absorciones características en los $\sim 2,3 \mu\text{m}$. Esta firma espectral fue extraída en el sector delimitado como Formación Cerrillos (Kc1), registrada en la carta geológica según Matthews *et al.* (2006).

Mediante la aplicación de la BR aplicada a la imagen ASTER, orientada a resaltar zonas con presencia de alteración filica, se delimitó el área de interés para la extracción de la firma espectral. Este procedimiento permitió identificar la respuesta espectral de la reflectancia y absorción presente en el área. En cuanto a la firma espectral obtenida (Figura 5.28e), se observaron máximos de reflectancia en los $\sim 0,8 \mu\text{m}$, $\sim 2,1 \mu\text{m}$ y $\sim 2,4 \mu\text{m}$, mientras que las absorciones características se encontraron en los $\sim 0,6 \mu\text{m}$, $\sim 1,6$ y los $\sim 2,2 \mu\text{m}$. Esta firma espectral fue extraída en el sector delimitado como Formación Cerrillos (Kc1), registrada en la carta geológica según Matthews *et al.* (2006).

Utilizando la BR aplicada a la imagen ASTER, orientada a resaltar zonas con presencia de alteración argílica avanzada, se delimitó el área de interés para la extracción de la firma espectral. Este procedimiento permitió identificar la respuesta espectral de la reflectancia y absorción presente en el área. En cuanto a la firma espectral obtenida (Figura 5.28f), se observaron máximos de reflectancia en los $\sim 0,6 \mu\text{m}$, $\sim 1,6 \mu\text{m}$ y $\sim 2,2 \mu\text{m}$, mientras que las absorciones características se ubicaron en los $\sim 0,8 \mu\text{m}$, $\sim 1,8$ y los $\sim 2,25 \mu\text{m}$. Esta firma espectral fue extraída en el sector delimitado como intrusivo Ksg, registrado en la carta geológica según Matthews *et al.* (2006).

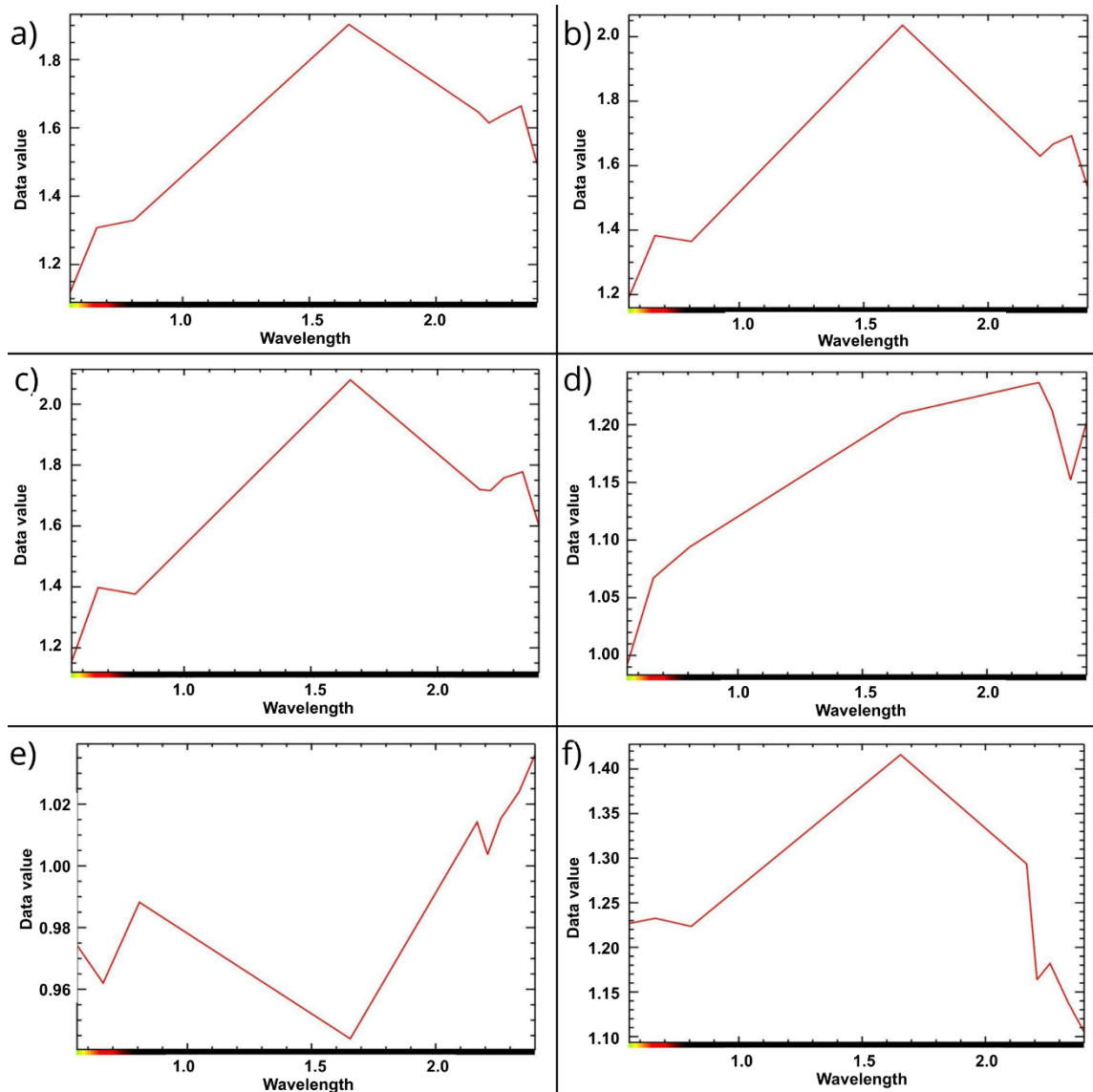


Figura 5.28. a) Firma espectral extraída de la BR de zonas con presencia de alteración portadora de iones OH. b) Firma espectral extraída de la BR de zonas con presencia de óxido férrico. c) Firma espectral extraída de la BR de zonas con presencia de óxidos. d) Firma espectral extraída de la BR de zonas con presencia de alteración propilítica. e) Firma espectral extraída de la BR de zonas con presencia de alteración filica. f) Firma espectral extraída de la BR de zonas con presencia de alteración argílica avanzada. Firmas espectrales extraídas de ENVI 6.1.

A través de la aplicación de la BR aplicada a la imagen ASTER, orientada a resaltar silicatos ferrosos, se delimitó el área de interés para la extracción de la firma espectral. Este procedimiento permitió identificar la respuesta espectral de la reflectancia y absorción presente en el área. En cuanto a la firma espectral obtenida (Figura 5.29a), se

observaron máximos de reflectancia en los $\sim 2,20 \mu\text{m}$ y $\sim 2,3 \mu\text{m}$, mientras que las absorciones características se encuentran en el rango $\sim 0,6-0,8 \mu\text{m}$ y en $\sim 2,26 \mu\text{m}$. Esta firma espectral fue extraída del sector delimitado como Grupo Chañarcillo (Kch2), en las aureolas metasomáticas registradas según Matthews *et al.* (2006) en la carta geológica.

La aplicación de la BR aplicada a la imagen ASTER, orientada a resaltar óxido ferroso, permitió delimitar un área de interés para la extracción de la firma espectral. Este procedimiento resultó en la respuesta espectral de la reflectancia y absorción presente en el área. En cuanto a la firma espectral obtenida (Figura 5.29b), se observaron máximos de reflectancia en los $\sim 2,2 \mu\text{m}$, mientras que las absorciones características se encuentran en el rango $\sim 0,6-0,8 \mu\text{m}$. Esta firma espectral fue extraída en el sector delimitado como Grupo Chañarcillo (Kch2), registrado en la carta geológica, según Matthews *et al.* (2006).

Con base a la aplicación de la BR aplicada a la imagen del sensor ASTER, orientada a resaltar la presencia de sílice, se delimitó el área de interés. Este procedimiento identificó la respuesta espectral de la reflectancia y absorción presente en el área. En cuanto a la firma espectral obtenida (Figura 5.29c), se observaron máximos de reflectancia en el rango de los $\sim 2,1-2,2 \mu\text{m}$ y los $\sim 10,6 \mu\text{m}$, mientras que las absorciones características se encontraron en los $\sim 8,2 \mu\text{m}$. Esta firma espectral fue extraída en el sector delimitado como Grupo Chañarcillo (Kch2), registrado en la carta geológica, según Matthews *et al.* (2006).

A través de la aplicación de la BR aplicada a la imagen del sensor ASTER, orientada a resaltar la presencia de carbonato, se delimitó el área de interés, este procedimiento permitió identificar la respuesta espectral de la reflectancia y absorción presente en el área. En cuanto a la firma espectral obtenida (Figura 5.29d), se observaron máximos de reflectancia en el rango de los $\sim 2,2 \mu\text{m}$ y los $\sim 8,3 \mu\text{m}$, y absorciones características en los $\sim 8,2 \mu\text{m}$. Esta firma espectral fue extraída en el sector delimitado como Grupo Chañarcillo (Kch2), registrado en la carta geológica, según Matthews *et al.* (2006).

Con base a la aplicación de la BR aplicada a la imagen del sensor ASTER, orientada a resaltar la presencia de granate/piroxeno, se delimitó el área de interés, lo cual permitió identificar la respuesta de la reflectancia y absorción presente. En cuanto a la firma espectral obtenida (Figura 5.29e), se observaron máximos de reflectancia en el rango de los $\sim 2,1-2,3 \mu\text{m}$ y los $\sim 9,0 \mu\text{m}$, mientras que las absorciones características se encontraron

en los $\sim 8,2 \mu\text{m}$ y los $\sim 10,6 \mu\text{m}$. Esta firma espectral fue extraída en el sector delimitado como intrusivo Kpg(a), según la carta geológica de Matthews *et al.* (2006).

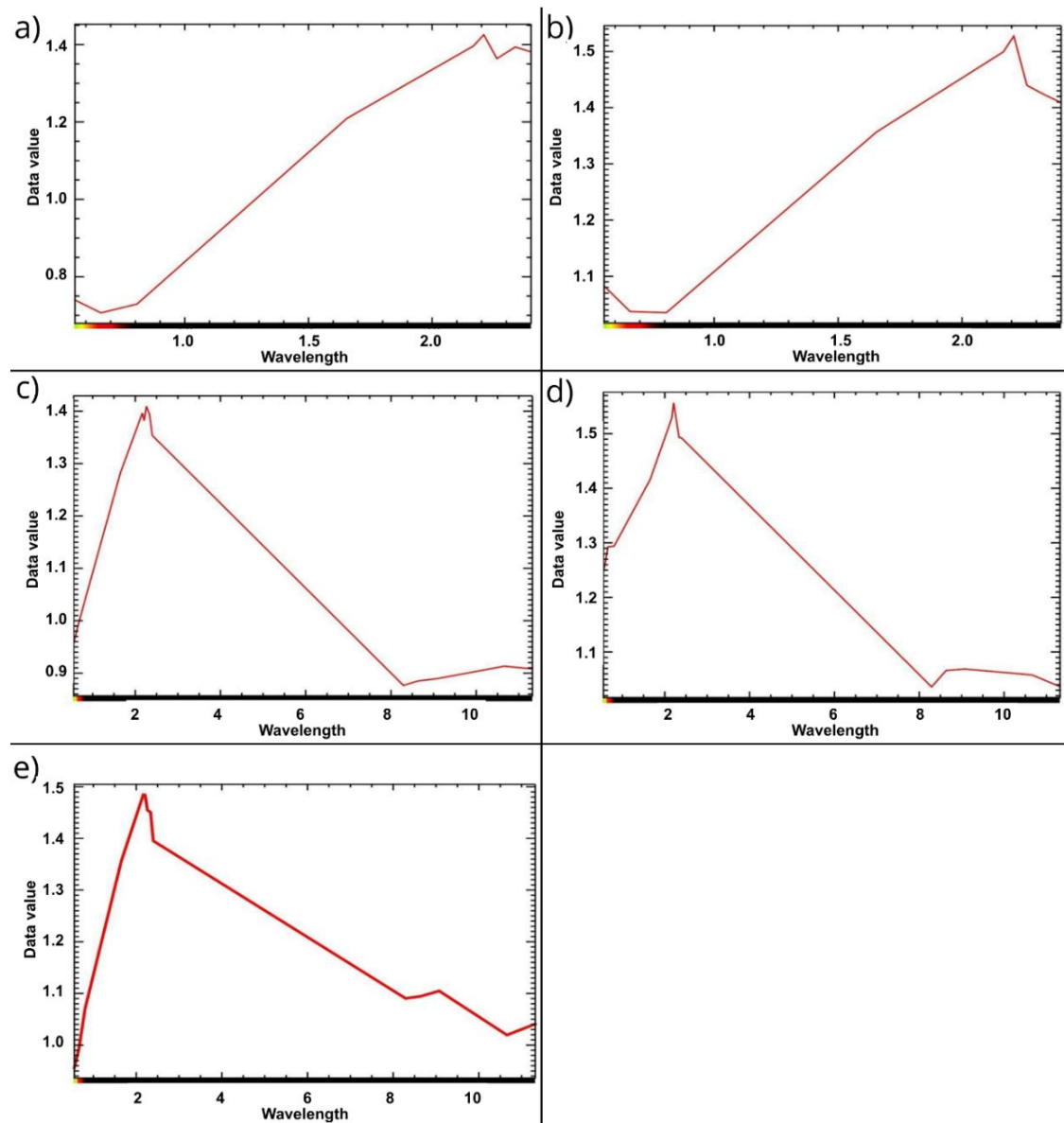


Figura 5.29. a) Firma espectral extraída de la BR de zonas con presencia de silicatos ferrosos. b) Firma espectral extraída de la BR de zonas con presencia de óxido ferroso. c) Firma espectral extraída de la BR de zonas con presencia de sílice. d) Firma espectral extraída de la BR de zonas con presencia de carbonato. e) Firma espectral extraída de la BR de zonas con presencia de granate/piroxeno. Firmas espectrales extraídas de ENVI 6.1.

5.3 Resultados de la verificación espectral y de campo.

Para la validación de las zonas de alteración hidrotermal identificadas a partir del procesamiento de las imágenes satelitales, se implementó una malla de muestreo para los minerales detectados por SAM, en coordenadas previamente definidas. Esta estrategia permitió cubrir de manera sistemática y eficiente, diferentes sectores, extrayendo un total de 72 muestras (Anexo 9.6), asegurando la representatividad de las muestras.

Posteriormente, las muestras fueron enviadas a análisis mediante espectroscopia de reflectancia (ASD TerraSpec), técnica empleada para registrar la firma espectral de los minerales presentes (Anexo 9.6).

En cuanto a las muestras correspondientes a andradita, grosularia, hedenbergita, dióxido, la validación se realizó de manera macroscópica y por medio de lupa binocular (Figura 5.30), debido a que la espectroscopía de reflectancia mediante ASD TerraSpec opera solamente en los rangos SWIR y VNIR, por lo que estos minerales al tratarse de silicatos anhidros cuya estructura cristalina no contenía el grupo de hidroxilos, no presentan absorciones diagnósticas en los rangos de ASD TerraSpec, ya que las firmas espectrales más representativas de estos minerales se encontraban en el rango TIR.

En términos generales, las observaciones realizadas a las muestras recolectadas mostraron un desarrollo predominante de textura granoblástica y porfidoblástica, con cristales intercrecidos de granates. En varios sectores, los cristales de cuarzo exhibieron puntos triples bien definidos, estos cristales eran de grano fino a medio con brillo vítreo y color blanco. En las zonas de alteración argílica avanzada se observó cuarzo cristalino, de grano fino con brillo sedoso y color blanco. Se encontraron además, muestras que se conforman por asociaciones de epidota, clorita, calcita y dolomita, las cuales reemplazaban fases primarias principalmente plagioclasas y piroxenos, además rellenaban fracturas en tonalitas y andesitas cloritizadas. La epidota en particular presentaba tonalidades verdosas y brillo vítreo, principalmente se encontraba alterando gran parte de las rocas.

En las zonas de alteración del skarn, se identificaron piroxenos del grupo dióxido y hedenbergita con textura de grano medio a grueso, hábito prismático, con cristales subhedrales a euhedral en ocasiones intercrecidos, con forma en sus cristales hipidiomorfa, color verde pálido a verde oscuro, brillo vítreo, fractura irregular y textura

granoblástica. Los granates del grupo grosularia y andradita exhibieron cristales subhedrales a euhedrales en ocasiones intercrecidos, con forma en sus cristales hipidiomorfa a idiomorfa, con textura porfidoblástica, se observaron tonalidades desde el pardo rojizo hasta verde amarillento, con un brillo vítreo y fractura concoidal.

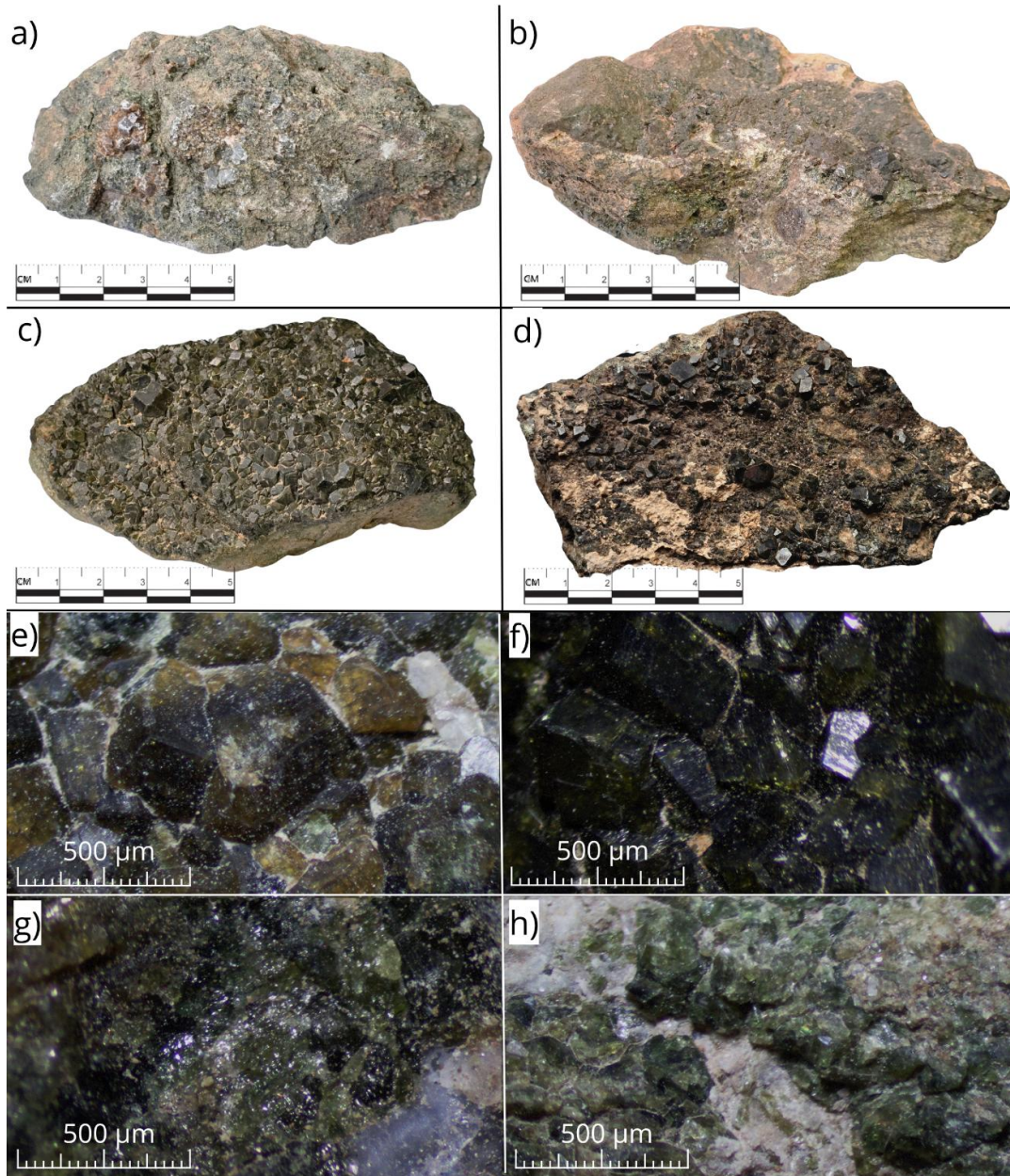


Figura 5.30. a) Muestra de mano asociada a la detección de hedenbergita por SAM. b) Muestra de mano asociada a la detección de diópsido por SAM. c) Muestra de mano asociada a la detección de andradita por SAM. d) Muestra de mano asociada a la detección de grosularia por SAM. e) Muestra en lupa binocular asociada a la detección de andradita por SAM. f) Muestra en lupa binocular asociada a la detección de grosularia por SAM. g) Muestra en lupa binocular

5.4 Validación de zonas de alteración hidrotermal detectadas mediante el procesamiento de imágenes satelitales

En base a la metodología aplicada para la validación de los resultados en zonas donde se presentó alteración, en la Tabla 5.1 se consignaron los resultados del plan de muestreo de distintos minerales objetivo, comparando las detecciones obtenidas con SAM y el análisis por medio del equipo ASD TerraSpec. En general, los datos indicaron una baja coincidencia entre las muestras planificadas y las registradas por el instrumento. El resto de los minerales no registró detecciones en TerraSpec, a pesar de que varios presentaron valores elevados en las detecciones totales con el método SAM para las 72 muestras planificadas. En conjunto, la tabla mostró una baja asertividad en minerales calcosilicatados, debido a que su firma espectral no era detectable mediante el equipo. Sin embargo, en las zonas donde se detectó minerales calcosilicatados mediante SAM, fueron revisados en terreno, donde se registraron resultados positivos en la detección de estos.

Tabla 5.1. Detecciones obtenidas con SAM de las 72 muestras recolectadas y las detecciones mediante TerraSpec. Se mostró aciertos por mineral y el porcentaje de asertividad asociado a cada uno. Elaboración propia.

Mineral	Detecciones SAM en las muestras planificadas	Cantidad de aciertos por mineral	% de asertividad	Detecciones totales con TerraSpec
Actinolita	0 muestras	0	0%	1
Albita	0 muestras	0	0%	0
Alunita	11 muestras	0	0%	1
Andradita	36 muestras	0	0%	0
Biotita	28 muestras	0	0%	0
Calcita	30 muestras	15	50%	26
Caolinita	7 muestras	0	0%	1
Clorita	3 muestras	0	0%	25
Diaspora	11 muestras	0	0%	0
Dickita	8 muestras	0	0%	0

Mineral	Detecciones SAM en las muestras planificadas	Cantidad de aciertos por mineral	% de asertividad	Detecciones totales con TerraSpec
Diópsido	19 muestras	0	0%	0
Dolomita	8 muestras	0	0%	0
Epidota	30 muestras	0	0%	0
Goethita	2 muestras	1	50%	6
Grosularia	31 muestras	0	0%	0
Hedenbergita	22 muestras	0	0%	0
Hematita	7 muestras	0	0%	1
Hornblenda	11 muestras	0	0%	0
Illita	9 muestras	2	22%	15
Jarosita	0 muestras	0	0%	0
Limonita	1 muestra	0	0%	0
Magnetita	0 muestras	0	0%	0
Pirofilita	11 muestras	0	0%	0
Sericita	6 muestras	0	0%	0
Sílice	27 muestras	6	22%	11
Tremolita	7 muestras	0	0%	0
Turmalina	0 muestras	0	0%	1
Vesuvianita	11 muestras	0	0%	0
Wollastonita	27 muestras	0	0%	0

En la Tabla 5.2 se registraron las asociaciones minerales coexistentes detectadas por SAM. Se observó que algunos minerales mostraron múltiples asociaciones, mientras que por el contrario, ciertos minerales no presentaron solapamientos en los puntos de recolección. Todas las muestras exhibieron algún grado de alteración hidrotermal y manifestaron ensamblajes paragenéticos equivalentes, es por ello que en ningún caso, se identificaron muestras sin valor interpretativo.

Tabla 5.2. Relación de minerales objetivos con sus asociaciones minerales coexistentes detectadas por medio de SAM. Elaboración propia.

Mineral para muestreo	Asociaciones minerales coexistentes detectadas por SAM
Actinolita	-
Albita	-
Alunita	-
Andradita	-
Biotita	Andradita + Calcita + Epidota + Grosularia + Sílice + Wollastonita
Calcita	Andradita + Grosularia + Wollastonita
Caolinita	Dickita + Diaspora + Pirofilita
Clorita	Andradita + Biotita + Calcita + Epidota + Goethita + Grosularia + Wollastonita
Diaspora	Pirofilita
Dickita	Caolinita + Diaspora + Pirofilita + Alunita
Diópsido	Piroxeno + Andradita + Calcita
Dolomita	-
Epidota	Hedenbergita + Wollastonita + Biotita + Andradita + Calcita
Goethita	Andradita + Biotita + Calcita + Clorita + Epidota + Grosularia + Wollastonita
Grosularia	Epidota + Andradita
Hedenbergita	Diópsido + Wollastonita + Biotita + Grosularia + Epidota + Andradita + Calcita + Sílice
Hematita	Andradita + Biotita + Calcita + Diópsido + Epidota + Grosularia + Hedenbergita + Sílice + Wollastonita
Hornblenda	Vesuvianita
Illita	-
Jarosita	-
Limonita	-
Magnetita	-

Mineral para muestreo	Asociaciones minerales coexistentes detectadas por SAM
Pirofilita	-
Sericita	-
Sílice	Calcita + Andradita
Tremolita	Vesuvianita + Hornblenda
Turmalina	-
Vesuvianita	Hornblenda
Wollastonita	Biotita

CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN

A partir del procesamiento de imágenes realizado de los satélites ASTER, Landsat 8 y Sentinel-2, complementado con la validación mediante análisis de campo y espectroscopia de reflectancia (ASD TerraSpec), se discuten en este capítulo los resultados obtenidos, para establecer el grado de alcance de los objetivos planteados.

6.1. Comparación de resultados entre satélites

En la comparación entre satélites, se consideran principalmente la resolución espacial y la capacidad espectral de cada sensor, parámetros que condicionan los resultados obtenidos, pues muestran diferencias significativas en la resolución para detectar y discriminar zonas con presencia de alteración hidrotermal.

El sensor ASTER evidencia una mayor eficacia en la detección de carbonatos y filosilicatos debido a su cobertura espectral en el rango SWIR y TIR, aspecto clave en ambientes áridos como en el área de estudio (Abrams *et al.*, 2002; Van der Meer, 2012; Ninomiya *et al.*, 2005). En este estudio, ASTER permite identificar con claridad zonas ricas en sílice y carbonatos, comportamiento similar al reportado por Ninomiya *et al.* (2005) en ambientes carbonatados. Además, por medio de la aplicación de la técnica SAM (NV5 Geospatial Solutions, s. f.), se diferencian minerales específicos, lo que favorece una caracterización más precisa de la alteración hidrotermal, incluyendo silicatos, carbonatos e incluso minerales menos frecuentes como los granates. Sin embargo, Abrams *et al.* (2008) señala que el subsistema SWIR de ASTER deja de funcionar correctamente desde abril de 2008, debido a un aumento anómalo en la temperatura, lo que genera saturación y efectos de *striping* en las imágenes posteriores a esa fecha, esto representa una limitancia, ya que, restringe el uso de imágenes actuales que muestran condiciones o áreas expuestas por laboreos mineros, creación de caminos o desgaste de la superficie.

En contraste, Landsat 8, a pesar de su reciente adquisición y adecuada cobertura espectral en el rango VNIR y SWIR, presenta limitaciones en la discriminación de cuerpos menores debido a su resolución espacial de 30 m, aunque resulta útil para reconocer patrones regionales de alteración (Roy *et al.*, 2014).

El sensor Sentinel-2 se destaca por su resolución espacial de 10 m en el rango VNIR y 20 m en el rango SWIR, lo que permite observar mayores detalles que Landsat. Asimismo, su alta frecuencia de adquisición de imágenes facilita la actualización de los análisis (Drusch *et al.*, 2012). Sin embargo, la ausencia de cobertura en el rango TIR en contraste con ASTER, limita la discriminación de minerales específicos como granate y piroxeno. Además, su resolución espectral limitada en el SWIR es más limitada, al disponer de un menor número de bandas en comparación a ASTER, lo que reduce su capacidad para identificar minerales como las arcillas. No obstante, demuestra ser particularmente eficaz en la identificación de zonas ricas en óxidos de hierro, en concordancia con lo descrito por Martínez, (2020).

En conjunto, se sugiere que la integración de los tres sensores permite obtener una visión multiescala, donde ASTER aporta una precisión mineralógica frente a los otros satélites, Landsat 8 entrega una cobertura regional, y Sentinel-2 ofrece un mayor detalle espacial y temporal. Todo esto coincide con lo descrito por Carranza y Hale, (2002), quienes destacan que la combinación de sensores multiespectrales es clave para optimizar la exploración minera en terrenos extensos.

6.2. Identificación de mineralogía de alteración presente en el sector de estudio.

La identificación de illita y alunita, es consistente por lo descrito por Rowan y Mars, (2003), quienes destacan estas fases como indicadoras de condiciones ácidas y de sistemas hidrotermales activos, interpretadas como zonas de alteración argílica avanzada. Esto sugiere que parte del sistema estudiado estuvo controlado por fluidos de alta acidez, capaces de generar reemplazos minerales extensos.

De manera complementaria, la detección de clorita y epidota concuerda con zonas de alteración propilítica en el modelo de zonación hidrotermal propuesto por Moradpour *et al.* (2020) y Meinert *et al.* (2005). Según dichos modelos, la presencia de minerales ferromagnesianos se asocia a etapas retrógradas en sistemas metasomáticos, en las cuales los minerales formados a alta temperatura son reemplazados por fases hidratadas.

En este contexto, la distribución espacial de estos minerales y sus halos de alteración sugiere la existencia de un sistema que se asemeja al propuesto por Meinert *et al.* (2005),

en sistemas skarn (Figura 6.1), el cual está posiblemente vinculado a intrusiones ígneas que afectaron a las unidades carbonatadas del área de estudio.

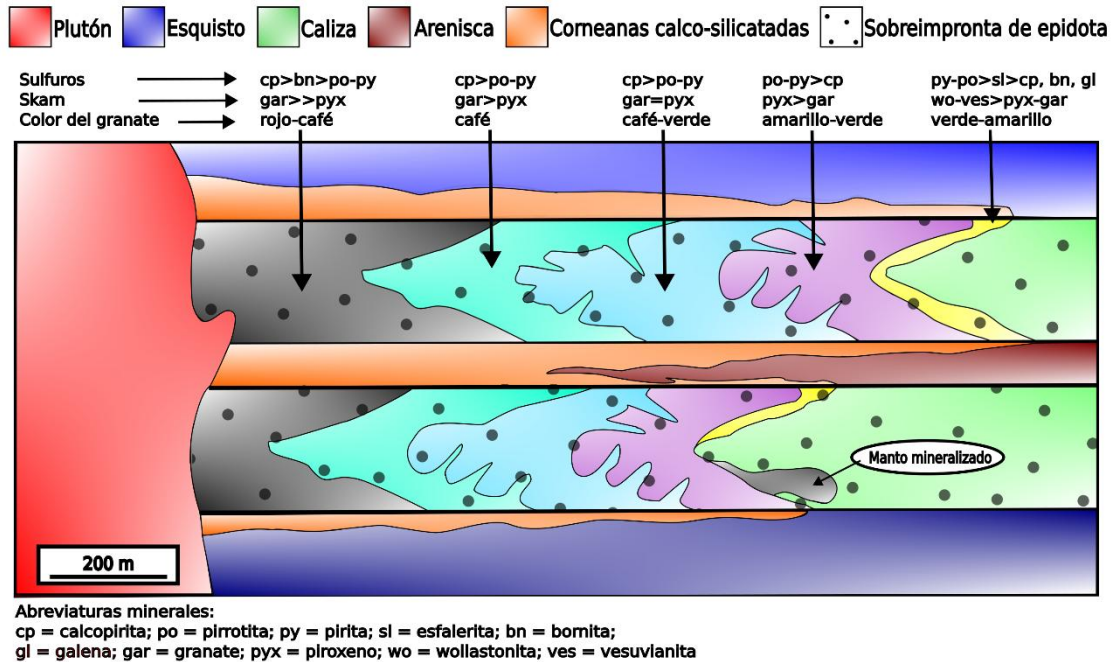


Figura 6.1. Sección esquemática de asociación mineralógica y halos de alteración en yacimientos tipo skarn. Modificado de Meinert *et al.* (2005).

Al comparar con la carta geológica de Matthews *et al.* (2006), se observa una coherencia espacial entre las aureolas metasomáticas descritas en Formación Cerrillos y minerales identificados mediante SAM (Figura 6.2). En particular, se reconocen superposiciones de fases retrógradas con epidota y carbonatos, lo que coincide con la zonación espacial esperada en sistemas de tipo skarn según Meinert *et al.* (2005).

Asimismo, la identificación de granate en proximidad a sectores mineralizados resulta consistente con lo descrito en la literatura (Meinert *et al.*, 2005; Seedorff *et al.*, 2005). La presencia conjunta de epidota, carbonatos y granate en el área de estudio refuerza la interpretación de un sistema metasomático complejo, en el que producto de la interacción fluido roca, ocurren fases de reemplazo y la formación de halos de alteración alrededor de los cuerpos intrusivos (Kostic *et al.*, 2024). De esta manera, los resultados no solo son coherentes con el marco geológico regional, sino que también validan la capacidad de las técnicas satelitales para detectar y discriminar minerales diagnósticos de alteración, aportando un complemento significativo a la cartografía geológica tradicional.

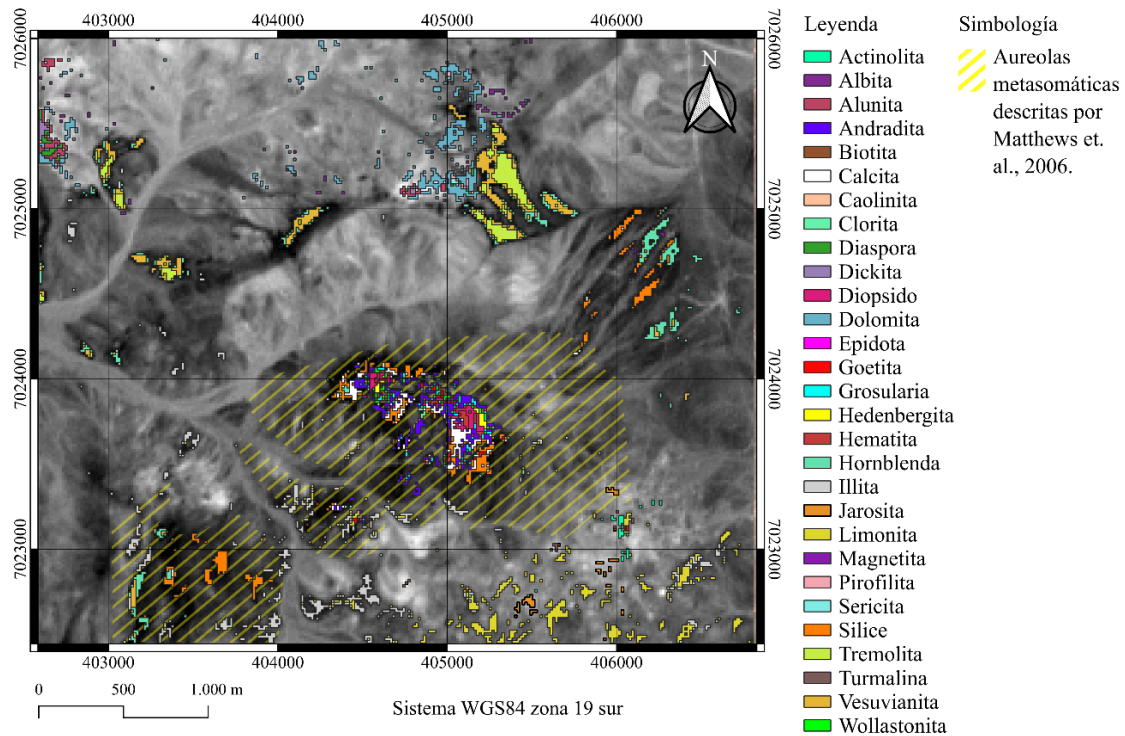


Figura 6.2. Comparación entre resultados obtenidos mediante SAM y las aureolas metasomáticas descritas por Matthews *et al.* (2006). Elaboración propia.

6.3. Caracterización de las propiedades espectrales en las unidades geológicas presentes en el área.

En el sector descrito según Matthews *et al.* (2006) como Grupo Chañarcillo (Kch2), las absorciones en el rango VNIR-SWIR, sugiere una posible correlación con litologías de carácter sedimentario, que de acuerdo a lo propuesto por Ninomiya *et al.* (2005) es un comportamiento que resulta consistente con calizas de la unidad y su documentación en ambientes carbonatados.

En Formación Cerrillos (Kc1 y Kc2) descrita por Matthews *et al.* (2006), presenta variaciones espectrales que según Becker *et al.* (2025) podrían asociarse a la presencia de silicatos ferromagnesianos, tales como piroxenos o anfíboles, lo cual es coherente con su origen volcánico intermedio. En conjunto, estos contrastes espectrales permiten establecer evidencia clara y útil para diferenciar entre sectores sedimentarios y volcánicos en el área de estudio.

La unidad descrita por Matthews *et al.* (2006) como intrusivos Kpg(a) presentaron firmas espectrales que pueden asociarse con granate y piroxeno, que según Meinert *et al.*

(2005), corresponden a minerales típicos de las fases progradadas de los depósitos skarn, por ende la detección de estas asociaciones resulta relevante, dado que pueden indicar la proximidad a los cuerpos intrusivos y constituyen un criterio útil en estudios de prospectividad (Einaudi *et al.*, 1981; Meinert *et al.*, 2005). De manera complementaria, la identificación de zonas más distales con epidota, clorita, entre otros, se relaciona con las fases retrógradadas de la zonación metasomática, lo cual es consistente con lo descrito por Seedorff *et al.* (2005). Este patrón es comparable a lo observado en Panulcillo, donde Sugaki *et al.* (2000) describe que el exoskarn presenta granate, dióxido y clorita, lo que sugiere condiciones fisicoquímicas similares. Esta progresión mineralógica permite interpretar que el distrito se encuentra controlado por un intrusivo mineralizante posiblemente asociado a la unidad Kpg(a).

El intrusivo Ksg descrito por Matthews *et al.* (2006), presenta una firma espectral primaria poco diagnóstica, característica de rocas ígneas intermedias a félsicas, dominadas por cuarzo y feldespatos. Sin embargo, el procesamiento espectral permite detectar minerales diagnósticos mediante el procesamiento espectral que considera resultados como prehnita, illita, clorita, montmorillonita, calcita, minerales propios de la fase retrógrada de la zonación descrita por Meinert *et al.* (2005) y por Einaudi *et al.* (1981) quienes destacan que los sistemas skarn evolucionan a través de un reemplazo metasomático fluido-roca que genera una secuencia de alteraciones en torno al intrusivo.

Un hallazgo importante de este estudio corresponde a la aplicación de BR y BM en la imagen Sentinel-2 orientada a resaltar óxidos de hierro ferroso, las cuales muestran anomalías espectrales coincidentes con las aureolas metasomáticas descritas en la carta geológica de Matthews *et al.* (2006), con lo detectado por SAM en ASTER y lo observado en terreno asociado a la presencia de granates y piroxenos. Esta coincidencia entre productos espectrales, la cartografía regional y análisis de campo, refuerza la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos. Sin embargo, es importante destacar que este resultado debe evaluarse con estudios más detallados, tales como análisis geoquímicos (XRF, ICP-MS) y mineralógicos (DRX, QEMSCAN), los cuales pueden confirmar la asociación de la respuesta espectral a los granates u otras fases minerales. Adicionalmente, la incorporación de imágenes hiperespectrales o espectroscopía de mayor resolución

permitiría mejorar la discriminación mineralógica y caracterización de aureolas metasomáticas al detalle.

No obstante, se reconocen limitaciones en la discriminación mineralógica. En varias áreas, las firmas espectrales de arcillas como caolinita, illita, alunita, entre otros muestran solapamientos, que generan ambigüedad en la interpretación. Esta dificultad ha sido señalada previamente por Van der Meer *et al.* (2012), quienes destacan que la resolución espectral de sensores restringe la separación precisa de fases mineralógicas similares. Además, en sectores cubiertos por depósitos coluviales y aluviales, además de solapamientos de las firmas espectrales, la señal se ve atenuada, generando detecciones falsas o incompletas por parte de SAM, lo que coincide con lo planteado por Carranza *et al.* (2008), quienes advierten que los depósitos superficiales pueden enmascarar la respuesta espectral de la roca subyacente y distorsionar la interpretación remota.

6.4. Interpretación de posible ocurrencia de zonas mineralizadas presentes en el sector de estudio

La interpretación de posible ocurrencia de zonas mineralizadas en el área de estudio se limita principalmente a las aureolas metasomáticas descritas en la carta geológica por Matthews *et al.* (2006), donde se localizan diversos laboreos mineros, como las minas Hilda y Cecilia. No obstante, estos laboreos son puntuales y de escala reducida, mientras que la extensión de la aureola identificada mediante el procesamiento de las imágenes satelitales es significativamente mayor, lo que sugiere la posible ocurrencia de otros cuerpos mineralizados o yacimientos aún no reconocidos en terreno. Asimismo, la distribución espacial de las alteraciones detectadas por SAM y su asociación con minerales indicadores como el granate, en conjunto a su coloración, indican una proximidad a un cuerpo intrusivo mineralizante, potencialmente asociado a la unidad Kpg(a) descrito en la cartografía regional. Esta relación es coherente con lo descrito por Meinert *et al.* (2005), donde en el modelo genético de depósitos tipo skarn los granates y piroxenos señalan zonas progradas alrededor de intrusivos. La capacidad del sensor ASTER para discriminar firmas espectrales en el rango SWIR y TIR permite identificar zonaciones del skarn mediante la combinación RGB de diversos minerales de interés

(Figura 6.3), lo cual resulta consistente con los modelos de zonación (Meinert *et al.*, 2005; Einaudi *et al.*, 1981).

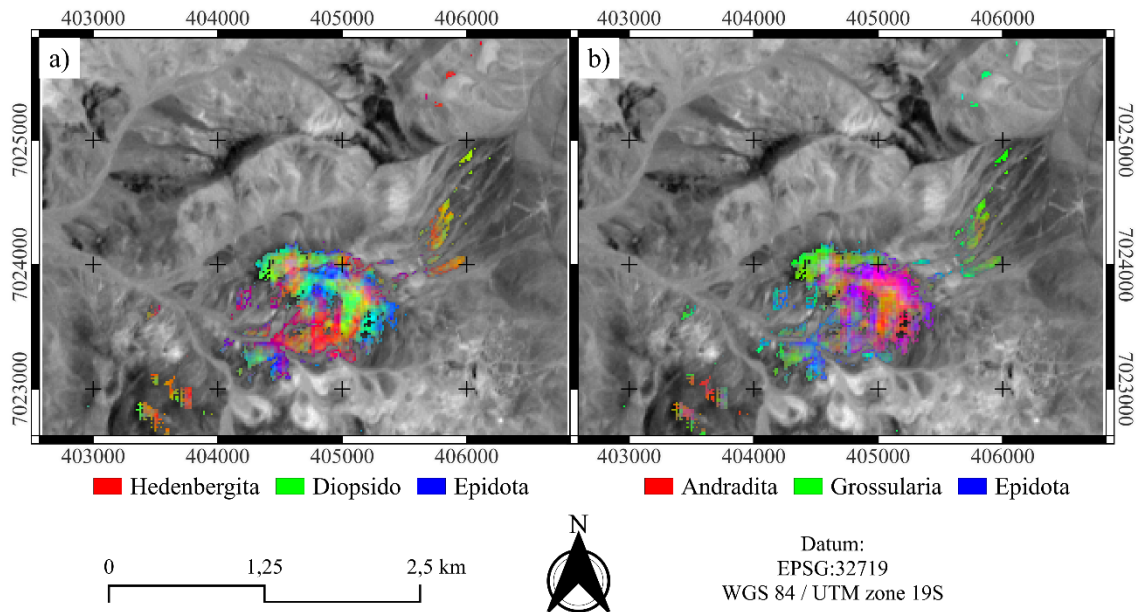


Figura 6.3. Combinaciones RGB de ensamblajes minerales característicos de yacimientos tipo skarn. a) Combinación RGB: en el canal rojo hedenbergita, en el canal verde diópsido y en el canal azul epidota. b) Combinación RGB: en el canal rojo andradita, en el canal verde grosularia y en el canal azul epidota. Elaboración propia.

Por otro lado, la combinación de productos satelitales facilita la delimitación visual de sectores prospectivos. En consecuencia, las zonas que presentan coincidencia entre las aureolas metasomáticas de la carta geológica (Matthews *et al.*, 2006), concentraciones de granate/piroxeno detectadas por SAM y presencia de alteración hidrotermal intensa en cuanto a ensamblajes típicos de skarn (Figura 6.4), se destacan como áreas con mayor probabilidad de mineralización, constituyendo una evidencia directa de la influencia de los intrusivos y la zonación metasomática sobre la mineralización de la zona. No obstante, es importante realizar estudios más detallados y en terreno, tales como análisis geoquímicos (XRF, ICP-MS) y mineralógicos (DRX, QEMSCAN), para verificar la asociación mineralógica detectada de manera satelital.

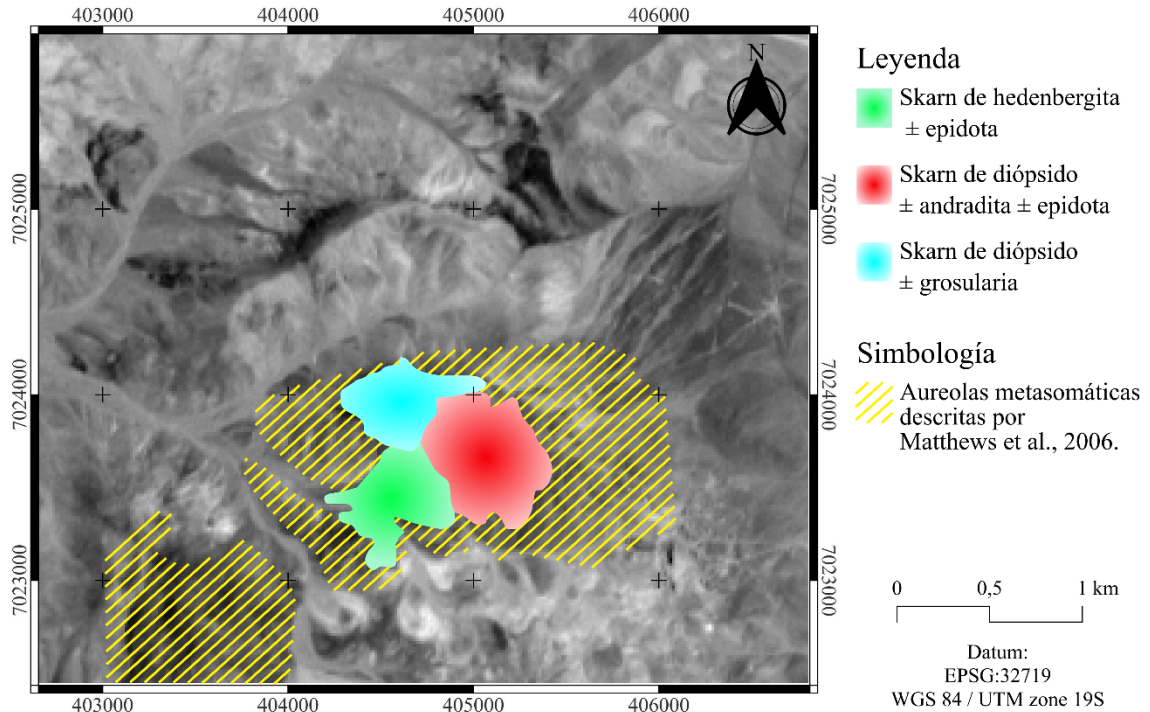


Figura 6.4. Zonación del skarn, en base a combinaciones RGB de ensamblajes mineralógicos característicos de estos yacimientos. Elaboración propia.

6.5. Validación de zonas de alteración hidrotermal detectadas mediante el procesamiento de imágenes satelitales

La validación en terreno se realizó mediante la recolección de 72 muestras, donde las muestras calcosilicatadas coincidieron espacialmente con la aureola metasomática descrita por Matthews *et al.* (2006), lo que constituyó una primera validación de las zonas previamente delimitadas por medio de la aplicación de SAM. Las observaciones macroscópicas de las rocas evidenciaron texturas granoblásticas y porfidoblásticas, características de rocas afectadas por metamorfismo de contacto, vinculado a la intrusión de cuerpos ígneos en secuencias carbonatadas. Desde el punto de vista mineralógico, las propiedades observadas como brillo, hábito cristalino, color, entre otros, coincidieron con las descritas para calcosilicatos en yacimientos skarn (Meinert *et al.*, 2005; Huang *et al.*, 2021). Estas características se identificaron de manera visual macroscópicamente y por medio de lupa binocular.

El análisis realizado con ASD TerraSpec, permite evaluar el grado de confiabilidad de las detecciones obtenidas mediante SAM. La Tabla 6.1 muestra una coherencia observada

entre los BR/BM y las firmas espectrales registradas en laboratorio lo cual sugiere que el procesamiento satelital logra capturar adecuadamente los minerales y ensamblajes de alteración más representativos de área. Esta correspondencia es particularmente relevante porque los ensamblajes detectados coinciden con los definidos por Corbett y Leach, (1998), lo que indica que las zonas identificadas corresponden a patrones mineralógicos consistentes con modelos de alteración hidrotermal.

Asimismo, la identificación de asociaciones propias de skarn progrado y retrogrado respalda la utilidad del método en contextos donde convergen procesos de alta y baja temperatura. Esto plantea que, pese a las limitaciones del análisis espectral como la resolución o la capa sedimentaria, la metodología aplicada proporciona una base sólida para reconocer zonaciones complejas.

Tabla 6.1. Tabla de comparación entre firmas espectrales de alteraciones de interés y minerales detectados mediante ASD TerraSpec. Elaboración propia.

Alteración	Mineral detectado por TerraSpec	N° muestras detectadas por TerraSpec	Muestras detectadas por BR/BM	% asertividad
Alteración argílica (Sentinel-2)	Illita + Montmorillonita	24	10	42%
Carbonato (ASTER)	Carbonato	12	12	100%
Alteración propilítica (Sentinel-2)	CloritaMg + CloritaFe + CloritaFeMg + Calcita	28	28	100%
Alteración Filica (Landsat 8)	-	-	-	-
Granate/ Piroxeno (ASTER)	-	-	-	-

Alteración	Mineral detectado por TerraSpec	N° muestras detectadas por TerraSpec	Muestras detectadas por BR/BM	% asertividad
Alteración portadora de iones OH (ASTER)	Montmorillonita + Nontronita y/o Illita + Montmorillonita	46	10	21%
Óxido férrico (Sentinel-2)	Goethita + Hematita	6	6	100%
Óxido ferroso (Landsat 8)	-	-	-	-
Óxidos (Sentinel-2)	Goethita	2	2	100%
Silicatos ferrosos (Landsat 8)	TurmalinaFe + CloritaMg + CloritaMgFe + CloritaFe	22	3	13%
Sílice (ASTER)	Sílice	10	10	100%
Skarn progrado (ASTER)	-	-	-	-
Skarn retrogrado (ASTER)	Flogopita + TurmalinaFe + Prehnita	7	0	0%

Los ensamblajes mineralógicos resultantes permiten identificar asociaciones coherentes con una zonación hidrotermal típica de sistemas metasomáticos tipo skarn, representadas por las fases retrogradadas y progradadas. Esta clasificación encuentra sustento tanto en las observaciones como en los modelos hidrotermales descritos por Meinert *et al.* (2005), Zhang *et al.* (2020), Nozkaya *et al.* (2019) y Garofalo *et al.* (2023), quienes

documentan una similitud en distintos ambientes de mineralización controlados la temperatura y composición de fluidos magmáticos-hidrotermales.

La presencia de illita, muscovita, cuarzo y pirita, corresponden a minerales formados bajo condiciones ácidas a neutras y temperaturas intermedias a altas (250-400 °C). De acuerdo con Zhang *et al.* (2020), las micas blancas exhiben absorciones en torno a 2.200 nm, reflejando una sustitución variable de Fe-Mg en su estructura. Del mismo modo, Nozkaya *et al.* (2019) y Garofalo *et al.* (2023) reportan que la asociación illita-sericita-cuarzo constituye un indicador de zonas proximales al intrusivo, donde los fluidos magmáticos poseen alto contenido de K⁺, provocando seritización y silicificación intensa. En el área de estudio, la identificación de estas fases mediante BR, BM, combinaciones RGB y SAM, respaldan la presencia de estos minerales asociados a una fase retrograda vinculada a la circulación de fluidos calientes y ácidos a lo largo de fracturas o en el contacto del intrusivo con la roca de caja.

En el caso de la illita, se ha detectado en quince muestras extraídas del sector N y NO. Este mineral se ha reportado en yacimientos tipo skarn, donde se forma por la interacción de fluidos hidrotermales magmáticos ricos en K y de pH ácido con las rocas del skarn durante etapas metasomáticas de temperatura intermedia a alta, reemplazando feldespatos y otros silicatos en zonas afectadas por alteración filica (Zhang *et al.*, 2020). Según Moreira de Mesquita *et al.* (2019) y Zhu *et al.* (2025), la illita se utiliza como herramienta de vectorización hacia el centro del sistema hidrotermal, ya que su grado de ordenamiento estructural aumenta con la temperatura y con la cercanía al aporte de fluidos magmáticos. Mediante espectroscopía SWIR, la illita presenta una absorción diagnóstica en torno a ~2200 nm, asociada al enlace Al–OH. La posición y profundidad de esta banda permiten calcular índices como el Illite Spectral Maturity (ISM), donde valores altos indican mayor temperatura y zonas próximas al núcleo mineralizado. Esto permite reconocer un gradiente desde illita pobremente ordenada en zonas frías o distales, hacia illita bien ordenada en sectores cercanos al frente intrusivo y a la mineralización asociada.

Nozkaya *et al.* (2019) sugiere que la ocurrencia de caolinita, alunita, dickita y montmorillonita, corresponde a zonas de lixiviación ácida generadas por fluidos hidrotermales ricos en SO₂ y H⁺ durante etapas de enfriamiento o mezcla con aguas meteóricas. Según Zhang *et al.* (2020), las kanditas y sulfatos muestran absorciones en

torno a los 2.170-2.200 nm, vinculadas a ambientes de pH bajo y temperaturas moderadas (<250 °C). Nozkaya *et al.* (2019) destacan que la coexistencia de alunita y caolinita es típica de procesos argílicos avanzados, donde los fluidos ácidos remanentes reemplazan feldespatos y micas, generando halos secundarios sobre las zonas con presencia de illita y cuarzo. Garofalo *et al.* (2023) complementan esta interpretación señalando que estas fases representan una evolución tardía del sistema hidrotermal, en la cual los vapores magmáticos condensan y generan ambientes de oxidación superficial. En el estudio, la detección de alunita y caolinita confirma esta etapa de enfriamiento y acidificación, manifestada en sectores intermedios o superiores del sistema, posiblemente sobreimpuesta a la alteración de illita, muscovita y cuarzo.

Zhang *et al.* (2020), sugiere que la existencia de clorita, epidota, carbonato y actinolita marca la zona retrograda del skarn, ya que estos minerales se forman bajo condiciones neutras a ligeramente alcalinas y temperaturas menores (150-300 °C). Zhang *et al.* (2020) y Garofalo *et al.* (2023) describen la aparición de clorita y epidota en los bordes externos de los cuerpos intrusivos, donde los fluidos metasomáticos tardíos reemplazan la fase prograda por minerales hidratados, indicando una transición hacia etapas retrogradas. Por otro lado, Nozkaya *et al.* (2019) subrayan que estas fases presentan firmas espectrales características (2.250-2.350 nm) asociadas a enlaces Fe-OH y Mg-OH, diagnósticas de zonas distales. En el área de estudio, la detección de clorita, epidota y carbonato en sectores más externos concuerda con lo descrito por los autores respecto a los halos periféricos de yacimientos skarn calcosilicatados (Meinert *et al.*, 2005; Corbett y Leach, 1998). Asimismo, se documenta que la clorita en skarns se desarrolla durante la etapa retrógrada del sistema hidrotermal, cuando el cuerpo del skarn comienza a enfriarse y circulan fluidos más diluidos, reemplazando anfíboles, piroxenos o biotita formados en etapas de mayor temperatura. Esta alteración refleja condiciones de baja a intermedia temperatura, propias del cierre del sistema. De acuerdo con Moreira de Mesquita *et al.* (2019) y Zhu *et al.* (2025), la clorita se utiliza como herramienta de vectorización hacia zonas mineralizadas, ya que su composición (más rica en Mg o en Fe) registra la evolución del fluido: cloritas ricas en Mg se asocian a sectores más internos o vinculados a mineralizaciones de metales (e.g. Mo-W), mientras que cloritas ricas en Fe se ubican en zonas externas o de menor temperatura. En espectroscopía SWIR, la clorita presenta

absorciones características en el rango ~2250–2350 nm, donde la variación entre las bandas Mg–OH y Fe–OH permite distinguirla y construir zonaciones térmicas y metalogénicas. De esta forma, la clorita actúa como un vector que ayuda a delimitar zonas favorables para alojar mena dentro del skarn.

Es importante destacar la presencia de flogopita en una muestra recolectada del sector central en el área más externa de la detección de grosularia y andradita, dado que este mineral se asocia principalmente a paragénesis retrógrada en sistemas de skarn cálcico-magnesianos, donde aparece junto con magnetita, tremolita, actinolita, dióxido y granate. Según Feng *et al.* (2024), este mineral se forma bajo condiciones hidrotermales de temperatura intermedia a alta (aprox. 500–700 °C), en presencia de fluidos ricos en K y Mg que interactúan con rocas carbonatadas, reemplazando minerales preexistentes durante etapas tardías del metasomatismo; además, la flogopita presenta interés para dataciones radiométricas, permitiendo establecer la edad absoluta de los eventos de alteración y metasomatismo dentro del sistema.

Por otro lado, en skarns, la prehnita, detectada en el presente estudio en cuatro muestras recolectadas de los sectores más externos del N y S, Moreira de Mesquita *et al.* (2019), destaca que este mineral se forma durante la etapa retrógrada del sistema hidrotermal, cuando el cuerpo de skarn comienza a enfriarse y circulan fluidos tardíos más diluidos. En estas condiciones, el mineral reemplaza o rellena fracturas junto con epidota y otros silicatos tardíos a temperaturas aproximadas de 220–320 °C. Según Moreira de Mesquita *et al.* (2019), la prehnita se asocia directamente a la fase tardía de mineralización aurífera y posee una firma espectral diagnóstica con una absorción característica en los ~1478 nm en VNIR–SWIR, lo que permite identificarla mediante espectroscopía. A partir de esta respuesta espectral se define un índice de prehnita que resalta sectores enriquecidos en este mineral y presenta una correlación positiva con intervalos de mayor ley de oro. En consecuencia, la espectroscopía permite utilizar la prehnita como herramienta de vectorización mineral en skarns, facilitando la delimitación rápida de zonas potencialmente mineralizadas y optimizando la exploración.

También resulta relevante el hallazgo de turmalina en dos muestras extraídas del sector central en el área más externa de la detección de granate, según Yu *et al.* (2017) en contextos de skarn, la turmalina se forma por la interacción entre fluidos hidrotermales

magmáticos ricos en boro y las rocas hospedantes del sistema, especialmente aquellas con disponibilidad de Mg, Fe, Ca y Al. Estos fluidos, derivados de intrusiones ígneas, reaccionan con rocas carbonatadas, generando paragénesis típicas de alteración hidrotermal como turmalina + epidota + pirita, indicando temperaturas superiores a ~370 °C y un origen magmático-hidrotermal del fluido. Su composición registra la evolución del sistema, ya que la química de la turmalina refleja cambios en la salinidad, acidez y composición del fluido mineralizante, controlados tanto por el aporte de fluidos como por la interacción con la roca huésped. Esta capacidad de la turmalina para registrar la huella geoquímica del fluido asociado al pulso mineralizante la convierte en un mineral útil como indicador o trazador de yacimientos mineralizados en sistemas skarn, ya que su presencia y composición permiten identificar zonas vinculadas al evento de mineralización (Yu *et al.*, 2017).

Por otro lado, la presencia de nontronita, refuerza la interpretación de un ambiente hidrotermal oxidante (Deer *et al.*, 2013), mientras que la asociación de carbonatos con arcillas sugiere procesos de carbonatización, comúnmente vinculados a la circulación de fluidos metasomáticos ricos en CO₂ en contacto con intrusivos o rocas carbonatadas (Meinert, 1992). Asimismo, la detección de óxidos de hierro indica procesos de oxidación supérgena y un enriquecimiento secundario o meteorización del sistema tal como señala Shaw *et al.* (2021). Por otro lado, la detección de sílice se relaciona con la presencia de silicificación, considerada por Sillitoe, (2010) como un rasgo clave en depósitos skarn.

No obstante, se detectan algunos desajustes en zonas cubiertas por depósitos superficiales, donde SAM sugiere la presencia de ciertos minerales, pero en terreno solo se reconocen depósitos coluviales sin afloramientos representativos. Es probable que en estos casos la señal espectral se vea atenuada o distorsionada por la cobertura sedimentaria, lo cual coincide con lo descrito por Carranza *et al.* (2008), donde la cobertura superficial puede enmascarar la respuesta espectral de la roca subyacente.

6.5.1 Consideraciones de los métodos de clasificación mineralógica

Respecto al método SAM empleado en la imagen ASTER para la identificación de minerales objetivos, es común que diversos minerales coexistan en una misma área, lo cual puede generar confusión en la interpretación espectral. Este fenómeno ocurre cuando

diferentes minerales exhiben firmas espectrales o composiciones químicas similares o parcialmente coincidentes, lo que deriva en clasificaciones ambiguas o en detecciones múltiples dentro de un área de interés (Clark *et al.*, 2003; Van der Meer *et al.*, 2012).

La superposición de respuestas espectrales y la presencia de asociaciones polimineralógicas observadas en terreno sugieren la presencia de efectos de mezcla que atenúan o intensifican los rasgos espectrales diagnósticos. En el caso de algoritmos como SAM, estas mezclas no constituyen necesariamente una limitación, ya que, aun cuando el mineral objetivo no se identifique de manera directa, el método permite reconocer mineralogías que se forman bajo condiciones hidrotermales similares. Esto resulta especialmente útil para la exploración, pues contribuye a delinear zonas con minerales indicativos de alteración y potencial vectorización mineral (Kruse *et al.*, 1993).

Otro aspecto relevante por considerar es que el sensor ASTER, debido a su resolución espectral, trabaja con bandas relativamente anchas que abarcan rangos variables de longitudes de onda (Yamaguchi *et al.*, 1998). Esto permite deducir que la señal espectral registrada no corresponde a una longitud de onda puntual, sino al promedio de la reflectancia dentro de cada rango. Como consecuencia, se produce una dilución de los rasgos espectrales diagnósticos, particularmente en minerales que presentan bandas de absorción estrechas o sutilezas espectrales, como los filosilicatos y arcillas. Este efecto puede generar que firmas espectrales distintas se vean suavizadas, incrementando el riesgo de confundir minerales con respuestas espectrales semejantes, produciendo falsos positivos o, en algunos casos, impedir la detección de ciertos minerales (Abrams y Hook, 2002; Ninomiya, 2002; Rowan y Mars, 2003).

La interpretación de los resultados obtenidos mediante SAM con análisis mineralógicos complementarios resulta esencial para mejorar la precisión y confiabilidad del reconocimiento espectral. Diversos autores abordan esta problemática y proponen estrategias para su mitigación, tales como la aplicación de índices espectrales ajustados, el análisis de componentes principales (PCA) y la calibración de firmas espectrales de laboratorio (Clark *et al.*, 2003; Kruse, 1994; Van der Meer *et al.*, 2012).

En las asociaciones minerales coexistentes detectadas por SAM, se evidencia que algunos minerales muestran múltiples solapamientos mineralógicos, sin embargo, estos no representan únicamente una limitación, sino que también pueden aprovecharse como

una herramienta comparativa, mediante el análisis de las asociaciones recurrentes o coincidencias espectrales permite inferir la presencia directa de algún mineral de interés, facilitando su detección en zonas donde no se identifican de forma directa, y contribuyendo así a una interpretación más robusta y completa.

6.5.2 Limitaciones del análisis espectral con ASD TerraSpec

Si bien la espectroscopia de reflectancia permite validar satisfactoriamente los minerales hidratados o portadores de iones OH (Clark, 1999), el equipo presenta limitaciones para identificar minerales calcosilicatados típicos de yacimientos tipo skarn, como grosularia, vesuvianita, diópsido, wollastonita, entre otros, ya que, estos minerales poseen bandas de absorción débiles o poco definidas en el rango NIR y SWIR (350-2500 nm), lo que dificulta su detección (Clark, 1999; Hunt, 1977).

Además, otra de las limitancias se asocia a las bibliotecas espectrales estándar incluidas en los softwares de interpretación (TSG, Specmin, entre otros), las cuales presentan firmas teóricas de laboratorio que no siempre reproducen las condiciones reales de los minerales en superficie, ya que pueden verse alteradas por meteorización, mezcla mineral o variación granulométrica (Kokaly *et al.*, 2017; Van der Meer *et al.*, 2012).

No obstante, la recolección directa de muestras en terreno y la obtención de sus firmas espectrales reales constituyen un avance metodológico relevante, ya que permiten crear una biblioteca espectral local, adaptada a las condiciones mineralógicas y climáticas específicas del área de estudio. Estas firmas definen rangos precisos de reflectancia y absorción en longitudes de ondas características dentro del espectro NIR-SWIR, incrementando la precisión en la identificación mineralógica en futuros análisis espectrales en investigaciones similares.

6.5.3 Potenciales estudios futuros

Con el fin de fortalecer y complementar los resultados espectrales obtenidos, se recomienda la aplicación de técnicas analíticas complementarias que permitan profundizar en la caracterización geoquímica y mineralógica. El análisis geoquímico mediante fluorescencia de rayos X (XRF) o espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) que permiten determinar concentraciones de elementos mayores y traza, verificando la firma geoquímica asociada a las zonas de alteración e

identificando posibles anomalías metálicas vinculadas a la mineralización tipo skarn (Rollinson, 1993; Levinson, 1980). Por su parte, la difracción de rayos X (DRX) facilita una identificación cristalográfica precisa de las fases minerales, especialmente de los calcosilicatos y óxidos complejos poco distinguibles por espectroscopia de reflectancia (Moore y Reynolds, 1997). Finalmente, técnicas como QEMSCAM o MLA (Mineral Liberation Analyzer) permiten caracterizar la textura y paragénesis mineralógica en detalle, aportando información cuantitativa sobre las proporciones y asociaciones entre las fases detectadas (Pirrie y Rollinson, 2011). La integración de estas metodologías complementarias fortalece un enfoque espectral y una estrategia de exploración robusta, donde la teledetección actúa como herramienta de prospección inicial, validada posteriormente por análisis mineralógicos y geoquímicos.

Finalmente, en el presente estudio se obtienen diversas lecturas de espectroscopía de reflectancia en las muestras de superficie del skarn, constituyendo una base valiosa para futuros estudios orientados a la vectorización mineral. La interpretación preliminar de estos espectros permite reconocer minerales indicadores de la evolución hidrotermal, tales como illita, clorita, prehnita, turmalina y flogopita, cada uno asociado a etapas específicas del sistema. La illita, vinculada a alteración fílica y condiciones metasomáticas de mayor temperatura, se utiliza para vectorizar hacia zonas próximas al aporte de fluidos magmáticos mediante su absorción Al–OH cercana a ~2200 nm; la clorita, típica de la fase retrógrada, define gradientes térmicos y zonas potencialmente mineralizadas mediante variaciones Mg–OH/Fe–OH en el rango ~2250–2350 nm; y la prehnita, también retrógrada, marca el enfriamiento tardío del sistema. Por su parte, turmalina y flogopita, de origen metasomático, aportan información sobre el ingreso de fluidos magmáticos y los pulsos de alteración asociados. En conjunto, las lecturas espectrales obtenidas pueden reprocesarse y analizarse exhaustivamente para caracterizar con mayor detalle estas firmas minerales y, complementadas con muestreo y análisis mineralógico adicional mencionado anteriormente, permiten avanzar hacia un modelo de vectorización basado en minerales indicadores, mejorando la exploración y la comprensión de la zonación hidrotermal y metalogénica del skarn.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES

La investigación confirma la utilidad de la teledetección multiespectral como una herramienta para caracterizar mineralogía y zonaciones asociadas a sistemas tipo skarn en el distrito Chimberos-Tres Puntas. La integración de los sensores ASTER, Landsat 8 y Sentinel-2, se establece como una metodología aplicable en ambientes áridos y de alta exposición superficial, ofreciendo una base sólida para estudios exploratorios en contextos geológicos similares.

Con relación a los objetivos específicos, el análisis multiespectral permitió identificar la mineralogía de alteración presente en el sector de estudio, destacando minerales que conforman ensamblajes típicos de los depósitos tipo skarn. El caracterizar las propiedades espectrales de las unidades geológicas del área, confirmó una alta coherencia entre las respuestas espectrales y la litología, donde los minerales identificados se asocian consistentemente con las formaciones de la carta geológica de Matthews et al. (2006). La interpretación de una posible ocurrencia de zonas mineralizadas, permitió delimitar halos metasomáticos, donde el granate, epidota y carbonatos, junto con los laboreos mineros (Hilda y Cecilia), confirman un sistema skarn activo y con interés económico. Finalmente, para validar las zonas de alteración hidrotermal detectadas mediante el procesamiento de imágenes satelitales, ASD TerraSpec corroboró la presencia de ciertos minerales detectados mediante SAM, aunque con ligeras discrepancias atribuibles a diversos factores como la cobertura sedimentaria superficial que atenúa la respuesta espectral, el solapamiento de firmas espectrales de minerales de un mismo grupo, las restricciones de la resolución espectral de los sensores satelitales y la detección de minerales calcosilicatados producto de las bandas de absorción en el TIR.

Cada sensor aportó ventajas específicas, en cuanto a ASTER se destacó por su sensibilidad en el TIR, Landsat 8 por su cobertura regional y Sentinel-2 por su mayor resolución espacial. Su integración permitió obtener resultados consistentes y reproducibles, consolidándose como una metodología eficiente, aplicable a otros distritos mineros de condiciones geológicas y climáticas similares.

CAPÍTULO 8: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrams, M., y Hook, S. J. (1995). Simulated ASTER Data for Geologic Studies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(3), 692-699.
- Abrams, M., Rothery, D., y Machado, A. (1988). Mapping in the Semail ophiolite using enhanced Landsat Thematic Mapper images. *Tectonophysics*, 151(1-3), 387-401.
- Abrams, M., Hook, S. y Ramachandran, B. (2002). *ASTER User Handbook, Version 2*. Jet Propulsion Laboratory, 4800, 135.
- Abrams M, Hook S y Ramachandran B (2008). *ASTER user handbook: Version 2*, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, USA.
- Abrams, M., Bailey, B., Tsu, H., y Hato, M. (2010). The ASTER Global DEM. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 76(4), 344-348.
- Aguilera, F., Layana, S., Rodríguez-Díaz, A., González, C., Cortés, J., y Inostroza, M. (2016). Hydrothermal alteration, fumarolic deposits and fluids from Lastarria Volcanic Complex: A multidisciplinary study. *Andean Geology*, 43(2), 166-196.
- Alimi, S. A., y Carranza, E. J. M. (2025). Fusing satellite imagery and ground geochemical data to map alteration zones for gold exploration in western Nigeria. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 28, 77-88. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2025.01.001>
- Becker, N.A., Hubbard, B.E., Johnson, N.T., and Lederer, G.W., 2025, Visible and Near Infrared (VNIR) and Short Wavelength Infrared (SWIR) Spectra of Select Altered Mafic and Ultramafic Rock Samples from the Josephine Peridotite in CA and OR, the Yukon-Tanana region in Alaska, and from the Southern Appalachians in VA, NC, SC, and GA: U.S. Geological Survey data release, <https://doi.org/10.5066/P146B9KF>.
- Bierwirth, P. (2002). Evaluation of ASTER satellite data for geological applications (Consultancy Report to Geoscience Australia). Geological Survey of Denmark and Greenland.

- Brown, C., & Harder, C. (2016). *The ArcGIS Imagery Book: New View. New Vision.* Esri Press.
- Butler, K. (2013). Band combinations for Landsat 8. ArcGIS Blog.
- Campbell, J. B., y Wynne, R. H. (2011). *Introduction to remote sensing (5th ed.)*. Guilford Press.
- Camus, F. (2003). *Geología de los sistemas porfíricos en los Andes de Chile*. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Santiago.
- Carranza, E. J. M., y Hale, M. (2002). Spatial association of mineral occurrences and curvilinear geological features. *Mathematical Geology*, 34(2), 199–217.
- Carranza, E. J. M., Hale, M., y Ryan, C. (2008). Innovative methods for mineral prospectivity mapping: a case study from the Philippines. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 10(3), 374–387.
- Carvalho, M., Cardoso-Fernandes, J., González, F. J., y Teodoro, A. C. (2025). Comparative performance of Sentinel-2 and Landsat-9 data for raw materials' exploration onshore and in coastal areas. *Remote Sensing*, 17(2), 305. <https://doi.org/10.3390/rs17020305>
- Charrier, R., Pinto, L., y Rodríguez, M. P. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean orogen in northern Chile. In *The Geology of Chile* (Moreno, T., Gibbons, W., Eds.). Geological Society of London.
- Chuvieco, E. (1996), *Fundamentos de teledetección espacial*, 3ra. ed., Ediciones RIALP, Madrid, España.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de teledetección espacial*, 2da ed., Ediciones RIALP, Madrid, España.
- Chuvieco, E. (1990). *Fundamentos de teledetección espacial*, 1ra ed., Ediciones RIALP.
- Clark, R. N. (1999). Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. In A. N. Rencz (Ed.), *Remote sensing for the earth sciences: Manual of remote sensing (3rd ed., Vol. 3, pp. 3–58)*. John Wiley y Sons.
- Corbett, G. y Leach, T. 1998. Controls of hydrothermal alteration and mineralization. *Society of Economic Geologist, Special Publication 6*: 69-82.

- Cornejo, P., Riquelme R. y Mpodozis, M. (1997). Mapa geológico de la hoja Inca de Oro, región de Atacama, Escala 1.100.000.
- Crósta, A., de Souza Filho, C., Azevedo., y Brodie, C. (2003). Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 24(21), 4233–4240. <https://doi.org/10.1080/0143116031000152291>.
- Crowley, J.K., Brickey, D.W. y Rowan, L.C. (1989) Airborne Imaging Spectrometer Data of the Ruby Mountains. Montana: Mineral Discrimination Using Relative Absorption-Band-Depth Images. *Remote Sensing of Environment*, 29, 121-134.
- de Mesquita, N. M., Carrino, T. A., y Souza Neto, J. A. (2019). The use of reflectance spectroscopy and the prehnite spectral index to target gold mineralization at the Bonfim polymetallic skarn deposit, Seridó Mobile Belt, Borborema Province, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 115, 103192. <https://doi.org/10.1016/J.OREGEOREV.2019.103192>
- Deer, W. A.; Howie, R. A.; Zussman, J. (2013). *An Introduction to the Rock-Forming Minerals* (3rd ed.). London: Mineralogical Society of Great Britain y Ireland. 498 pp. ISBN 978-0-903056-33-5.
- Drury, S. (2001). *Image interpretation in geology* (3rd ed.). Routledge.
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., y Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA’s Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Einaudi, M., Meinert, L., y Newberry, R. (1981). Skarn Deposits. *Economic Geology Seventy-Fifth Anniversary Volume* (pp. 317–391). Society of Economic Geologists.
- El Janati, M. (2019). Application of remotely sensed ASTER data in detecting alteration hosting Cu, Ag and Au bearing mineralized zones in Taghdout area, Central Anti-Atlas of Morocco. *Journal of African Earth Sciences*, 151, 95–106.
- EOS Data Analytics. (2023). *Uso de la teledetección en la industria minera*.

- European Space Agency (ESA). (2015). Sentinel-2 user handbook (ESA Standard Document GMES-S2OP-EOPG-TN-13-0273, Issue 1, Rev. 2, July 2015). ESA Earth Observation Programmes.
- Exelis Visual Information Solutions. (2014). ENVI Classic Tutorial: Spectral Angle Mapper (SAM) and Spectral Information Divergence (SID) Classification.
- Feng, Q., Gao, M., Fu, C., Li, S., Li, Y., Gao, J., Ma, M., Wang, Z., Zhu, Y., Wu, B., Duan, Z., y Dang, Z. (2024). Phlogopite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology for Guodian Skarn Fe Deposit in Qihe–Yucheng District, Luxi Block, North China Craton: A Link between Craton Destruction and Fe Mineralization. *Minerals*, 14(7), 690. <https://doi.org/10.3390/min14070690>
- Garofalo, P. S., Agangi, A., Tropper, P., y Gieré, R. (2023). Hydrothermal alteration zoning and metasomatic processes in calc-silicate skarn systems: Insights from mineral chemistry and spectroscopy in the Ossola Valley, Italian Alps. *Ore Geology Reviews*, 157, 105458. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105458>
- Ge, W., Cheng, Q., Jing, L., Wang, F., Zhao, M., y Ding, H. (2020). Assessment of the capability of Sentinel-2 imagery for iron-bearing minerals mapping: A case study in the Cuprite area, Nevada. *Remote Sensing*, 12(18), 3028. <https://doi.org/10.3390/rs12183028>
- Hawu, A., Syafrizal y Khairo, D. (2021). Comparison of Landsat-8 and Sentinel-2 Imagery for Identifying Hydrothermal Alteration in a Vegetated Area.
- Hewson, R., Cudahy, T., Mizuhiko, S., Ueda, K., y Mauger, A. (2005). Seamless geological map generation using ASTER in the Broken Hill–Curnamona province of Australia. *Remote Sensing of Environment*, 99(1–2), 159–172.
- Huang, Y.-R., Guo, N., Tang, J.-X., Shi, W.-X., y Ran, F.-Q. (2020). Garnet characteristics associated with Jiama porphyry-skarn Cu deposit #1 skarn orebody, Tibet, using thermal infrared spectroscopy. *Minerals*, 11(1), 5.
- Humboldt State University. (2014). Natural and false color composites. GSP 216 – Online Learning Module. Recuperado el 3 de noviembre de 2025, de https://gsp.humboldt.edu/olm/Courses/GSP_216/lessons/composites.html
- Hunt, G. R. (1977). Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics*, 42(3), 501–513.

- Kokaly, RF, Clark, RN, Swayze, GA, Livo, KE, Hoefen, TM, Pearson, NC, Wise, RA, Benzel, WM, Lowers, HA, Driscoll, RL y Klein, AJ. (2017) Biblioteca Espectral USGS versión 7: Serie de datos del Servicio Geológico de EE. UU. 1035, 61 pág., <https://doi.org/10.3133/ds1035>.
- Kostić, B., Taneia, P., y Batoanin, N. (2024). Trace elements and garnet formation in a distal skarn zone: a case study of the Rudnik deposit, Central Serbia. *Geological Quarterly*, 68(3). <https://doi.org/10.7306/gq.1752>
- Kruse, F., Lefkoff, A., Boardman, J., Heidebrecht, K., Shapiro, A., Barloon, P., y Goetz, A. H. (1993). The Spectral Image Processing System (SIPS) — interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment*, 44(2–3), 145–163.
- Kumar, C., Chatterjee, S., y Oommen, T. (2019). Mapping hydrothermal alteration minerals using high-resolution AVIRIS-NG hyperspectral data in the Hutti-Maski gold deposit area, India. *International Journal of Remote Sensing*, 41(2), 794-812.
- Levinson, A. A. (1980). *Introduction to exploration geochemistry* (2nd ed.). Applied Publishing.
- Lillesand, T., Kiefer, R., y Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (7th ed.). Wiley.
- Lowell, J. D., y Guilbert, J. M. (1970). Lateral and vertical alteration–mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 65(4), 373–408.
- Maksaev, V., y Zentilli, M. (1999). Fission track thermochronology applied to porphyry copper deposits of northern Chile: Tectonic and metallogenic implications. *International Geology Review*, 41(4), 370–400.
- Maksaev, V., Townley, B., Palacios, C., y Reich, M. (2006). The El Morro Cu–Au deposit and the role of Early Cretaceous transtensional tectonics in the genesis of Andean porphyry copper systems. *Mineralium Deposita*, 41(6), 493–512.
- Marschik, R., y Fontboté, L. (2001). The Candelaria–Punta del Cobre iron oxide Cu–Au (IOCG) deposits, Chile. *Economic Geology*, 96(8), 1799–1826.
- Martínez, M. (2020). Aplicaciones del sensor Sentinel-2 en estudios geológicos. *Revista de Geociencias*, 12(3), 45–60.

- Martínez, S. (2020). Características de las diferentes misiones de SENTINEL. Cursos de Teledetección, Drones y LIDAR - Formación presencial y online en Drones, teledetección y LIDAR.
- Matthews, S., Ruiz, J., Titelman, J., y Mpodozis, C. (2006). Geología y metalogénesis de la Franja de Maricunga, Región de Atacama, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Boletín 104, 104, 1–120.
- Maza, S. N., Collo, G., Morata, D., Cuña-Rodríguez, C., Taussi, M., y Renzulli, A. (2021). The hydrothermal alteration of the Cordón de Inacaliri volcanic complex in the framework of the hidden geothermal systems within the Pabelloncito graben (Northern Chile). *Minerals*, 11(11), 1279.
- McQueen, K. (2005). Ore deposit types and their primary expressions. En C. R. M. Butt, I. D. M. Robertson, K. M. Scott y M. Cornelius (Eds.), *Regolith Expression of Australian Ore Systems* (vol. 1, pp. 1–14). CRC LEME.
- Meinert, L. D. (1992). Skarns and Skarn Deposits. *Geoscience Canada*, 19(4).
- Meinert, L.D., Dipple and Nicolescu, G.M. (2005). World Skarn Deposits. In: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J. and Richards, J.P., Eds., *Economic Geology 100th Anniversary Volume 1905-2005*, Elsevier Science B.V., Amsterdam, Volume 1905-2005, 299-336.
- Moore, D. M., y Reynolds, R. C. (1997). *X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Moradpour, H., Rostami Paydar, G., Pour, AB, Valizadeh, K., Feizizadeh, B., Muslim, AM, y Hossain, MS (2020). Landsat-7 and ASTER remote sensing satellite imagery for identification of iron skarn mineralization in metamorphic regions. *Geocarto International*, 37 (7), 1971–1998. <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1810327>
- NASA ARSET. (2023). Fundamentos de la teledetección (Percepción remota). NASA's Applied Remote Sensing Training Program.
- National Council of Educational Research and Training. (2006). *Practical work in geography (Part I)*. NCERT.
- Ninomiya, Y. (2002). Mapping quartz, carbonate minerals and mafic-ultramafic rocks using remotely sensed multispectral thermal infrared ASTER data. En

Thermosense XXIV: Thermal Sensing and Imaging Diagnostic Applications (Vol. 4710, pp. 191–202). SPIE.

- Ninomiya, Y. (2003). A stabilized vegetation index and several mineralogic indices defined for ASTER VNIR and SWIR data. In IGARSS 2003, 1552–1554
- Ninomiya, Y., Fu, B., y Cudahy, T. (2005). Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared “radiance-at-sensor” data. *Remote Sensing of Environment*, 99(1–2), 127–139.
- Nozkaya, F., Yalcin, T., y Saydam, C. (2019). Spectral characterization of hydrothermal alteration minerals in volcanic-hosted systems using ASTER data: Case study from Central Anatolia, Turkey. *Journal of African Earth Sciences*, 159, 103564. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103564>
- NV5 Geospatial Solutions, Inc. (s. f.). Hyperspectral analysis: SAM and SFF tutorial. Recuperado el 3 de noviembre de 2025, de https://www.nv5geospatialsoftware.com/docs/Whole-Pixel_Hyperspectral_Analysis_Tutorial.html
- Origel, G., y Sánchez-Cárdenas, E. (2010). Methodological guide for the detection of mineral alteration zones with ASTER images / Guía metodológica para la detección de áreas de alteración minera con imágenes ASTER. Ponencia en el XIV Simposio de la Sociedad Latinoamericana de Sensoriamento Remoto (SELPER International), Guanajuato.
- Ourhizif, Z., Algouti, A., y Hadach, F. (2019). Lithological mapping using Landsat 8 OLI and ASTER multispectral data in Imini-Ounilla district, South High Atlas of Marrakech. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing y Spatial Information Sciences*, XLII-2/W13, 1255–1262.
- Passchier, C. W., y Trouw, R. A. J. (2005). *Microtectonics* (2nd ed.). Springer.
- Pirajno, F. (2009). *Hydrothermal processes and mineral systems*. Springer Science y Business Media.
- Pirrie, D., y Rollinson, G. K. (2011). Unlocking the applications of automated mineral analysis. *Geology Today*, 27(6), 226–235.

- Pour, A. B. y Hashim, M. (2014). ASTER, ALI and Hyperion sensors data for lithological and hydrothermal alteration mapping: review and case studies. *Remote Sensing*, 6(2), 1181–1203.
- Pour, A. B., Park, T.-Y. S., Park, Y., Hong, J. K., Hashim, M., Hong, J., y Pradhan, B. (2019). Comparison of different algorithms to map hydrothermal alteration zones using ASTER remote sensing data for polymetallic vein-type ore exploration: Toroud–Chahshirin Magmatic Belt (TCMB), North Iran. *Remote Sensing*, 11(5), 495. <https://doi.org/10.3390/rs11050495>
- Rajendran, S., y Nasir, S. (2017). Characterization of ASTER spectral bands for mapping of alteration zones of Volcanogenic Massive Sulfide (VMS) deposits. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 6, 1–10.
- Rivera, O., y Navarro, J. (2002). Metalogenia del cinturón estratoligado jurásico de la Región de Atacama, Chile. *Boletín de la Sociedad Geológica de Chile*, 55(2), 45–63.
- Rollinson, H. R. (1993). Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation. Longman Scientific y Technical.
- Rowan, L. C., Mars, J. C., y Simpson, C. J. (2005). Lithologic mapping of the Mordor, NT, Australia ultramafic complex by using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). *Remote Sensing of Environment*, 99(1-2), 105-126. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.021>
- Rowan, L., y Mars, J. (2003). Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. *Remote Sensing of Environment*, 84(3), 350–366.
- Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., Helder, D., Irons, J. R., Johnson, D. M., Kennedy, R., Scambos, T. A., Schaaf, C. B., Schott, J. R., Sheng, Y., Vermote, E. F., Belward, A. S., Bindenschadler, R., Cohen, W. B., Gao, F., Hipple, J. D., Hostert, P., Huntington, J., Justice, C. O., Kilic, A., Kovalskyy, V., Lee, Z. P., Lymburner, L., Masek, J. G., McCorkel, J., Shuai, Y., Trezza, R., Vogelmann, J., Wynne, R. H., y Zhu, Z. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145, 154–172.

- Sabins, F. (1999). Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 14(3–4), 157–183. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(99\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(99)00007-4)
- Salehi, S., Olsen, S., Pedersen, C., y Thorning, L. (2019). ASTER data analysis applied to mineral and geological mapping in North East Greenland: Documentation of the NEG ASTER Project. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15404.00642>
- Seedorf, E., Dilles, J.H., Proffett, J.M., Einaudi, M.T., Zurcher, L., Stavast, W.J.A., Johnson, D.A. and Barton, M.D. (2005) Porphyry Deposits: Characteristics and Origin of Hypogene Features. *Economic Geology 100th Anniversary*, 251-298.
- Shaw, J. M., Evenstar, L., Cooper, F. J., Adams, B. A., Boyce, A. J., Hofmann, F., y Farley, K. A. (2021). A rusty record of weathering and groundwater movement in the hyperarid Central Andes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22, e2021GC009759. <https://doi.org/10.1029/2021GC009759>
- Shebl A, Abdellatif M, Badawi M, Dawoud M, Fahil AS, Csámer Á. Towards better delineation of hydrothermal alterations via multi-sensor remote sensing and airborne geophysical data. *Sci Rep*. 2023 May 6;13(1):7406.
- Sillitoe, R. (2003). Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view. *Mineralium Deposita*, 38(7), 787–812.
- Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry copper systems. *Society of Economic Geology, Inc. Economic Geology*, v 105, p 3–41.
- Sillitoe, R. H., y Perelló, J. (2005). Andean copper province: Tectonomagmatic settings, deposit types, metallogeny, exploration, and discovery. *Economic Geology, 100th Anniversary Volume*, 845–890.
- Sugaki, A., Campos, E., y Kojima, S. (2000). Mineralogy of the Panulcillo skarn copper deposit, Coquimbo Region, Chile. *Revista Geológica de Chile*, 27(2), 139-155. <https://doi.org/10.4067/S0716-02082000000200001>
- Sultan, M., Arvidson, R., y Sturchio, N. (1986). Mapping of serpentinites in the Eastern Desert of Egypt using Landsat Thematic Mapper data. *Geology*, 14(12), 995–999.
- Teledetección para la exploración minera y el mapeo geológico | Nature Research Intelligence. (s. f.). Remote Sensing for Mineral Exploration and Geological Mapping. Springer Nature. Recuperado de <https://www.nature.com/research->

intelligence/nri-topic-summaries/remote-sensing-for-mineral-exploration-and-geological-mapping-micro-7514

- Torres, P., y Tapia, F. (2025). Synergetic use of the Sentinel-2, ASTER, and Landsat-9 data for the identification of hydrothermal alteration and minerals in the Coastal Cordillera, between 28°57'20" and 29°13'25" S, northern Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 169, 105883. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105883>
- USGS, (2019). *Landsat 8 Data Users Handbook (Version 5.0)*. Sioux Falls, SD: USGS EROS Center. Disponible en USGS website.
- Van der Meer, F., Van der Werff, H., Van Ruitenbeek, F., Hecker, C., Bakker, W., Noomen, M., Van der Meijde, M., Carranza, E., de Smeth, J., y Woldai, T. (2012). Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 14(1), 112–128. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.08.002>
- Van Der Meer, F., Vazquez-Torres, M., y Van Dijk, P. M. (1997). Spectral characterization of ophiolite lithologies in the Troodos Ophiolite complex of Cyprus and its potential in prospecting for massive sulphide deposits. *International Journal of Remote Sensing*, 18(6), 1245–1257. <https://doi.org/10.1080/014311697218395>
- Van der Werff, H., y Van der Meer, F. (2016). Sentinel-2A MSI and Landsat 8 OLI provide data continuity for geological remote sensing. *Remote Sensing*, 8(11), 883.
- Van der Werff, H., y Van der Meer, F. (2014). Potential of ESA's Sentinel-2 for geological applications. *Remote Sensing of Environment*, 148, 124–133.
- Volesky, J. C., Stern, R. J., y Johnson, P. R. (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. *Precambrian Research*, 123, 235–247.
- White, N. C., y Hedenquist, J. W. (1995). Epithermal gold deposits: Styles, characteristics and exploration. *Society of Economic Geologists Newsletter*, 23, 9–13.
- Wu, C., Dai, J., Zhou, A., He, L., Tian, B., Lin, W., Zhao, T. y Bai, L. (2023). Mapping alteration zones in the Southern section of Yulong copper belt, Tibet using

multi-source remote sensing data. *Frontiers in Earth Science*. 11. 10.3389/feart.2023.1164131.

- Yamaguchi, Y., Kahle, A. B., Tsu, H., Kawakami, T., & Pniel, M. (1998). Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1062–1071.
- Yu, M., Feng, C., Mao, J., Zhao, Y., Li, B., y Zhu, Y. (2017). Multistage skarn-related tourmaline from the Galinge deposit, Qiman Tagh, western China: A fluid evolution perspective. *The Canadian Mineralogist*, 55(1), 3–19. <https://doi.org/10.3749/canmin.1600043>
- Zhang, L., Liu, D., Zhou, Q., Zhang, X., y Liu, C. (2020). Spectral and mineralogical characteristics of hydrothermal alteration zones in skarn deposits: A case study from Tonglushan, China. *Ore Geology Reviews*, 124, 103663. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103663>
- Zhu, Y., Jiang, H., Xiao, B., & Zhao, J. (2025). Application of geological and shortwave infrared (SWIR) spectroscopy mapping in the Yechangping giant porphyry-skarn Mo-W deposit, East Qinling, China. *Ore Geology Reviews*, 106873. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2025.106873>

CAPÍTULO 9: ANEXOS

Anexo 9.1. RGB generados a partir de BR y BM en ASTER. Elaboración propia.

Combinación RGB	Canal rojo	Canal verde	Canal azul	Referencia
Discriminación	(B4/B7)	(B4/B3)	(B2/B1)	Abrams y Hook (1995)
Arcilla, anfíbol, laterita	$((B5 \times B7)/(B6 \times B6))$	(B6/B8)	(B4/B5)	Bierwith (2002)
Decorrelation stretch	B13	B12	B10	Bierwith (2002)
Sílice, carbonato, basic degree index	$((B11 \times B11)/B10/B12)$	(B13/B14)	(B12/B13)	Bierwith (2002)
Minerales con presencia de hidroxilo, alteración argílica avanzada	(B5/B6)	(B7/B6)	(B7/B5)	Hewson <i>et al.</i> (2005)
Sílice	(B11/B10)	(B11/B12)	(B13/B10)	Hewson <i>et al.</i> (2005)
Sílice, carbonato	$((B11 \times B11)/(B10 \times B12))$	(B13/B14)	(B12/B13)	Ninomiya (2002)
Alteración de óxido ferroso, granate-piroxeno, carbonato	(B2/B4)	(B12/B13)	(B13/B14)	RGB experimental. Elaboración propia
Argílica, filica, propilítica	$((B4+B6)/B5)$	$((B5+B7)/B6)$	$((B7+B9)/B8)$	Pour <i>et al.</i> , 2019
Argílica, filica, propilítica	$((B4+B6)/B5)$	(B5/B6)	$((B5+B7)/B6)$	Pour <i>et al.</i> , 2019
Características estructurales	B7	B4	B2	Rowan and Mars (2003)

Combinación RGB	Canal rojo	Canal verde	Canal azul	Referencia
Alteración de óxido férrico, óxido de hierro ferroso y alteración portadora de iones OH	(B4/B3)	(B2/B4)	(B4/B5)	Torres y Tapia (2025)
Alteración de óxido férrico, óxido de hierro ferroso y silicato ferroso	(B4/B3)	(B2/B4)	((B1/B2)+(B5/B3))	Torres y Tapia (2025)
Alteración portadora de iones OH, óxidos de hierro y silicato ferroso	(B4/B5)	(B4/B1)	((B1/B2)+(B5/B3))	Torres y Tapia (2025)
Discriminación para mapeo	(B4/B1)	(B3/B1)	(B12/B14)	Van der Meer <i>et al.</i> (2012)
Discriminación de zonas ricas en sulfuros	B12	B5	B3	Van der Meer <i>et al.</i> (2012)
<i>Gossan</i> , alteración, roca hospedante	(B4/B2)	(B4/B5)	(B5/B6)	Volesky <i>et al.</i> (2003)

Anexo 9.2. SAM aplicado al sensor ASTER, con su mineral, firma y ángulo espectral, en Beckman Mineral Spectral Library (minerals_beckman_3375.sli). Elaboración propia.

Mineral	Firma espectral	Ángulo espectral
Actinolita	Actinolite NMNHR16485 [W1R1Bb AREF]	0,07
Albita	Albite HS66.3B Plagioclase [W1R1Bc AREF]	0,02
Alunita	Alunite SUSTDA-20 [W1R1Bb AREF]	0,22
Caolinita	Kaolinite KGa-1 (wxl) [W1R1Bb AREF]	0,17
Clorita	Chlorite HS179.3B [W1R1Bb AREF]	0,16
Diáspora	Diaspore HS416.3B [W1R1Bb AREF]	0,3

Mineral	Firma espectral	Ángulo espectral
Dickita	Dickite NMNH106242 [W1R1Bb AREF]	0,33
Dolomita	Dolomite COD2005 [W1R1Bb AREF]	0,05
Goetita	Goethite WS220 [W1R1Bc AREF]	0,19
Hematita	Hematite WS161 [W1R1Bb AREF]	0,21
Illita	Illite IL105 (1Md) [W1R1Bb AREF]	0,05
Jarosita	Jarosite GDS100 Na;Sy 90C [W1R1Ba AREF]	0,06
Limonita	Limonite HS41.3 [W1R1Bb AREF]	0,23
Magnetita	Magnetite HS195.3B [W1R1Bb AREF]	0,04
Pirofilita	Pyrophyllite PYS1A <850um [W1R1Ba AREF]	0,2
Sericita	Muscovite GDS113 Ruby [W1R1Bb AREF]	0,09
Sílice	Quartz GDS31 0-74um fr [W1R1Ba AREF]	0,02
Turmalina	Tourmaline HS282.2B [W1R1Bc AREF]	0,05

Anexo 9.3. SAM aplicado al sensor ASTER, con su mineral, firma y ángulo espectral, en Johns Hopkins University Spectral Library (mineral_jhu_nicolet_2278.sli). Elaboración propia.

Mineral	Firma espectral	Ángulo espectral
Andradita	Andradite Ca ₃ Fe ₂₊₃ (SiO ₄) ₃ [silicate-nesosilicate-fine-andrad1]	0,6
Biotita	Biotite K(Mg Fe ₊₂) ₃ (Al Fe ₊₃)Si ₃ O ₁₀ (OH F) ₂ [silicate-phyllsilicate-fine-biotit1]	0,6
Calcita	Calcite CaCO ₃ [carbonate-none-fine-calcit1]	0,5
Cuarzo	Quartz SiO ₂ [silicate-tectosilicate-coarse-quartz2]	0,55
Diópsido	Diopside CaMgSi ₂ O ₆ [silicate-inosilicate-coarse-diopsi2]	0,5
Epidota	Epidote Ca ₂ (Al Fe ₊₃) ₃ (SiO ₄) ₃ (OH) [silicate-sorosilicate-fine-epidot1]	0,65
Grosularia	Grossular Ca ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃ [silicate-nesosilicate-fine-grossu2]	0,6
Hedenbergita	Hedenbergite CaFe ₊₂ Si ₂ O ₆ [silicate-inosilicate-fine-hedenb1]	0,6
Hornblenda	Hornblende Ca ₂ (Fe ₂₊ Mg) ₄ Al(Si ₇ Al)O ₂₂ (OH F) ₂ [silicate-	0,6

Mineral	Firma espectral	Ángulo espectral
	inosilicate-solid-hornbl2]	
Tremolita	Tremolite Ca ₂ (Mg Fe ⁺²) ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂ [silicate-inosilicate-solid-tremol1]	0,65
Vesuvianita	Vesuvianite Ca ₁₀ Mg ₂ Al ₄ (SiO ₄) ₅ (Si ₂ O ₇) ₂ (OH) ₄ [silicate-sorosilicate-solid-vesuvi1]	0,75
Wollastonita	Wollastonite CaSiO ₃ [silicate-inosilicate-fine-wollast1]	0,6

Anexo 9.4. RGB generados a partir de BR y BM en Landsat 8. Elaboración propia.

Combinación RGB	Canal rojo	Canal verde	Canal azul	Referencia
Litología, alteración hidrotermal, arcilla y óxidos Fe	B7	B4	B1	Abrams <i>et al.</i> (1988)
Características geológicas	B7	B6	B4	Butler (2013)
Proporción de Sabin-/alteraciones minerales	(B4/B2)	(B6/B7)	(B6/B5)	Sabins (1999)
Litología	(B5/B1)	(B5/B7)	(B5/B4)x (B3/B3)	Sultan <i>et al.</i> (1986)
Alteración de óxido férrico, óxido de hierro ferroso y silicato ferroso	(B6/B5)	(B4/B6)	(B7/B6)	Torres y Tapia (2025)
Alteración de óxido férrico, óxido de hierro ferroso y alteración portadora de iones OH	(B6/B5)	(B4/B6)	(B6/B7)	Torres y Tapia (2025)
Alteración portadora de iones OH, óxidos de hierro y silicato ferroso	(B6/B7)	(B4/B2)	(B7/B6)	Torres y Tapia (2025)

Anexo 9.5. RGB generados a partir de BR y BM en Sentinel-2. Elaboración propia.

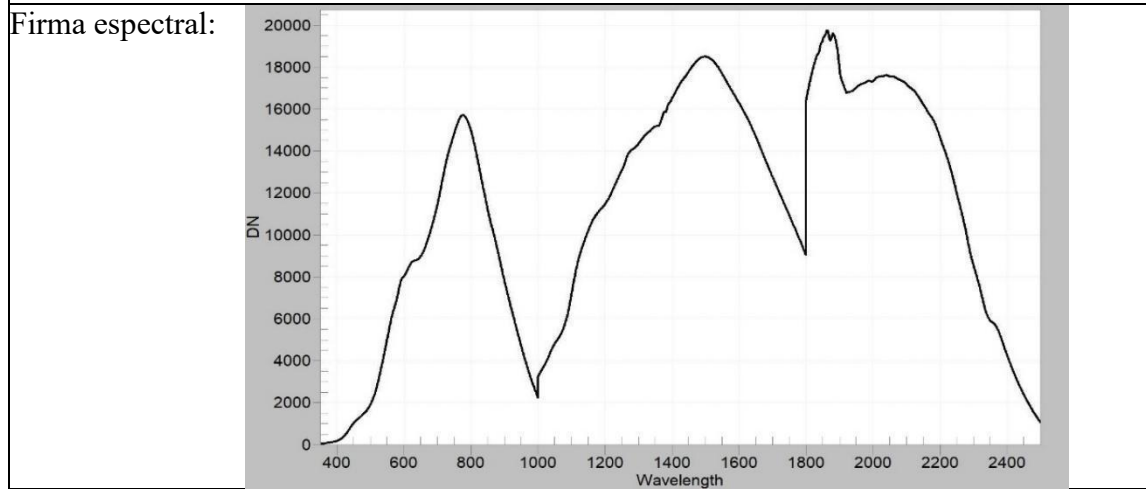
Combinación RGB	Canal rojo	Canal verde	Canal azul	Referencia
Minerales OH o zonas con presencia de arcillas y óxidos	B2	B8	B12	Drusch <i>et al.</i> (2012)
Alteración portadora de iones OH, óxidos de hierro, silicato ferroso	(B11/B12)	(B4/B2)	(B12/B11)	Torres y Tapia (2025)
Óxido de hierro, óxido férrico, minerales hidroxílicos	(B4/B2)	(B11/B8)	(B11/B12)	Van der Meer <i>et al.</i> (2014)
Minerales hidroxílicos, óxidos Fe, óxido de hierro ferroso	(B11/B12)	(B4/B2)	(B4/B11)	Van der Werf y Van der Meer (2016)
Óxidos de hierro y zonas con minerales hidratados	B12	B8	B2	Van der Werff y Van der Meer (2016)
Alteración portadora de iones OH, óxido ferroso, silicato ferroso	(B11/B12)	(B11/B8)	(B12/B11)	Van der Werff y Van der Meer, (2014)
Óxido férrico, óxido de hierro ferroso, alteración portadora de iones OH	(B11/B8)	(B4/B11)	(B11/B12)	Torres y Tapia (2025)
Óxido férrico, óxido de hierro ferroso, silicato ferroso	(B11/B8)	(B4/B11)	(B12/B11)	Torres y Tapia (2025)
Hierro férrico, alteración portadora de iones OH, hierro ferroso	(B4/B3)	(B11/B12)	((B12/B8) + (B3/B4))	Van der Werff y Van der Meer, (2016)
Alteración portadora de iones OH, caolinita, óxidos de Fe	(B11/B12)	(B8/B4)	(B4/B2)	Alimi y Carranza (2025)
Alteración portadora de iones OH, silicato ferroso, óxido férrico	(B11/B12)	(B12/B11)	(B11/B8)	Alimi y Carranza (2025)

Anexo 9.6. Registro de muestras obtenidas en terreno mediante la distribución de puntos de muestreo por medio de SAM y resultados de ASD TerraSpec. Elaboración propia.

Muestra: 20250430_M1	Coordenada norte: 7023744	Coordenada este: 405197	Cota (m s.n.m.): 2130
-------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Hedenbergita, wollastonita, biotita, grosularia, epidota, andradita, calcita y sílice

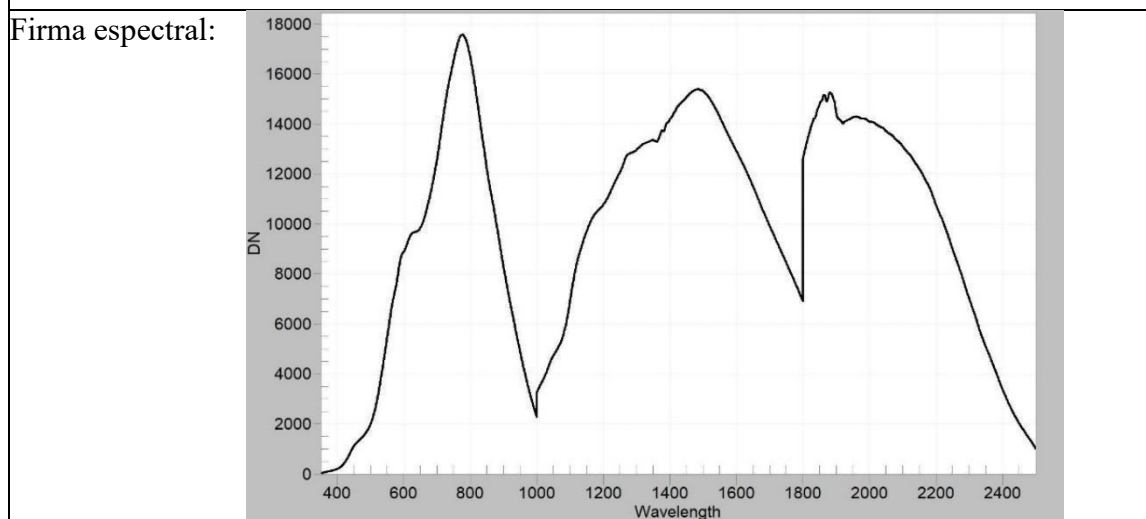
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Calcita + Sílice



Muestra: 20250430_M2	Coordenada norte: 7023814	Coordenada este: 405137	Cota (m s.n.m.): 2134
-------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Diópsido, hedenbergita, wollastonita, biotita, grosularia, epidota, andradita, calcita y sílice

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Calcita + Montmorillonita + Nontronita + Goethita

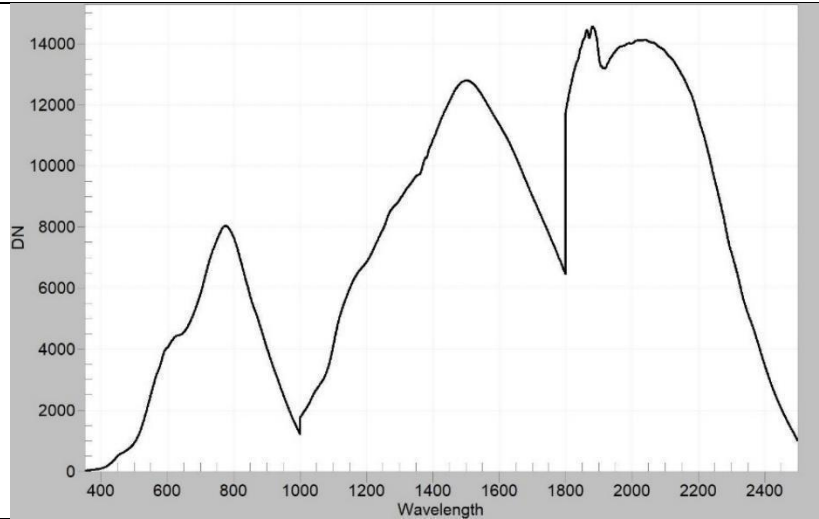


Muestra: 20250430_M3	Coordenada norte: 7023882	Coordenada este: 404960	Cota (m s.n.m.): 2162
-------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Diópsido, hedenbergita, wollastonita, biotita, grosularia, epidota, andradita, calcita y sílice

Mineral detectado por medio de espectroscopía de reflectancia (ASD TerraSpec):
Calcita + Montmorillonita + Nontronita

Firma espectral:

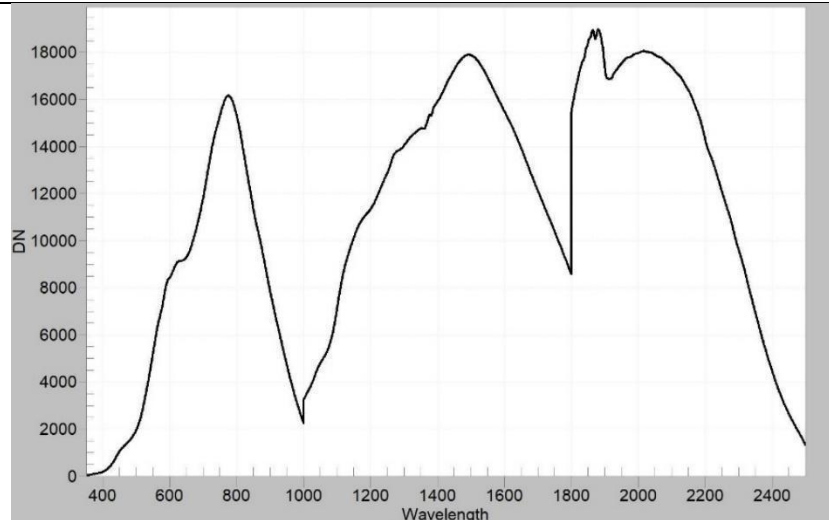


Muestra: 20250430_M4	Coordenada norte: 7023969	Coordenada este: 404587	Cota (m s.n.m.): 2123
-------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Piroxeno, diópsido, hedenbergita, wollastonita, biotita, grosularia, epidota, andradita, calcita y sílice

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita + Nontronita + Goethita

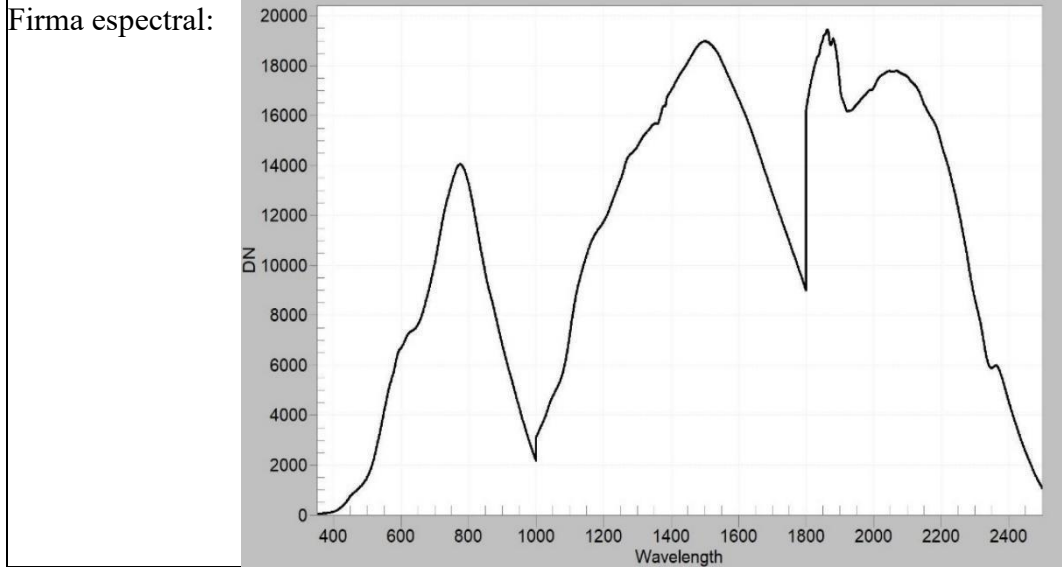
Firma espectral:



Muestra: 20250430_M5	Coordenada norte: 7024015	Coordenada este: 404636	Cota (m s.n.m.): 2131
-------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Wollastonita, biotita, grosularia, epidota, andradita, calcita y sílice

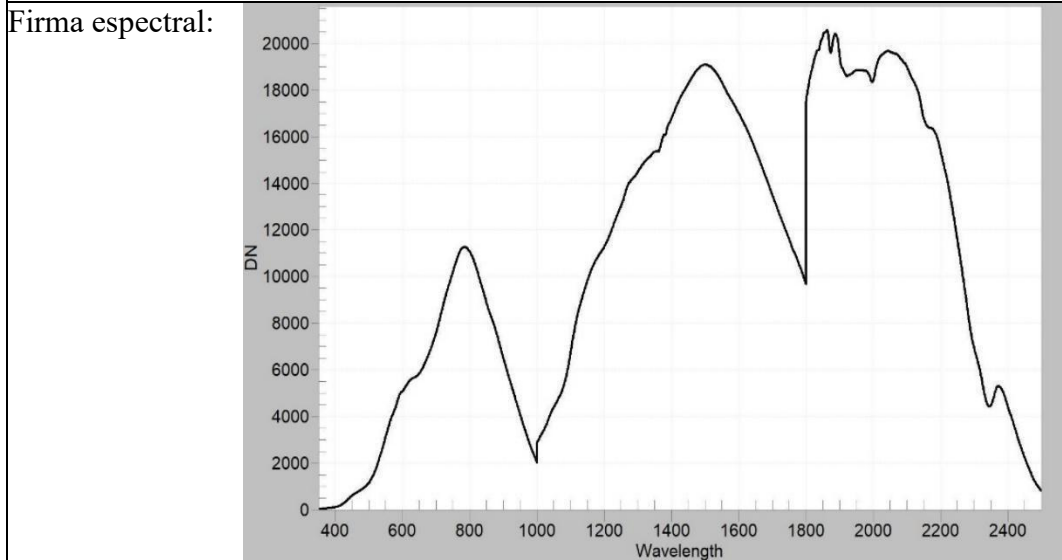
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Calcita + Sílice



Muestra: 20250430_M6	Coordenada norte: 7024019	Coordenada este: 404563	Cota (m s.n.m.): 2103
-------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Piroxeno, diópsido, hedenbergita, wollastonita, biotita, grosularia, epidota, andradita, calcita y sílice

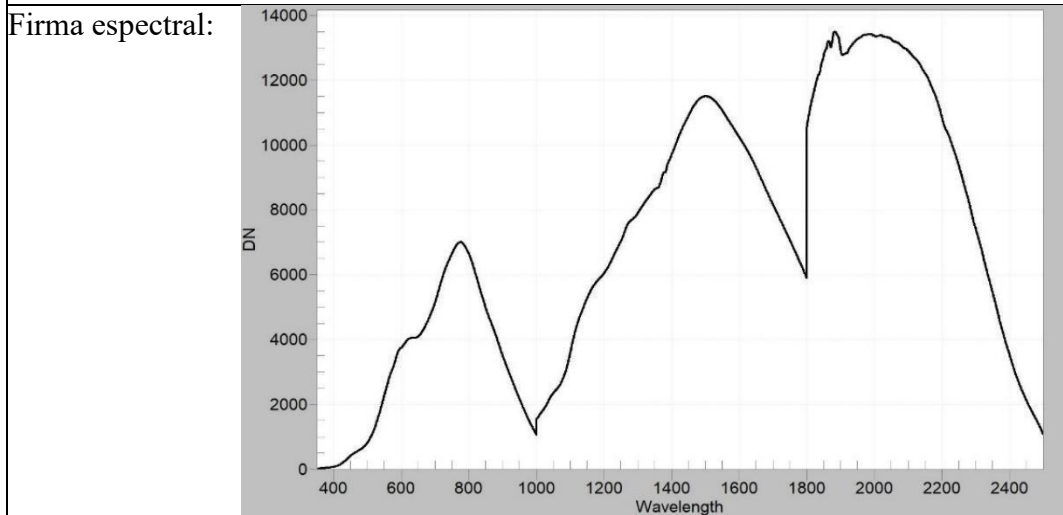
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Calcita



Muestra: 20250505_M7	Coordenada norte: 7023732	Coordenada este: 405201	Cota (m s.n.m.): 2127
-------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Hedenbergita, wollastonita, biotita, grosularia, epidota, andradita, calcita y sílice

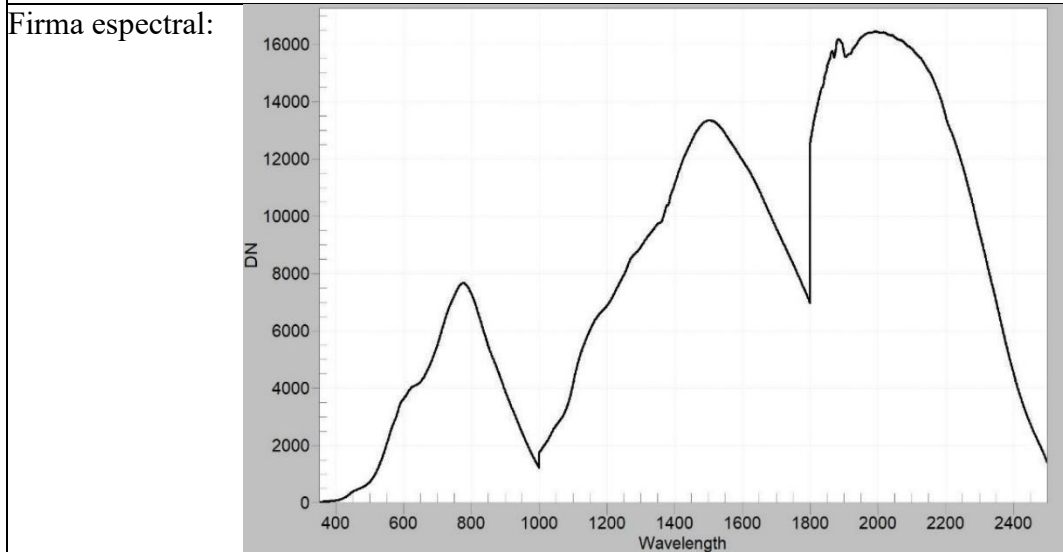
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita + Nontronita



Muestra: 20250505_M8	Coordenada norte: 7023742	Coordenada este: 405190	Cota (m s.n.m.): 2139
-------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Hedenbergita, wollastonita, biotita, grosularia, epidota, andradita, calcita y sílice

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita

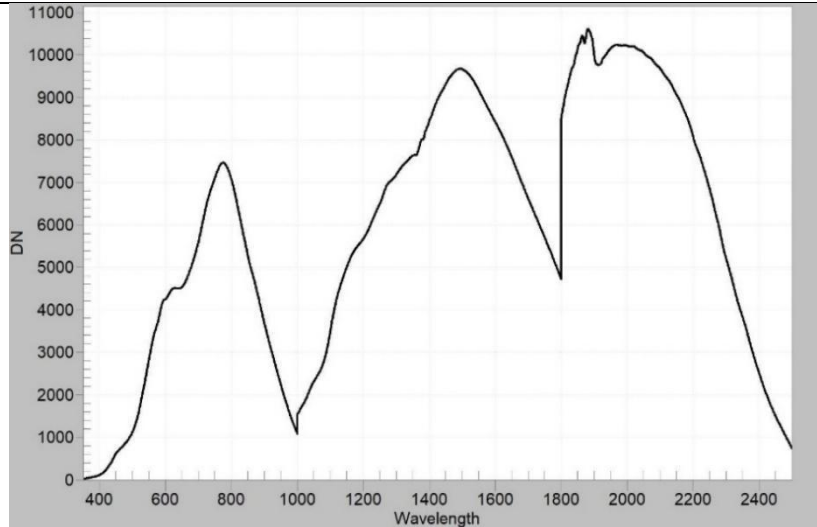


Muestra: 20250505_M9	Coordenada norte: 7023741	Coordenada este: 405184	Cota (m s.n.m.): 2136
-------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Diópsido, hedenbergita, wollastonita, biotita, grosularia, epidota, andradita, calcita y sílice

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita + Nontronita

Firma espectral:

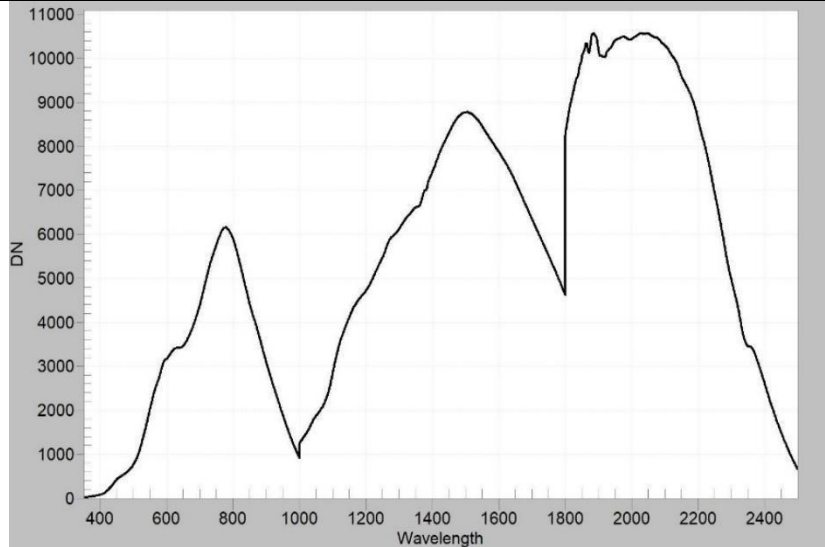


Muestra: 20250505_M10	Coordenada norte: 7023829	Coordenada este: 405141	Cota (m s.n.m.): 2144
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Piroxeno, diópsido, wollastonita, biotita, grosularia, epidota, andradita, calcita, sílice y hedenbergita

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Calcita

Firma espectral:

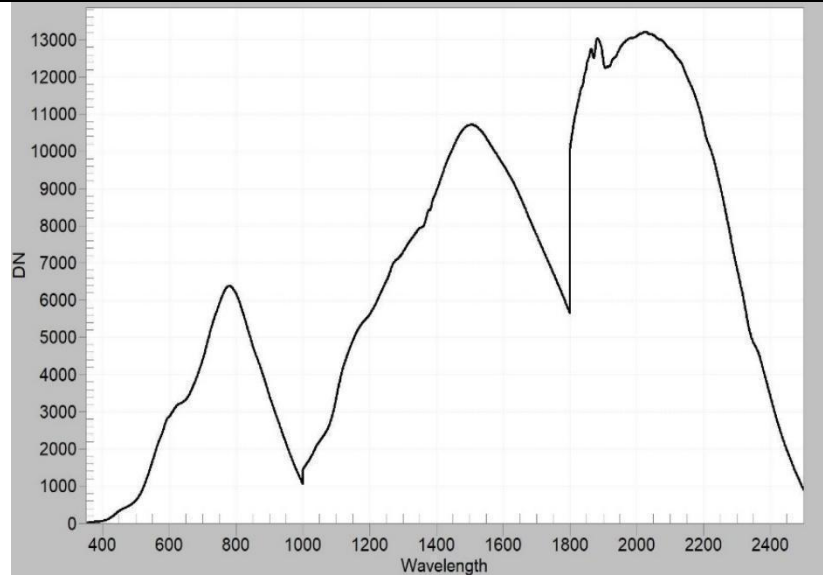


Muestra: 20250505_M11	Coordenada norte: 7023844	Coordenada este: 405137	Cota (m s.n.m.): 2151
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Grosularia, andradita, calcita y sílice

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Calcita + Montmorillonita

Firma espectral:

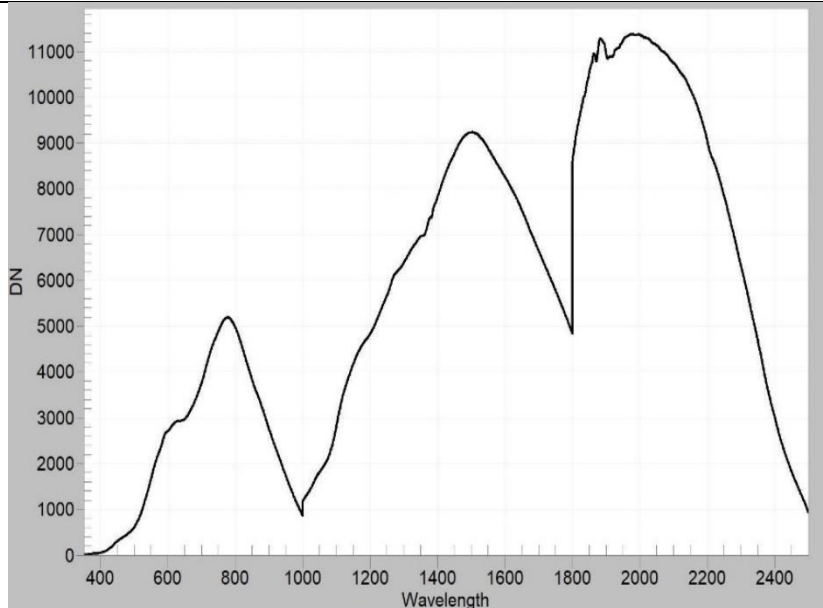


Muestra: 20250505_M12	Coordenada norte: 7023802	Coordenada este: 405139	Cota (m s.n.m.): 2139
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Hematita, piroxeno, diópsido, hedenbergita, wollastonita, biotita, grosularia, epidota, andradita, calcita y sílice

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita

Firma espectral:

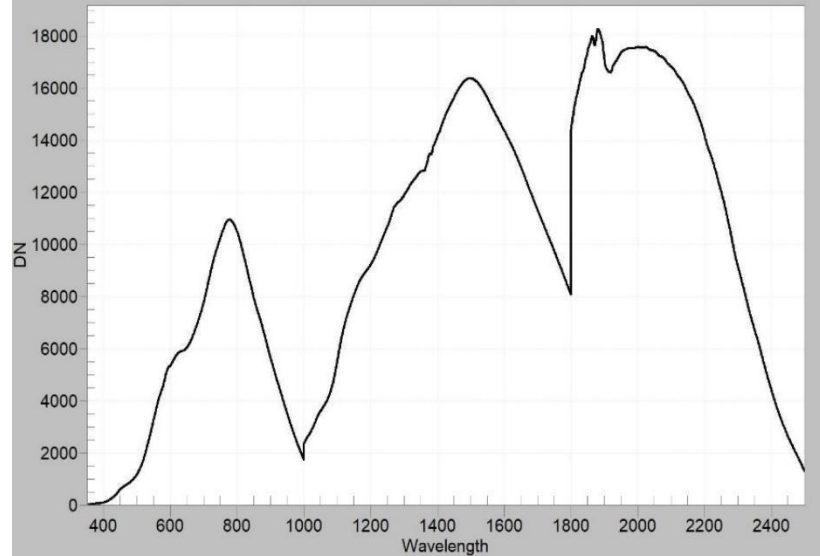


Muestra: 20250505_M13	Coordenada norte: 7023765	Coordenada este: 405133	Cota (m s.n.m.): 2126
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Piroxeno, diópsido, andradita, calcita y sílice

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Nontronita +
Montmorillonita

Firma espectral:

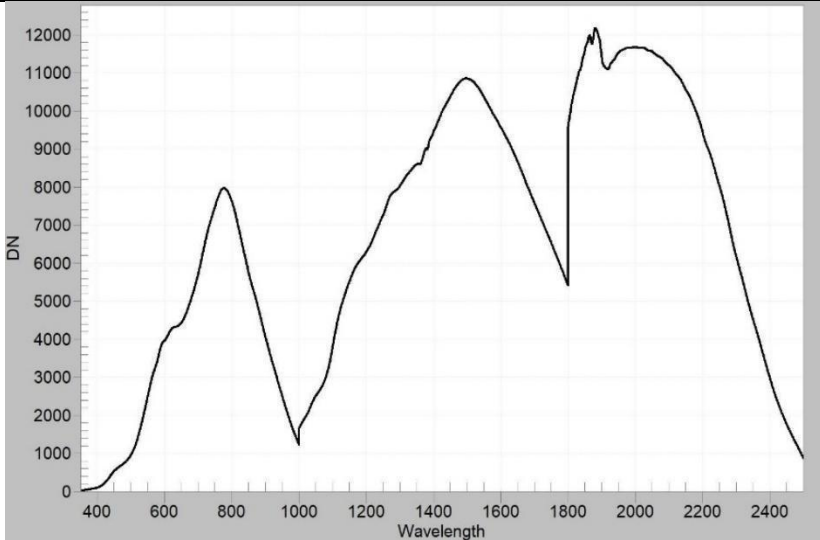


Muestra: 20250505_M14	Coordenada norte: 7023798	Coordenada este: 405090	Cota (m s.n.m.): 2116
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Hematita, piroxeno, diópsido, hedenbergita, wollastonita, biotita, grosularia, epidota, andradita, calcita y sílice

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Nontronita +
Montmorillonita

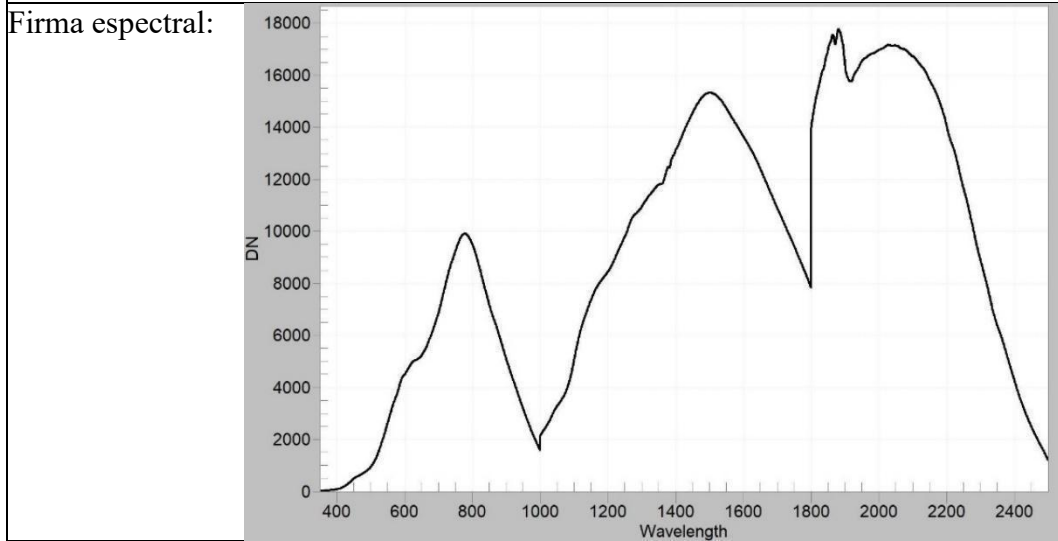
Firma espectral:



Muestra: 20250505_M15	Coordenada norte: 7023869	Coordenada este: 405012	Cota (m s.n.m.): 2152
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Goethita, wollastonita, biotita, grosularia, epidota, andradita, calcita, sílice y clorita

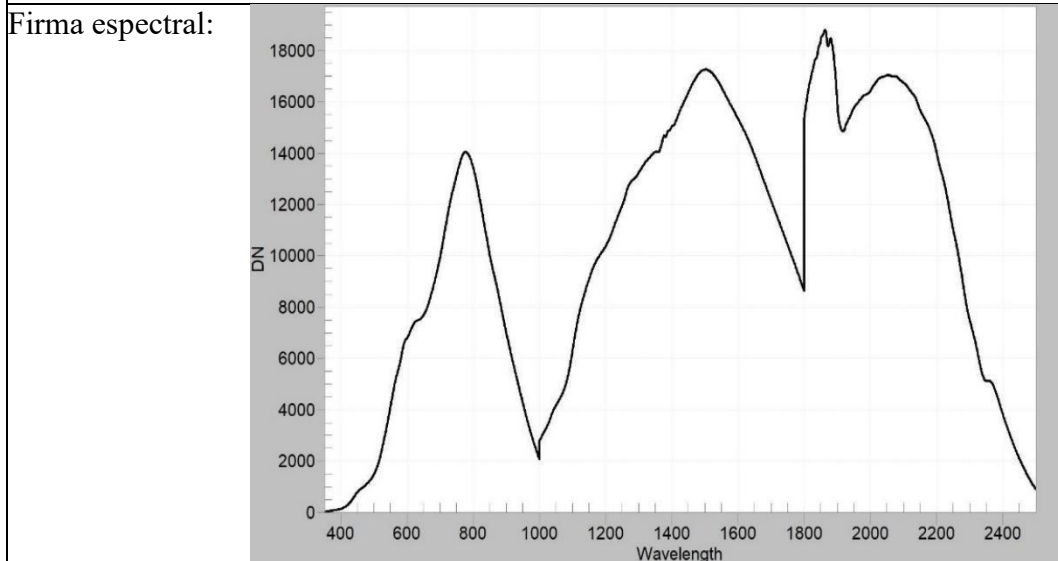
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Nontronita + Montmorillonita + Calcita



Muestra: 20250505_M16	Coordenada norte: 7023855	Coordenada este: 404941	Cota (m s.n.m.): 2137
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Diópsido, biotita, grosularia, epidota, andradita, calcita y sílice

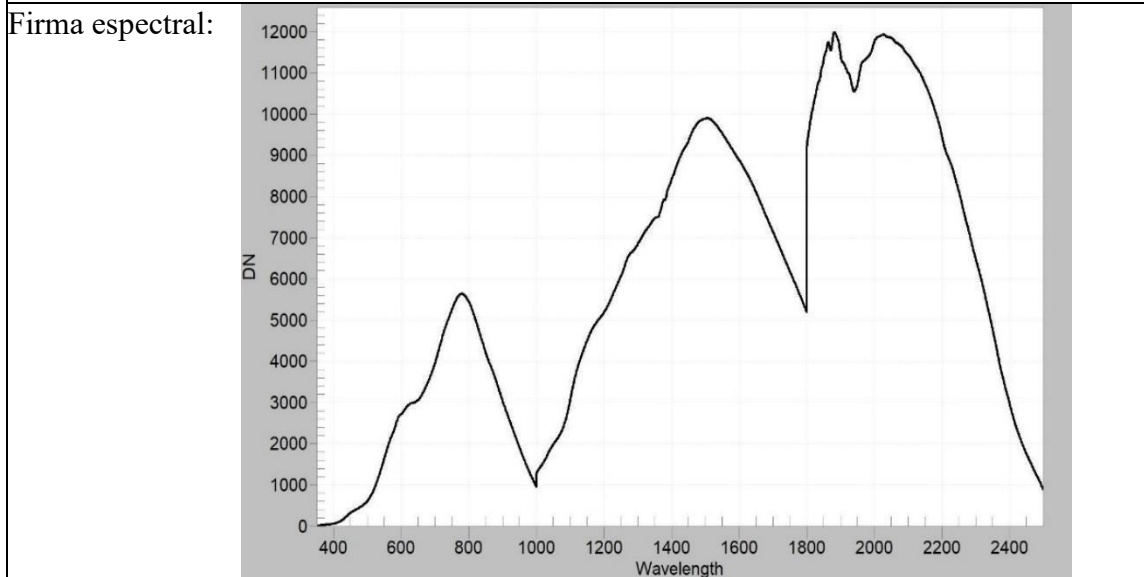
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Calcita



Muestra: 20250505_M17	Coordenada norte: 7023912	Coordenada este: 404936	Cota (m s.n.m.): 2178
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Grosularia, epidota y andradita

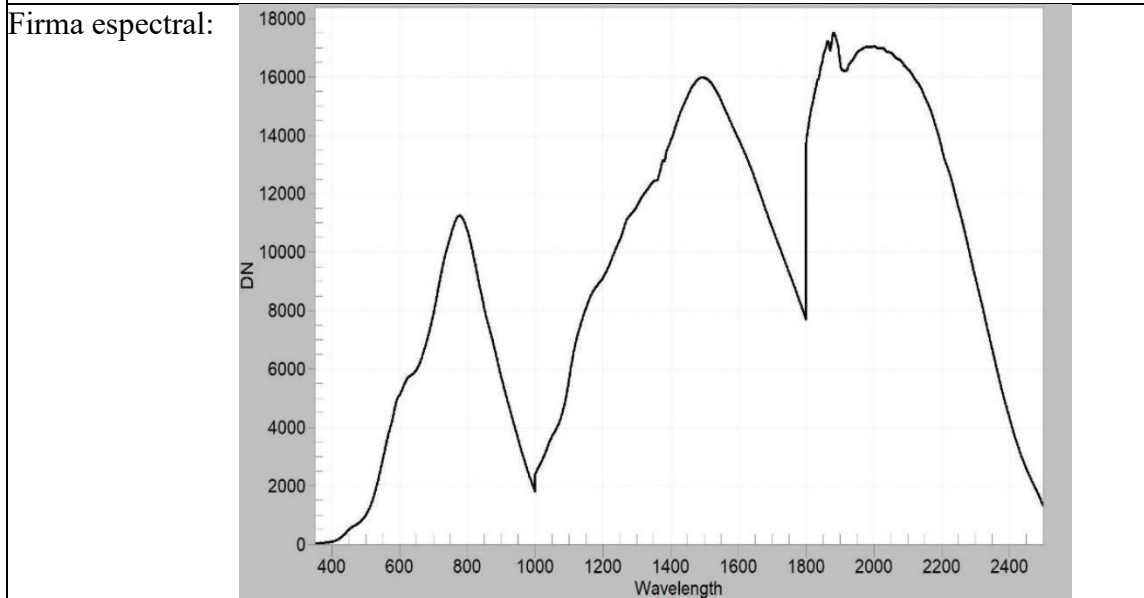
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Yeso



Muestra: 20250505_M18	Coordenada norte: 7023923	Coordenada este: 404922	Cota (m s.n.m.): 2178
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Andradita y clorita

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita + Nontronita

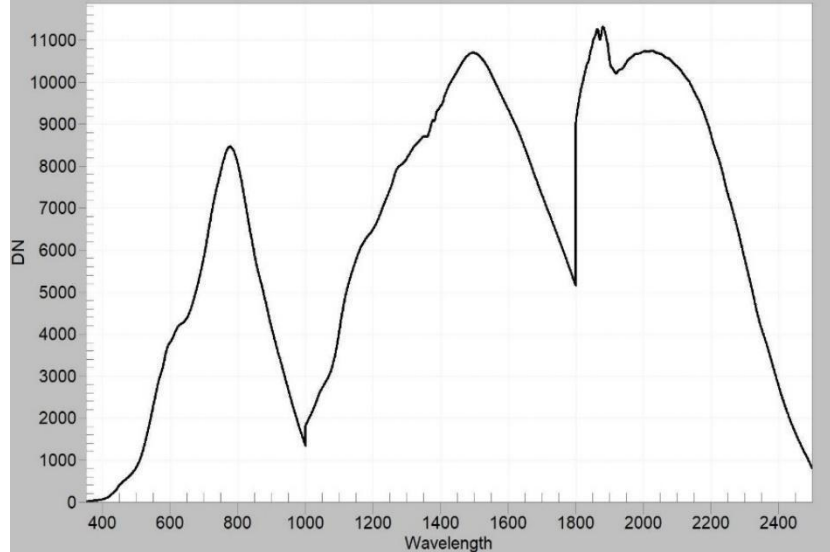


Muestra: 20250505_M19	Coordenada norte: 7023999	Coordenada este: 404746	Cota (m s.n.m.): 2142
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Andradita, wollastonita, biotita, grosularia, epidota y calcita

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Calcita + Montmorillonita

Firma espectral:

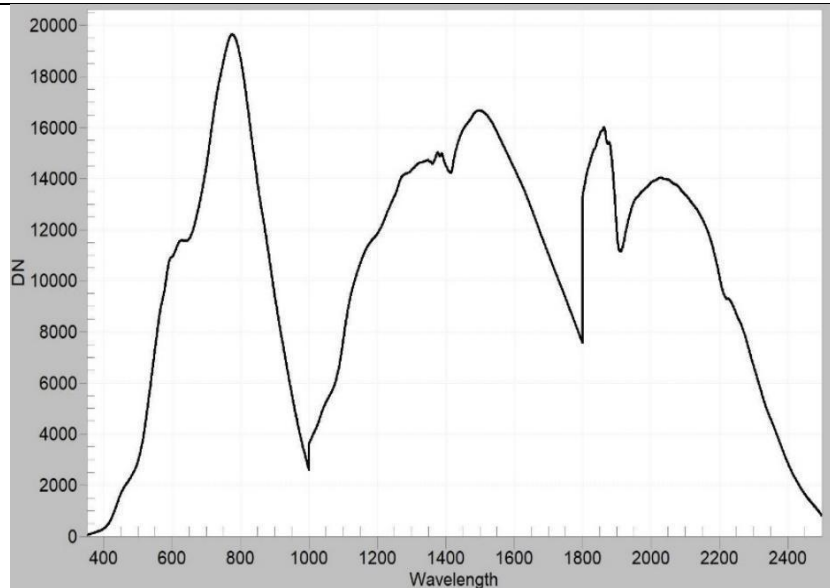


Muestra: 20250505_M20	Coordenada norte: 7023049	Coordenada este: 403145	Cota (m s.n.m.): 2060
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Illita

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita + CloritaMg + CaolinitaPX

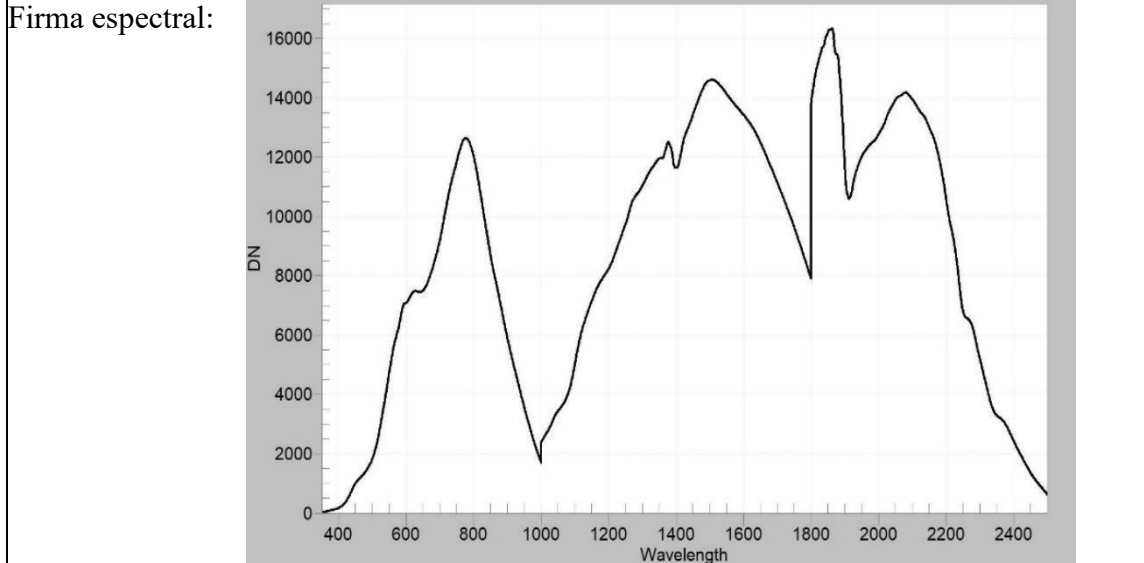
Firma espectral:



Muestra: 20250507_M21	Coordenada norte: 7023625	Coordenada este: 405531	Cota (m s.n.m.): 2102
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Illita

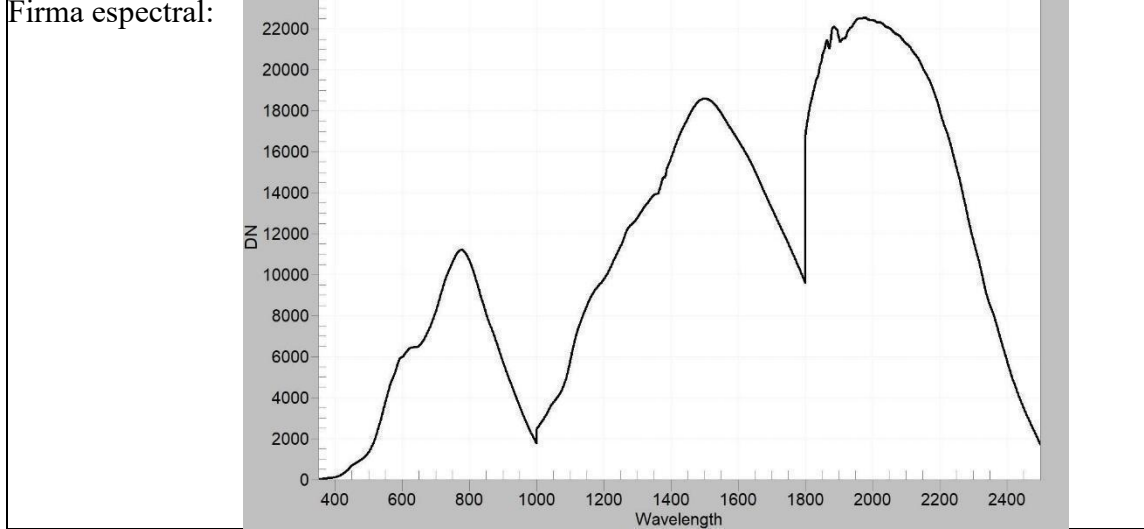
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: CloritaFeMg + Montmorillonita



Muestra: 20250507_M22	Coordenada norte: 7023694	Coordenada este: 405198	Cota (m s.n.m.): 2098
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Piroxeno, diópsido, hedenbergita, wollastonita, biotita, grosularia, epidota, andradita, calcita y sílice

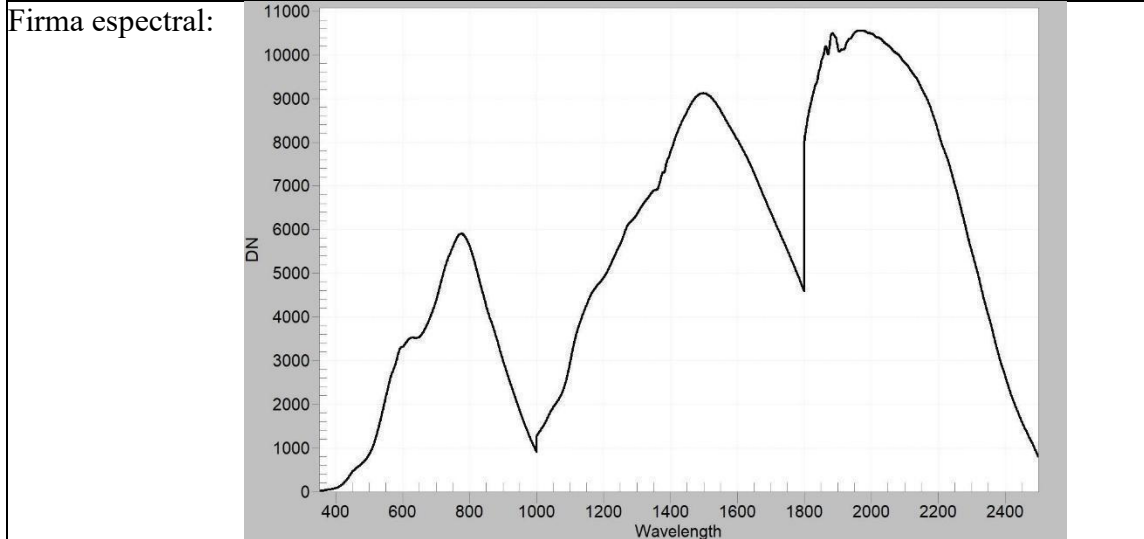
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita + Nontronita + Carbonato



Muestra: 20250507_M23	Coordenada norte: 7023784	Coordenada este: 405174	Cota (m s.n.m.): 2143
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Diópsido, hedenbergita, wollastonita, grosularia, epidota, andradita, calcita y sílice

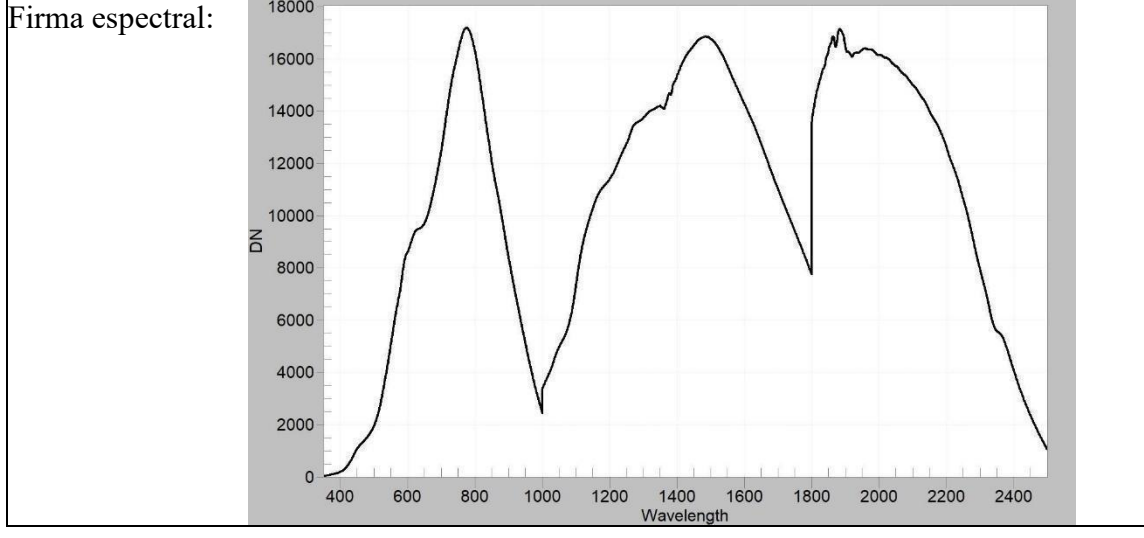
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita + Nontronita + Flogopita?



Muestra: 20250507_M24	Coordenada norte: 7023892	Coordenada este: 404963	Cota (m s.n.m.): 2164
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Hematita, diópsido, goethita, hedenbergita, wollastonita, biotita, grosularia, epidota, andradita, calcita, sílice y clorita

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Calcita + Goethita

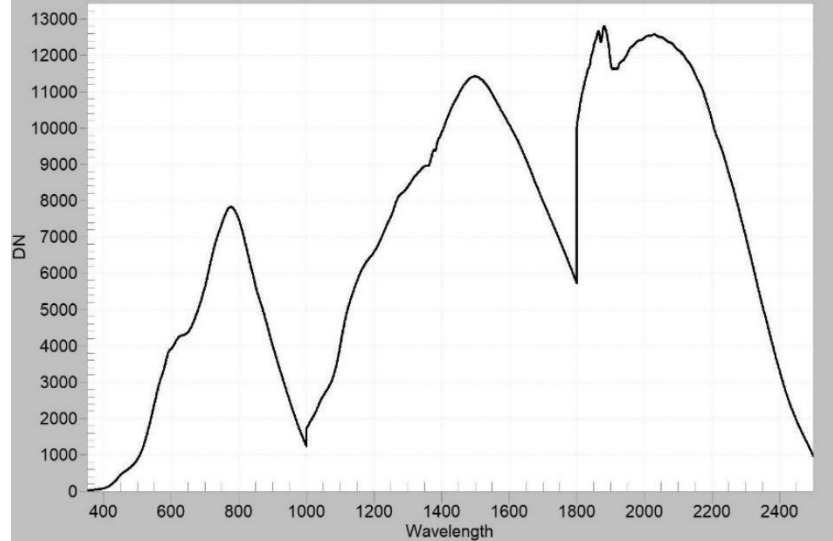


Muestra: 20250507_M25	Coordenada norte: 7024016	Coordenada este: 404624	Cota (m s.n.m.): 2122
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Hedenbergita, wollastonita, biotita, grosularia, epidota, andradita y calcita

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Sílice + Montmorillonita

Firma espectral:

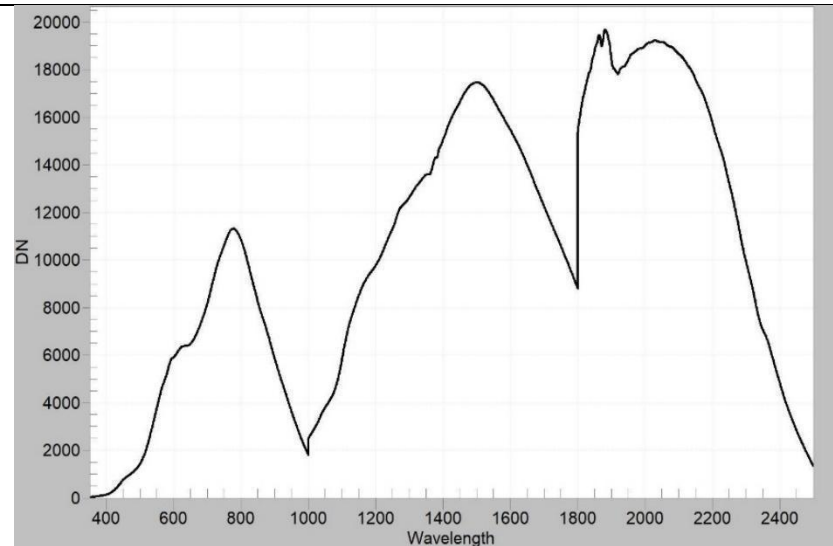


Muestra: 20250507_M26	Coordenada norte: 7024026	Coordenada este: 404599	Cota (m s.n.m.): 2190
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Hematita, piroxeno, dióxido, hedenbergita, wollastonita, biotita, grosularia, epidota, andradita, calcita y sílice

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Sílice + Montmorillonita + Calcita

Firma espectral:

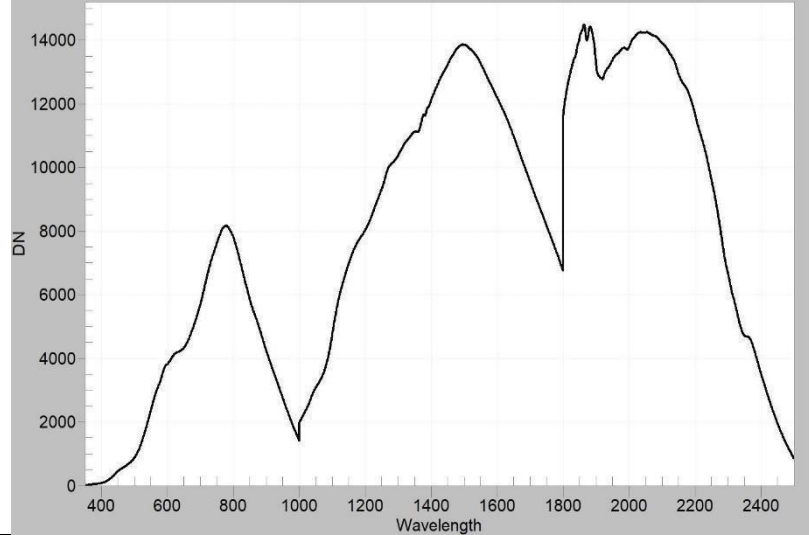


Muestra: 20250507_M27	Coordenada norte: 7024036	Coordenada este: 404598	Cota (m s.n.m.): 2112
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Hematita, piroxeno, diópsido, hedenbergita, wollastonita, biotita, grosularia, epidota, andradita, calcita y sílice

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Calcita + Sílice

Firma espectral:

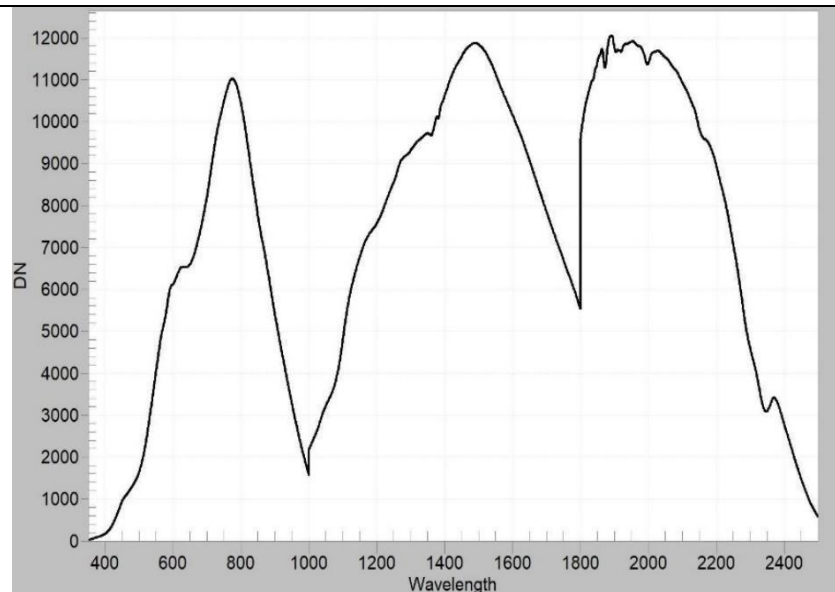


Muestra: 20250507_M28	Coordenada norte: 7024004	Coordenada este: 404572	Cota (m s.n.m.): 2107
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Piroxeno, diópsido, hematita, hedenbergita, wollastonita, biotita, grosularia, epidota, andradita, calcita y sílice

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Calcita

Firma espectral:

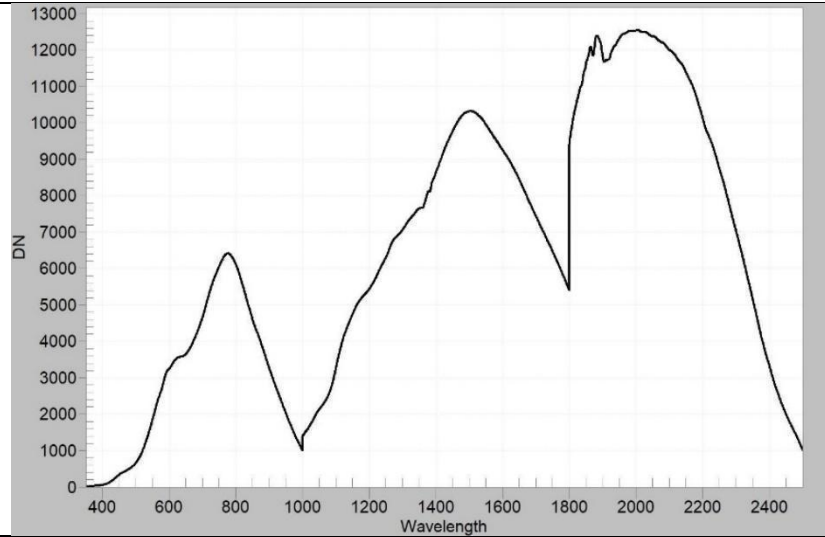


Muestra: 20250507_M29	Coordenada norte: 7023998	Coordenada este: 404578	Cota (m s.n.m.): 2108
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Hematita, piroxeno, diópsido, hedenbergita, wollastonita, biotita, grosularia, epidota, andradita, calcita y sílice

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita + TurmalinaFe

Firma espectral:

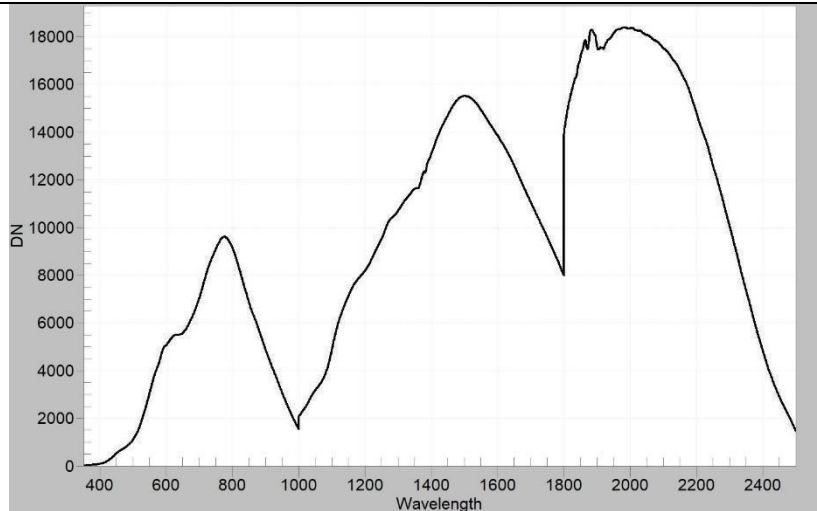


Muestra: 20250507_M30	Coordenada norte: 7024003	Coordenada este: 404562	Cota (m s.n.m.): 2103
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Sílice, piroxeno, diópsido, hedenbergita, wollastonita, biotita, grosularia, epidota, andradita y calcita

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Sílice + Montmorillonita + Nontronita

Firma espectral:

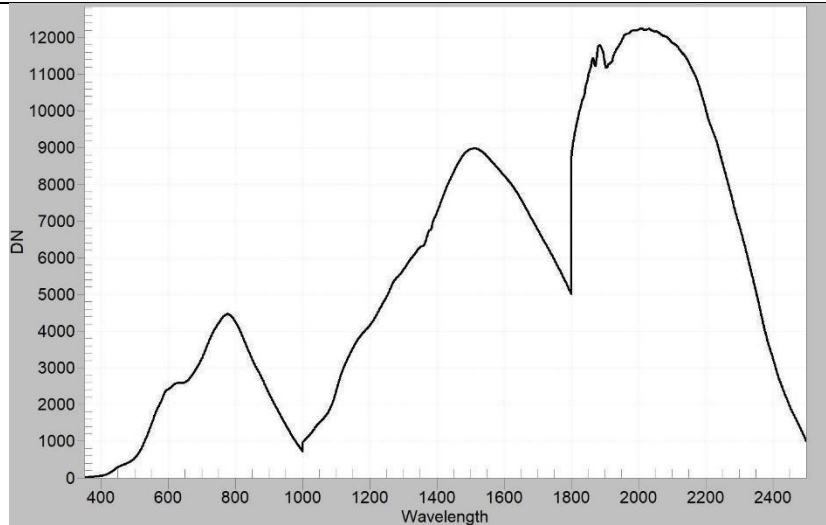


Muestra: 20250507_M31	Coordenada norte: 7023974	Coordenada este: 404566	Cota (m s.n.m.): 2105
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Piroxeno, diópsido, hedenbergita, wollastonita, biotita, grosularia, epidota, andradita, calcita y sílice

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita + TurmalinaFe

Firma espectral:

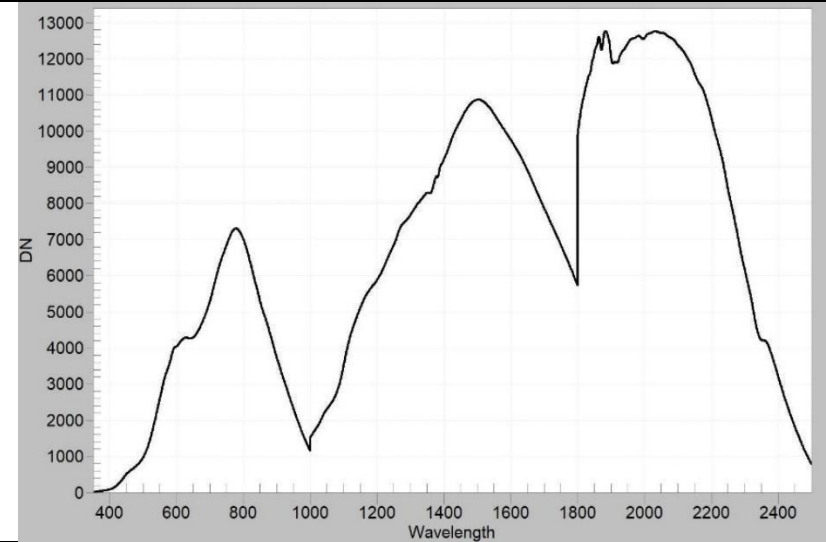


Muestra: 20250507_M32	Coordenada norte: 7023943	Coordenada este: 404578	Cota (m s.n.m.): 2116
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Hedenbergita, wollastonita, biotita, grosularia, epidota, andradita y calcita

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Calcita

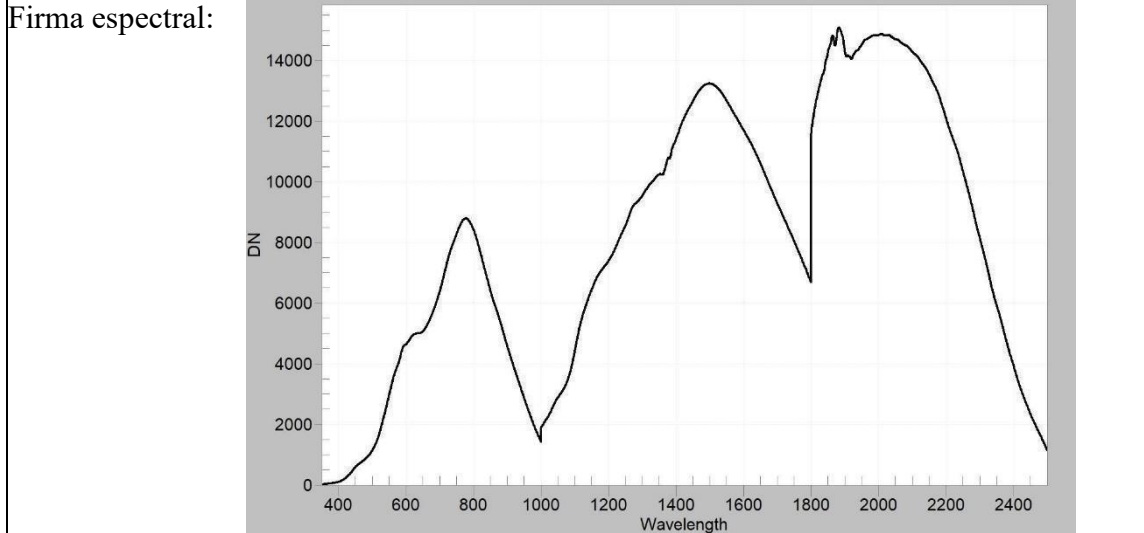
Firma espectral:



Muestra: 20250507_M33	Coordenada norte: 7023908	Coordenada este: 404614	Cota (m s.n.m.): 2101
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Andradita

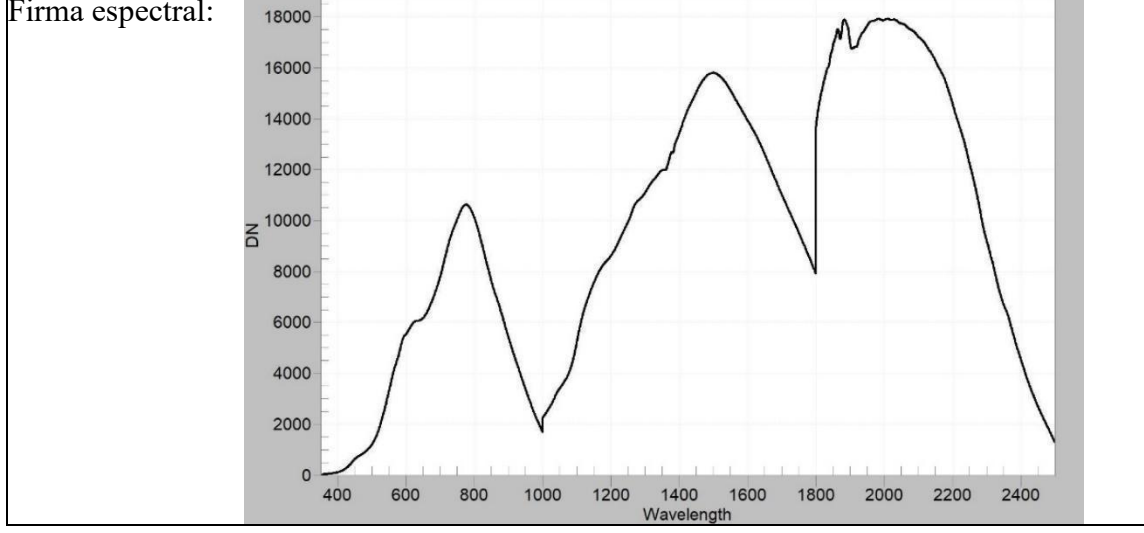
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Sílice + Nontronita + Montmorillonita + Carbonato



Muestra: 20250507_M34	Coordenada norte: 7023896	Coordenada este: 404633	Cota (m s.n.m.): 2093
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Wollastonita, biotita, grosularia, epidota, andradita, calcita y sílice

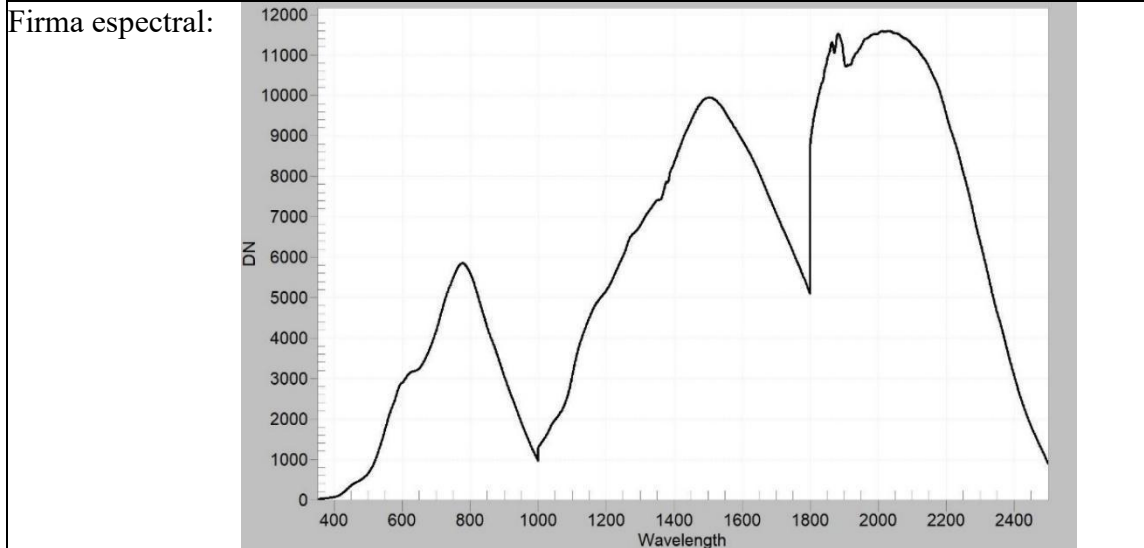
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita + Nontronita + Carbonato



Muestra: 20250507_M35	Coordenada norte: 7023979	Coordenada este: 404496	Cota (m s.n.m.): 2074
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Andradita

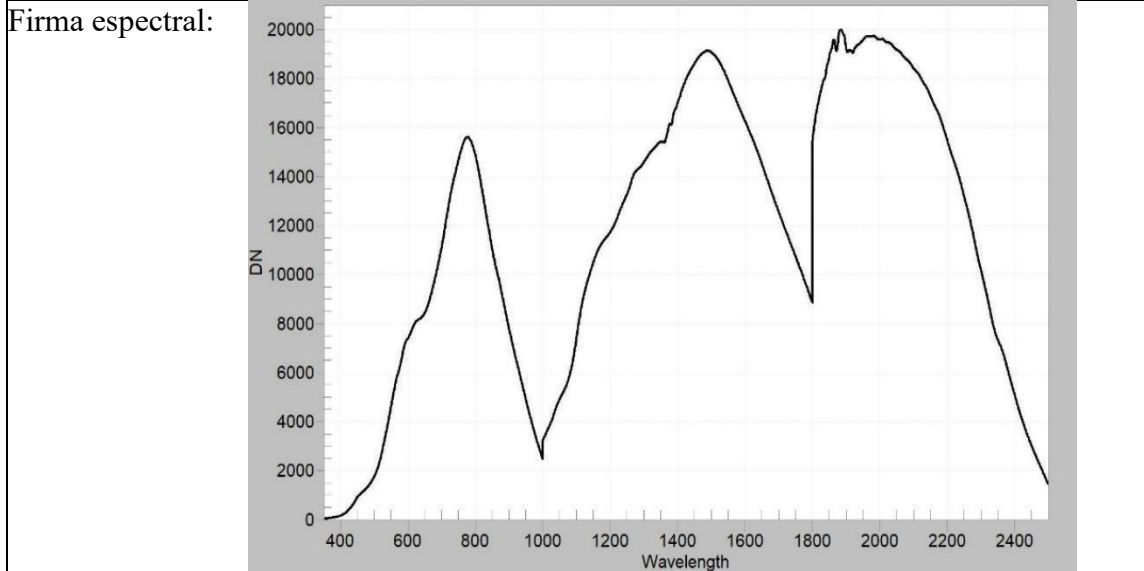
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita + Nontronita + Carbonato



Muestra: 20250507_M36	Coordenada norte: 7023171	Coordenada este: 405086	Cota (m s.n.m.): 2065
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectados mediante SAM: Andradita

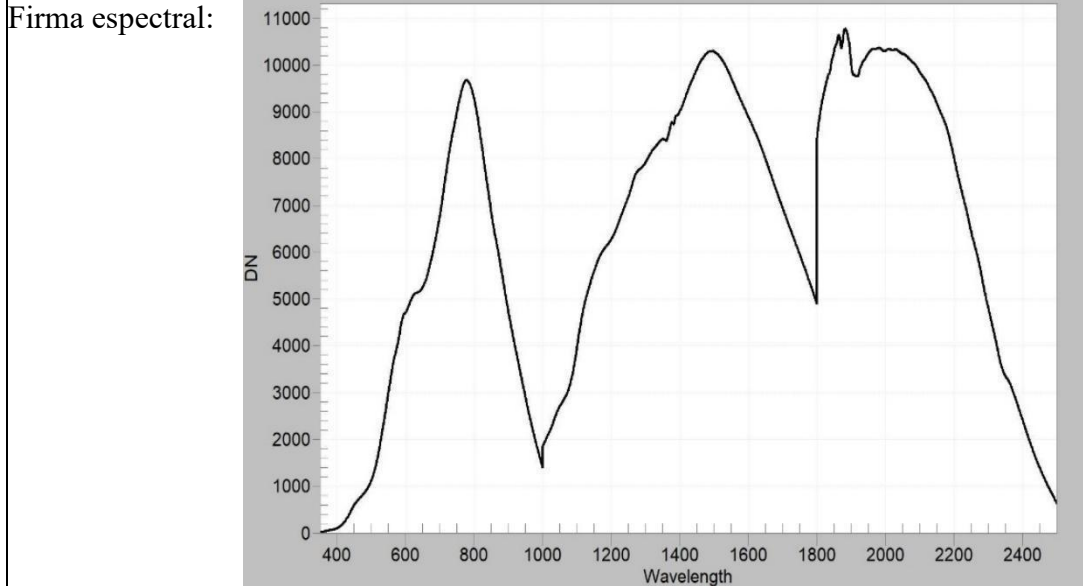
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Sílice + Montmorillonita + Calcita



Muestra: 20250507_M37	Coordenada norte: 7023329	Coordenada este: 404828	Cota (m s.n.m.): 1996
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectados mediante SAM: Andradita

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Calcita + Montmorillonita

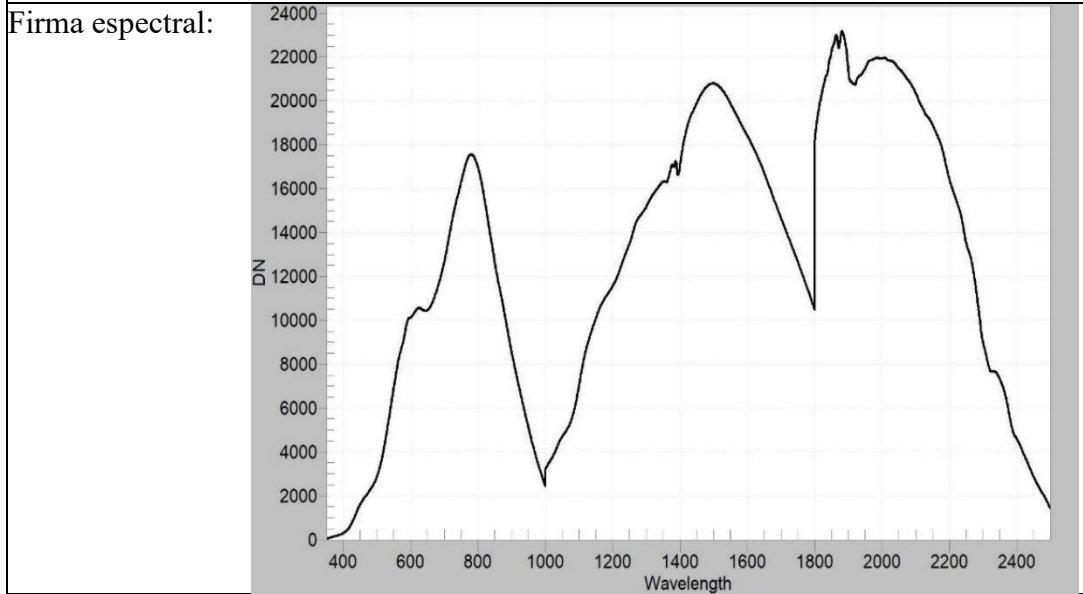


Muestra: 20250507_M38	Coordenada norte: 7022708	Coordenada este: 405116	Cota (m s.n.m.): 2028
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Illita

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Actinolita +

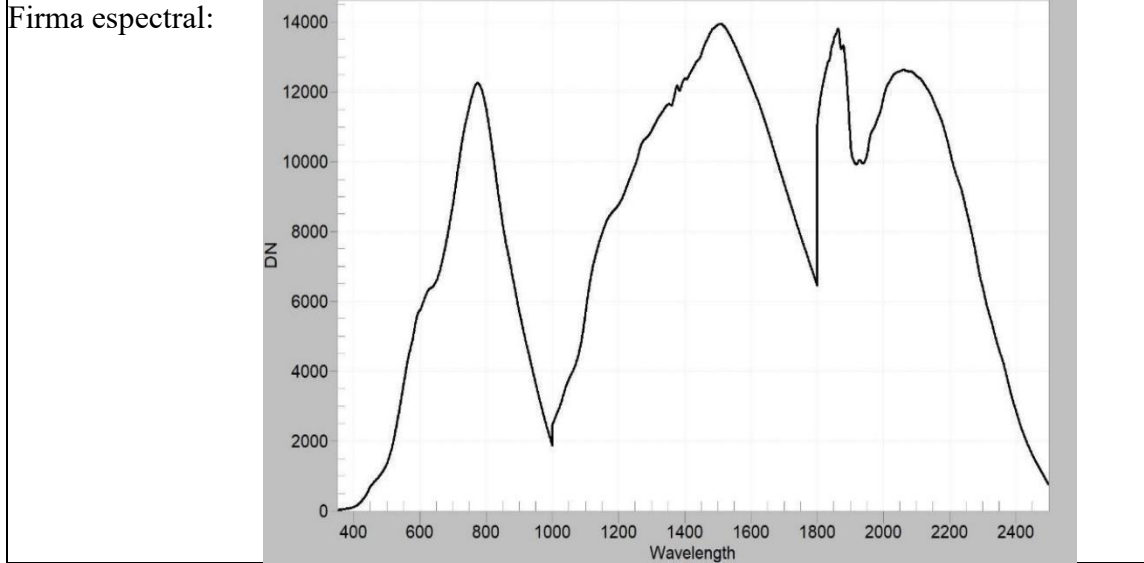
Montmorillonita



Muestra: 20250507_M39	Coordenada norte: 7023178	Coordenada este: 404501	Cota (m s.n.m.): 2045
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Grosularia, epidota y andradita

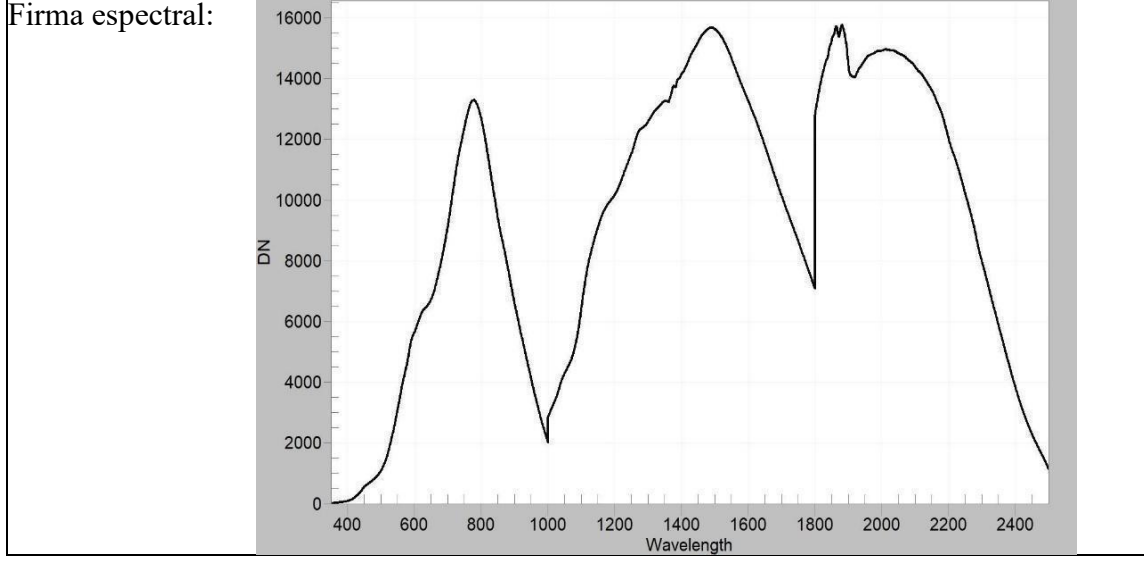
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Prehnita +
Montmorillonita + Yeso



Muestra: 20250507_M40	Coordenada norte: 7022649	Coordenada este: 404250	Cota (m s.n.m.): 1997
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Illita

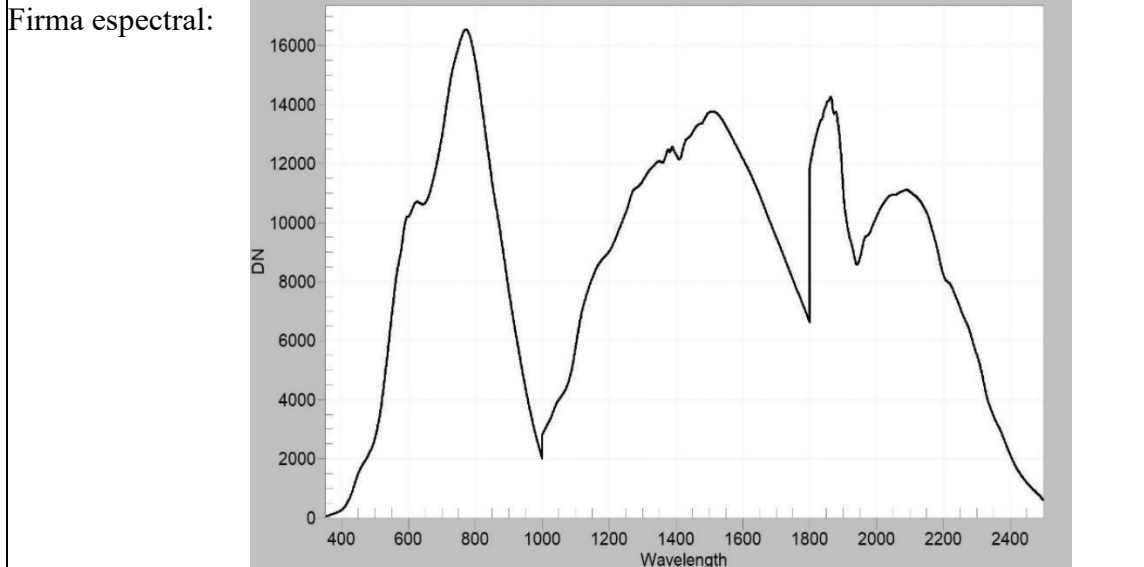
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita +
Nontronita



Muestra: 20250507_M41	Coordenada norte: 7023294	Coordenada este: 404115	Cota (m s.n.m.): 1973
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Illita y limonita

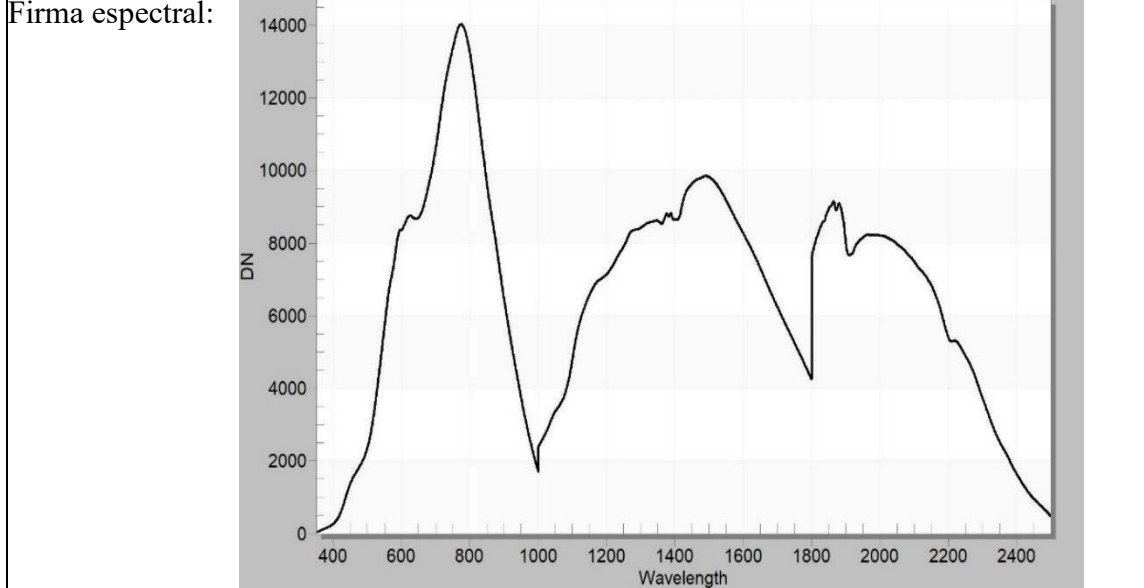
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita + CloritaFeMg + Yeso + AlunitaK?



Muestra: 20250710_M42	Coordenada norte: 7024266	Coordenada este: 403327	Cota (m s.n.m.): 1948
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Illita

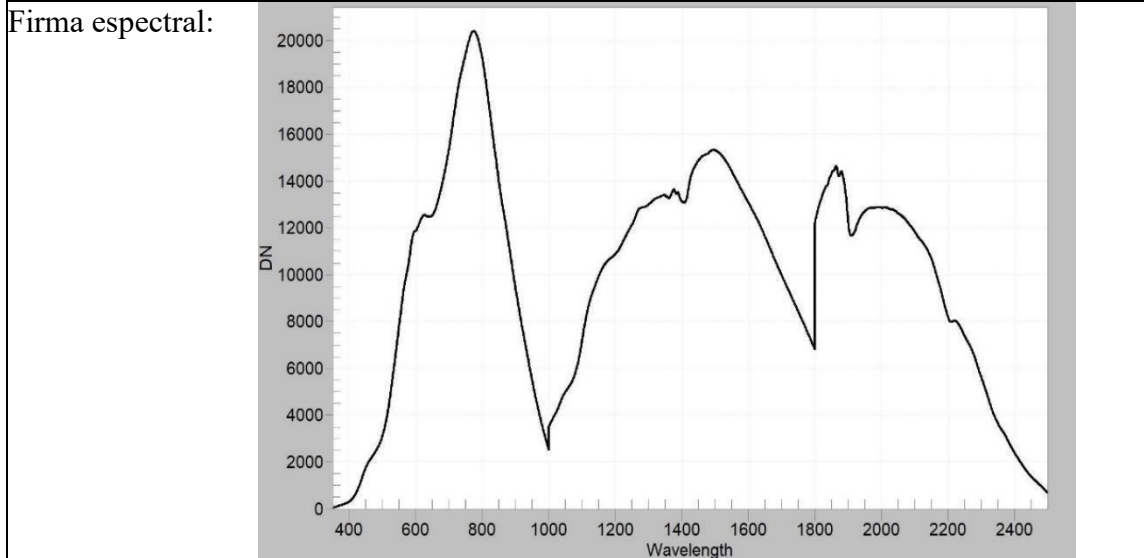
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Calcita + Montmorillonita



Muestra: 20250710_M43	Coordenada norte: 7025487	Coordenada este: 402780	Cota (m s.n.m.): 1972
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Dolomita

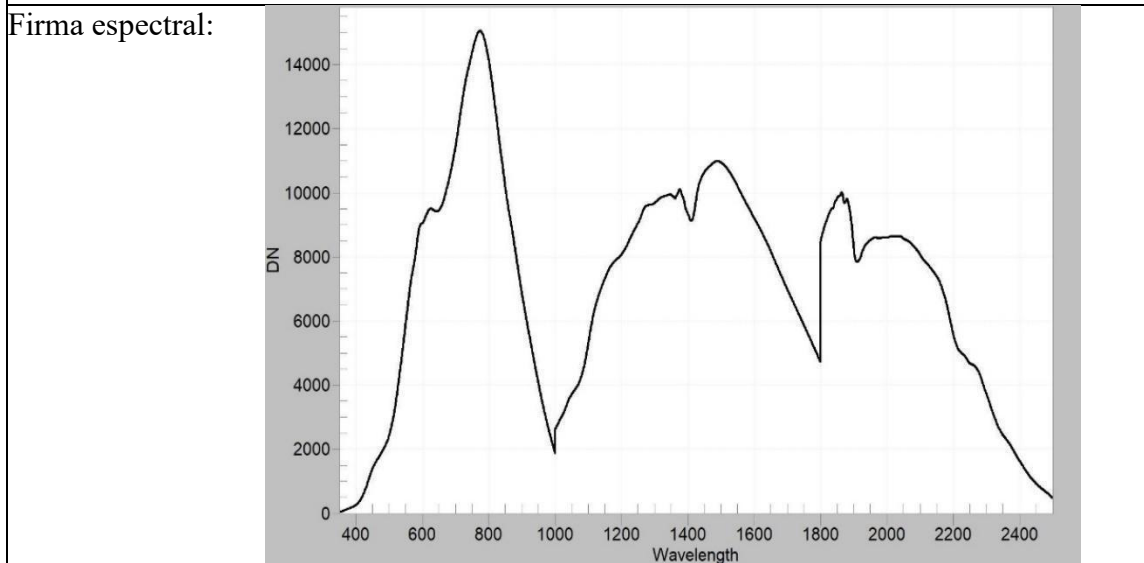
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita + CloritaFeMg + Calcita



Muestra: 20250710_M44	Coordenada norte: 7025441	Coordenada este: 402620	Cota (m s.n.m.): 2003
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Dickita, pirofilita, caolinita, diaspora y alunita

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita + Illita + CloritaFeMg

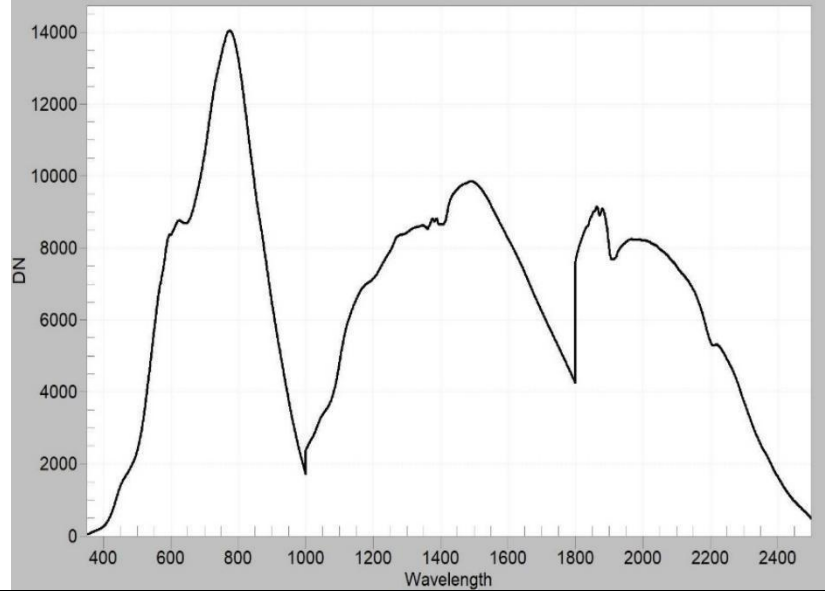


Muestra: 20250710_M45	Coordenada norte: 7025472	Coordenada este: 402623	Cota (m s.n.m.): 2009
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Dickita, caolinita, diaspora, alunita y pirofilita

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita + CloritaFeMg

Firma espectral:

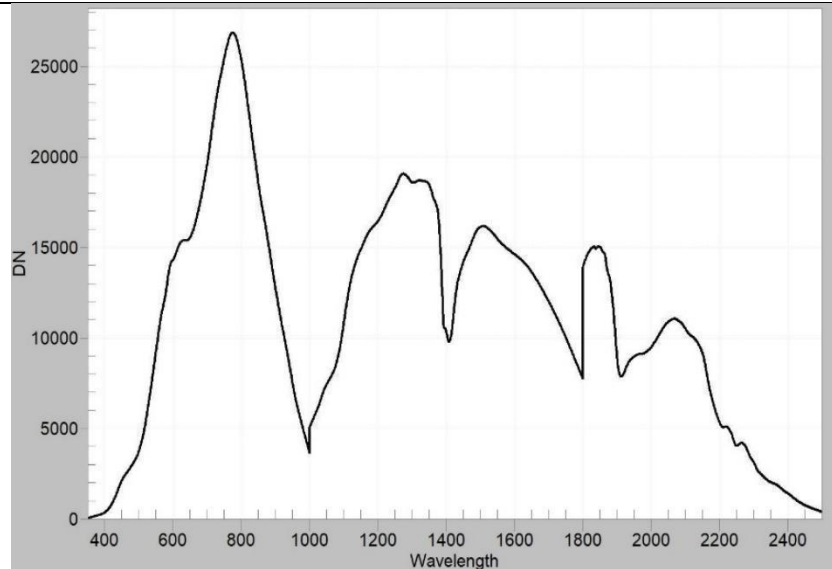


Muestra: 20250710_M46	Coordenada norte: 7025398	Coordenada este: 402615	Cota (m s.n.m.): 2000
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Diaspora y alunita

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita + Illita + CloritaFeMg + Carbonato

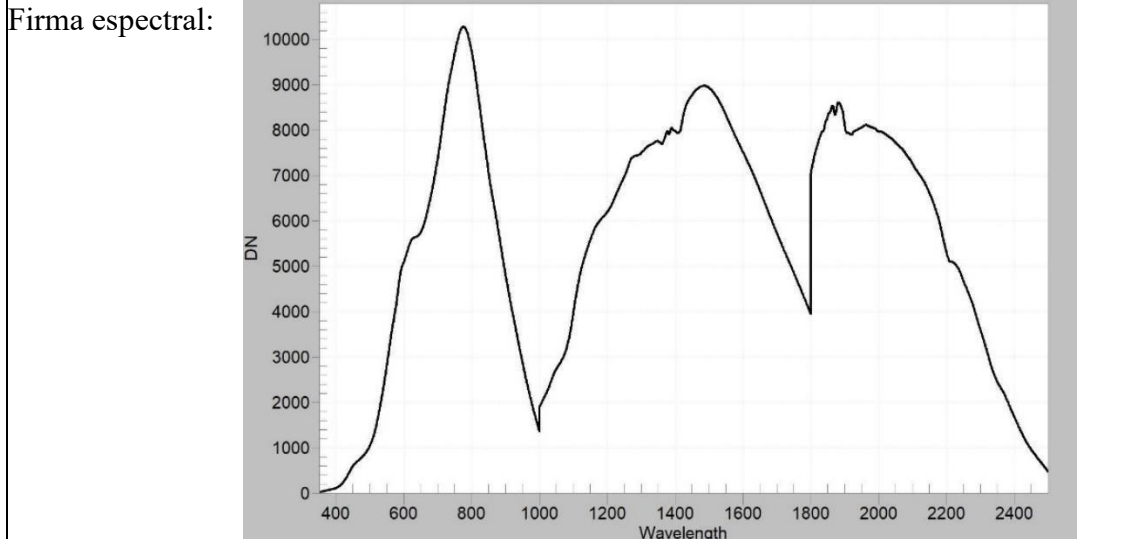
Firma espectral:



Muestra: 20250710_M47	Coordenada norte: 7025275	Coordenada este: 402992	Cota (m s.n.m.): 1911
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Tremolita, vesuvianita y hornblenda

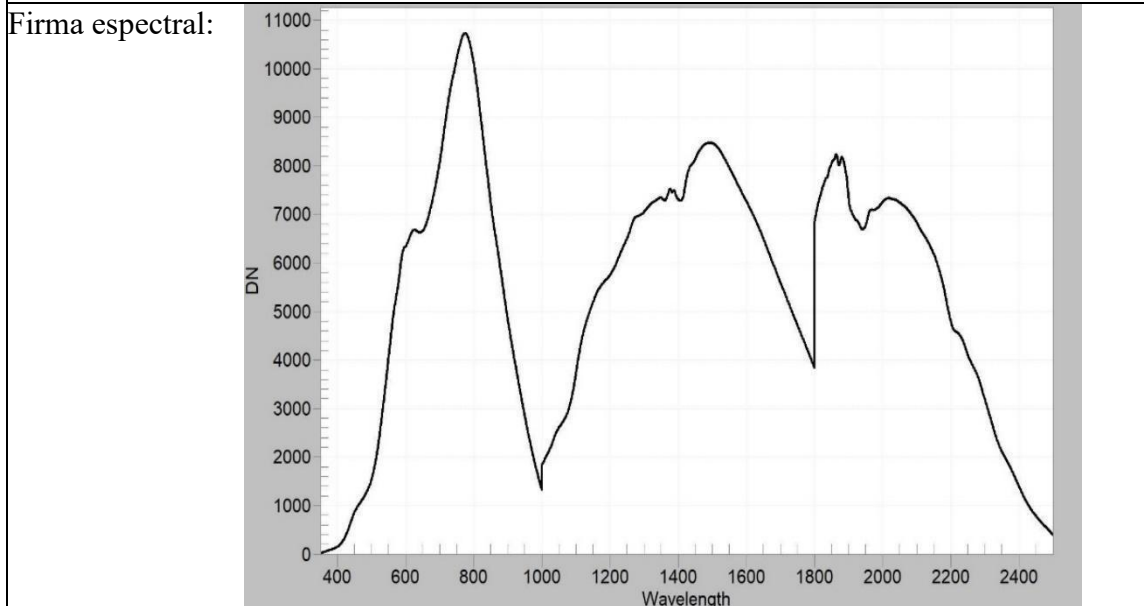
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Illita + Montmorillonita + Carbonato + CloritaFeMg + Goethita



Muestra: 20250710_M48	Coordenada norte: 7025210	Coordenada este: 402970	Cota (m s.n.m.): 1901
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Vesuvianita, hornblenda y tremolita

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita + Illita + CloritaFeMg + Yeso

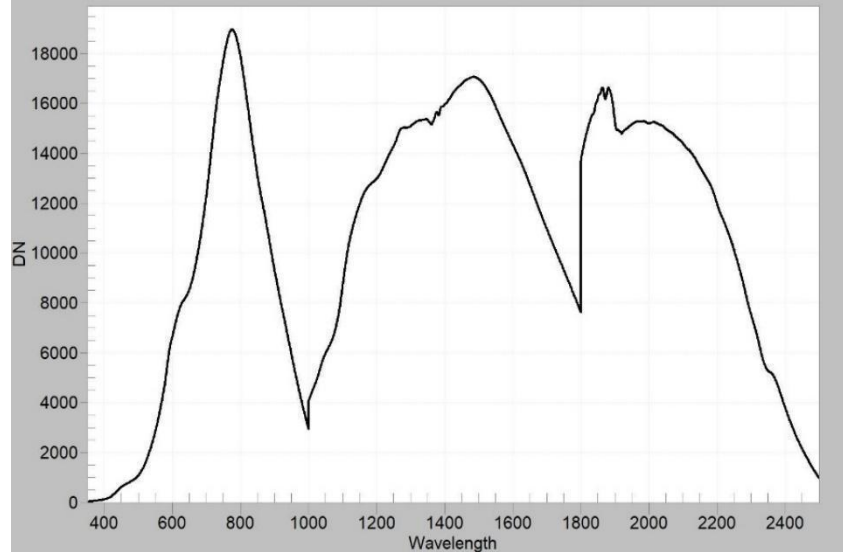


Muestra: 20250710_M49	Coordenada norte: 7025076	Coordenada este: 403074	Cota (m s.n.m.): 1886
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Tremolita, vesuvianita y hornblenda

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Sílice + Montmorillonita + Calcita

Firma espectral:

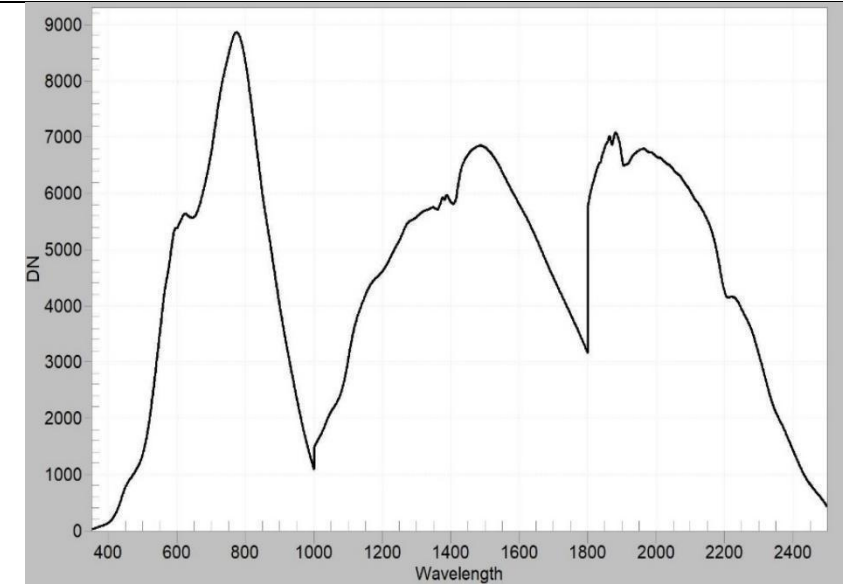


Muestra: 20250710_M50	Coordenada norte: 7024645	Coordenada este: 403326	Cota (m s.n.m.): 1893
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Vesuvianita, hornblenda y tremolita

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Illita + Montmorillonita + CloritaFeMg + Yeso

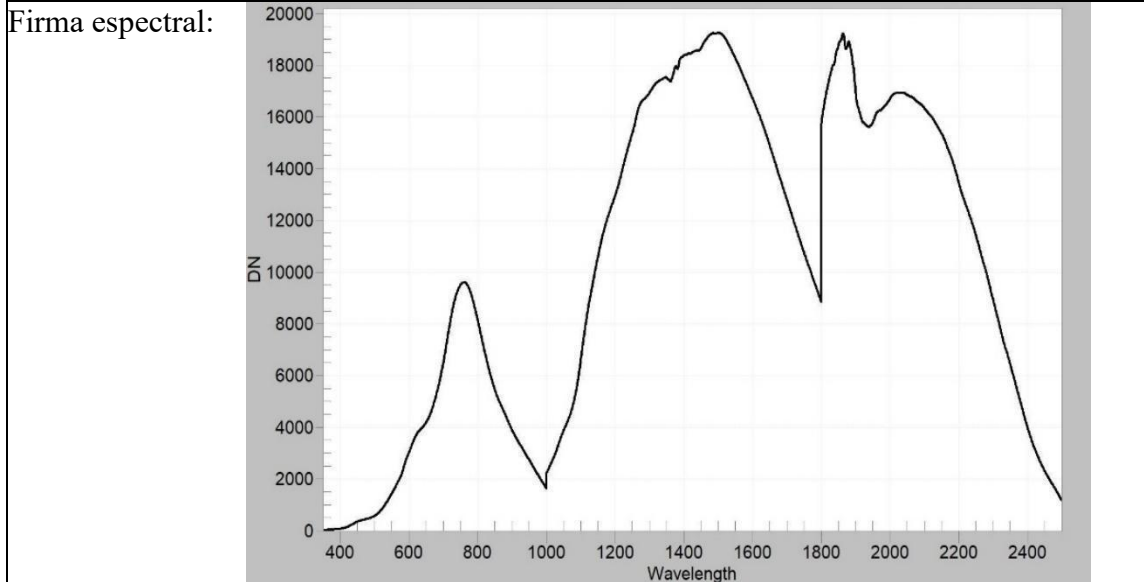
Firma espectral:



Muestra: 20250710_M51	Coordenada norte: 7024613	Coordenada este: 403366	Cota (m s.n.m.): 1894
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Tremolita, vesuvianita y hornblenda

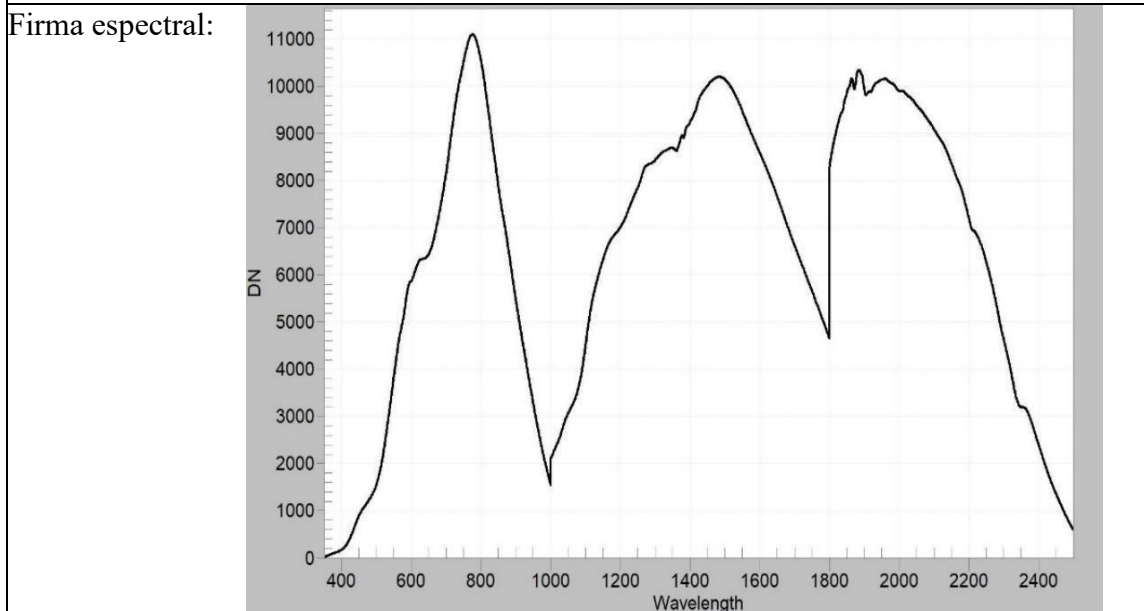
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Sílice + Yeso + Hematita



Muestra: 20250710_M52	Coordenada norte: 7024845	Coordenada este: 402800	Cota (m s.n.m.): 1898
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Illita

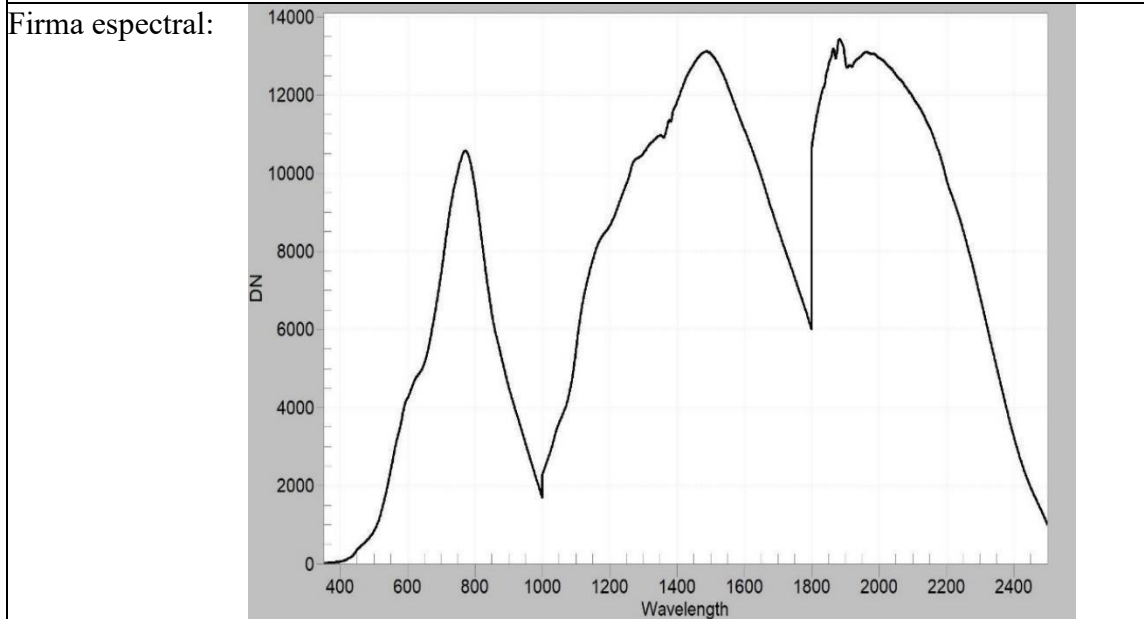
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Calcita + Montmorillonita + Illita



Muestra: 20250710_M53	Coordenada norte: 7022704	Coordenada este: 403152	Cota (m s.n.m.): 2080
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Vesuvianita, hornblenda y sílice

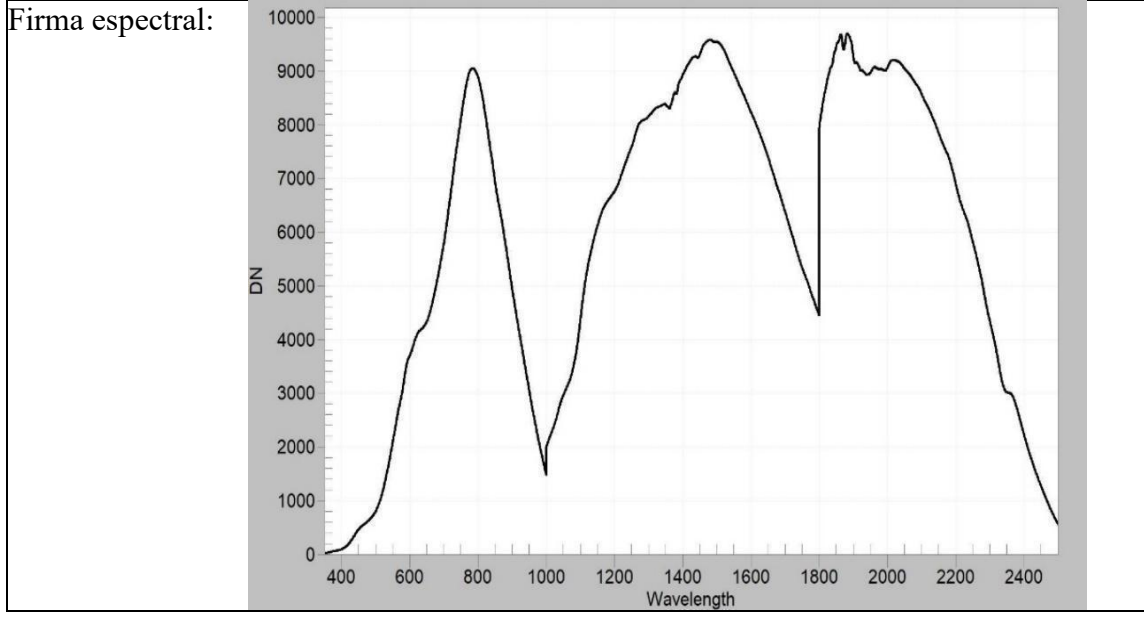
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Sílice



Muestra: 20250716_M54	Coordenada norte: 7025204	Coordenada este: 405313	Cota (m s.n.m.): 2029
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Tremolita, vesuvianita y hornblenda

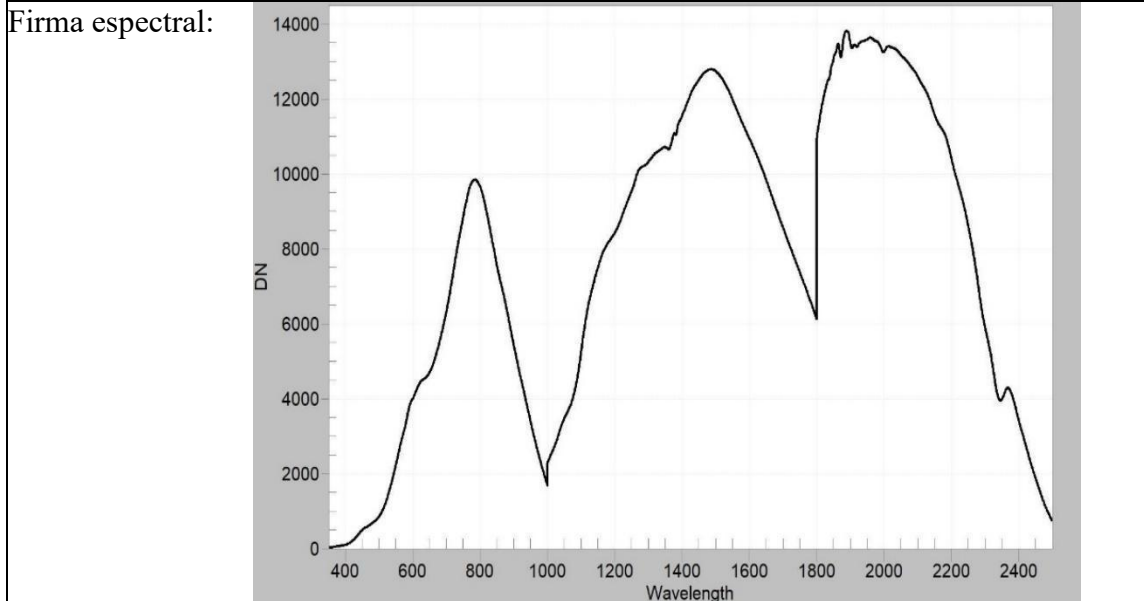
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Yeso + Calcita



Muestra: 20250716_M55	Coordenada norte: 7025244	Coordenada este: 405314	Cota (m s.n.m.): 2035
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Tremolita, vesuvianita y hornblenda

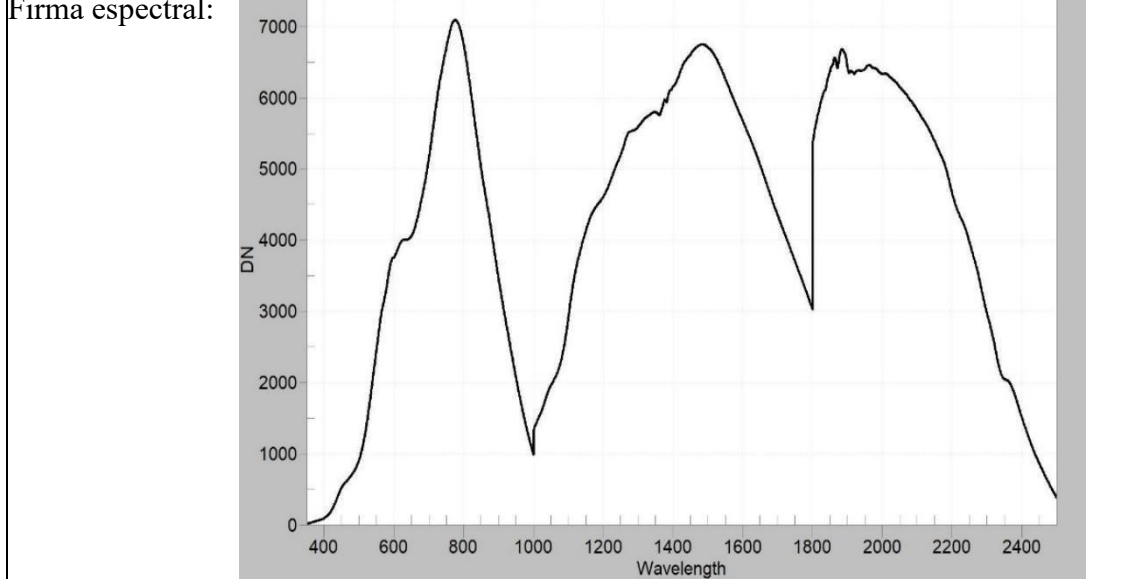
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Calcita



Muestra: 20250716_M56	Coordenada norte: 7024860	Coordenada este: 405236	Cota (m s.n.m.): 2026
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Vesuvianita y hornblenda

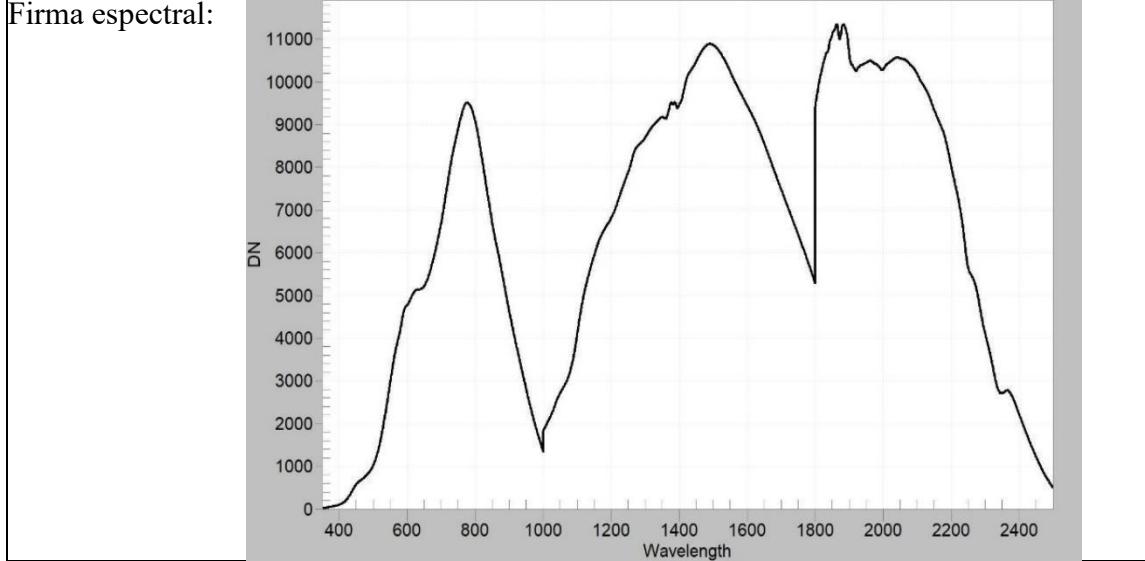
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Calcita + Montmorillonita + Illita + Yeso + Goethita



Muestra: 20250716_M57	Coordenada norte: 7024943	Coordenada este: 405169	Cota (m s.n.m.): 2031
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Illita

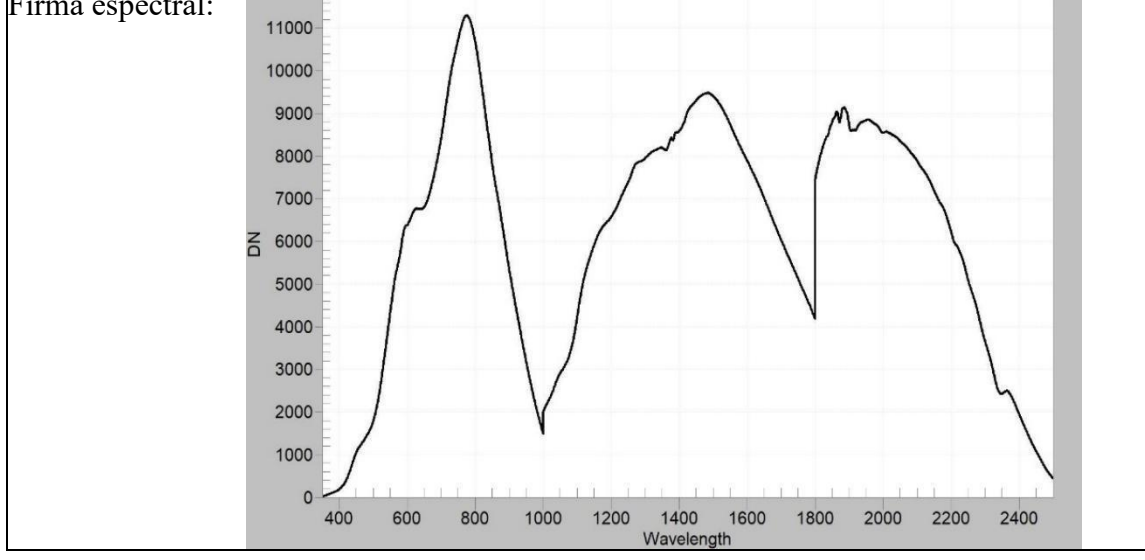
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Calcita + CloritaFeMg + Goethita



Muestra: 20250716_M58	Coordenada norte: 7024981	Coordenada este: 404656	Cota (m s.n.m.): 2082
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Illita

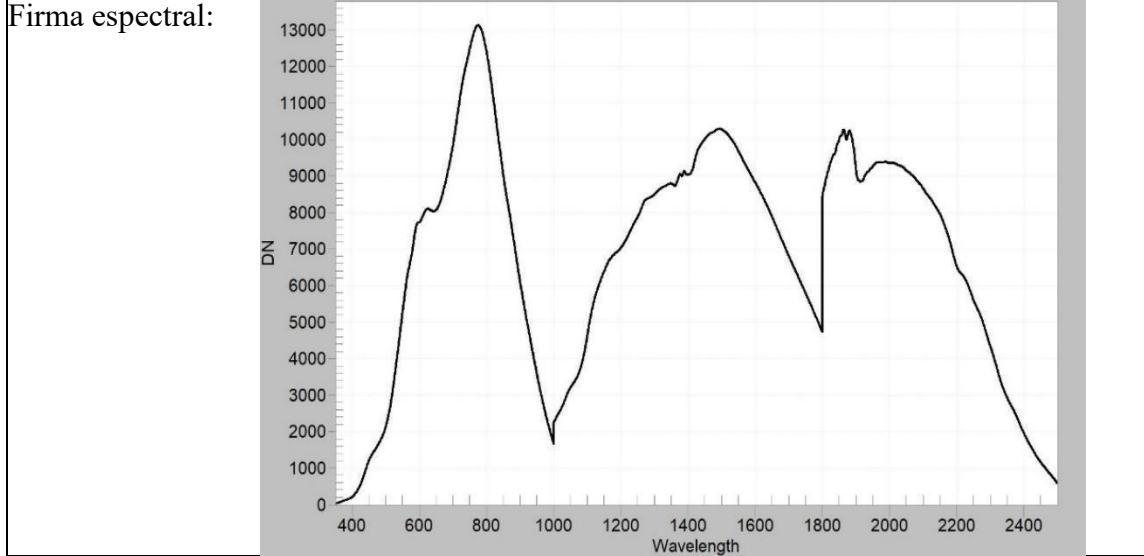
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Calcita + Montmorillonita + Illita



Muestra: 20250716_M59	Coordenada norte: 7025068	Coordenada este: 404790	Cota (m s.n.m.): 2061
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Dolomita y alunita

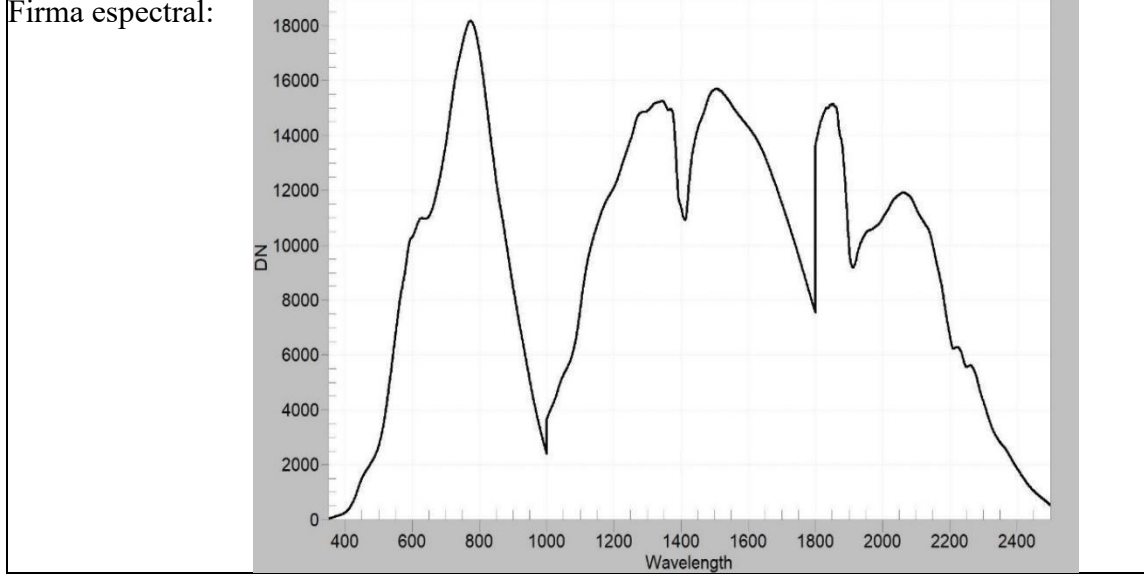
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: CloritaFeMg + Montmorillonita



Muestra: 20250716_M60	Coordenada norte: 7025087	Coordenada este: 404791	Cota (m s.n.m.): 2052
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Alunita, dickita y pirofilita

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita + CloritaMg

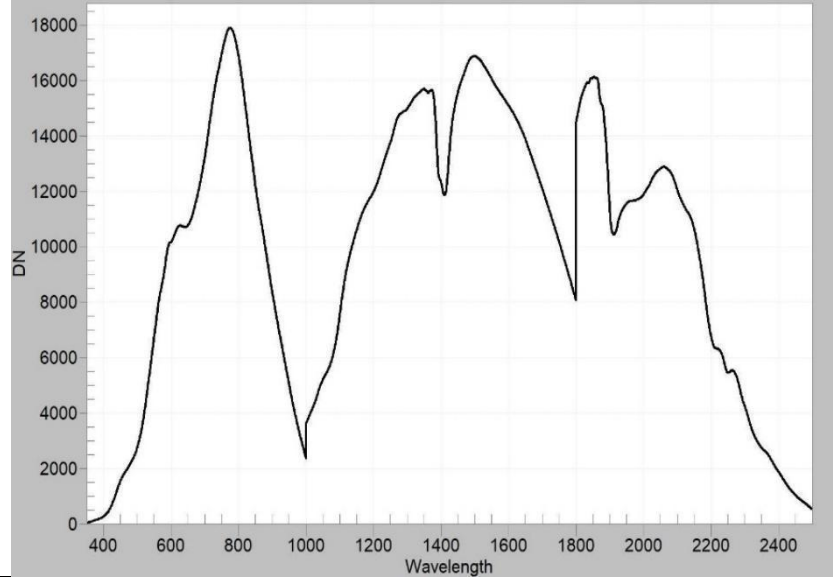


Muestra: 20250716_M61	Coordenada norte: 7025094	Coordenada este: 404781	Cota (m s.n.m.): 2051
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Dickita, caolinita, pirofilita, diaspora y alunita

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita + Illita + CloritaMg

Firma espectral:

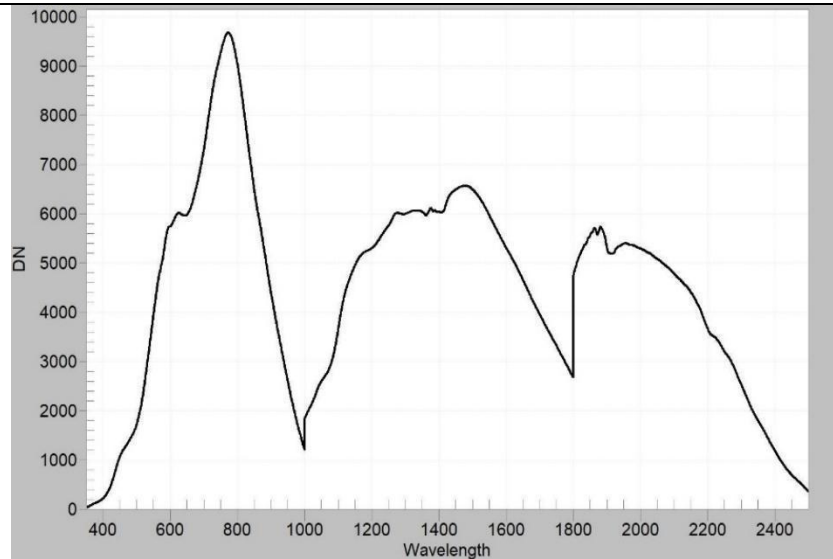


Muestra: 20250716_M62	Coordenada norte: 7025093	Coordenada este: 404784	Cota (m s.n.m.): 2051
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Dickita, caolinita, pirofilita, diaspora y alunita

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita + CloritaMg

Firma espectral:

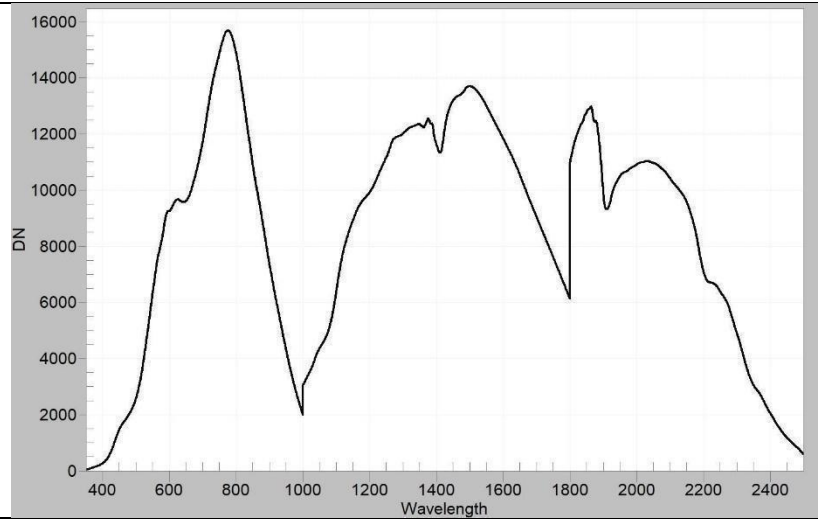


Muestra:	Coordenada norte:	Coordenada este:	Cota (m s.n.m.):
20250716_M63	7025154	405028	2005

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Sericita, dickita, caolinita, pirofilita, diaspora y alunita

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita + CloritaFe

Firma espectral:

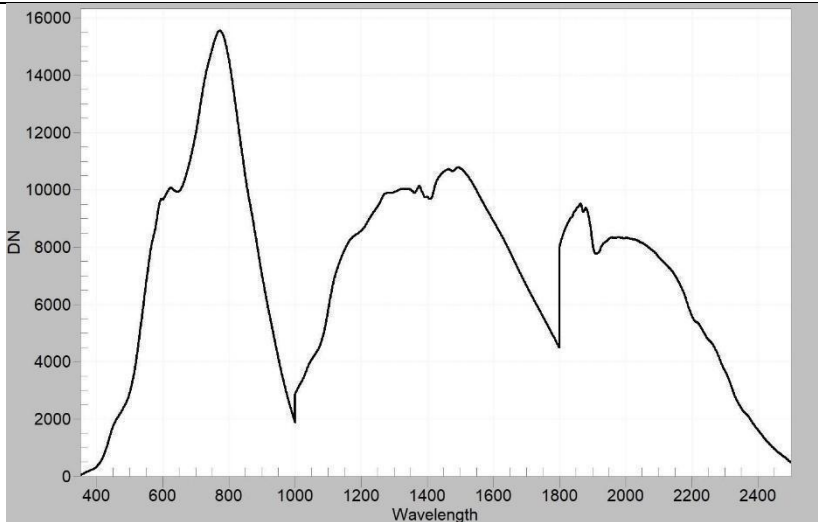


Muestra:	Coordenada norte:	Coordenada este:	Cota (m s.n.m.):
20250716_M64	7025166	405028	2006

Mineral(es) detectados mediante SAM: Sericita, dickita, caolinita, pirofilita, diaspora y alunita

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita + Prehnita + CloritaMg

Firma espectral:

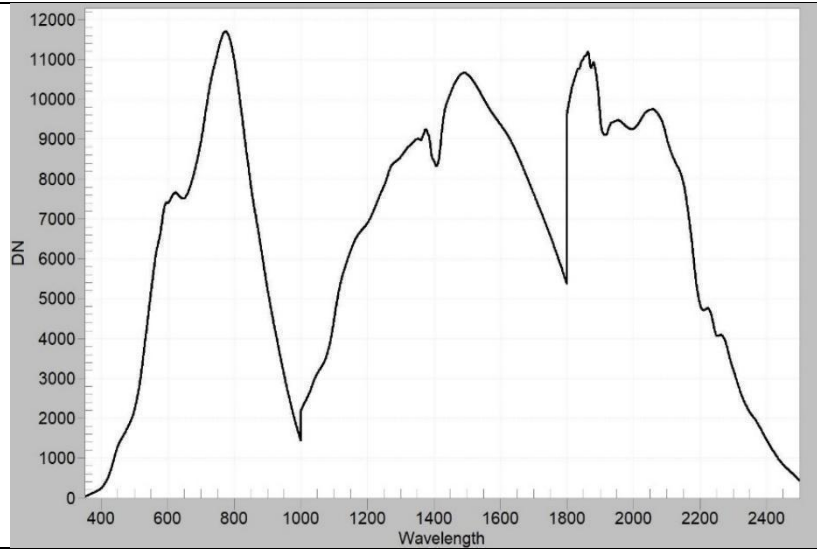


Muestra: 20250716_M65	Coordenada norte: 7025171	Coordenada este: 405046	Cota (m s.n.m.): 2005
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Sericita, dickita, caolinita, pirofilita, diaspora y alunita

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: CloritaMg + Illita + Montmorillonita

Firma espectral:

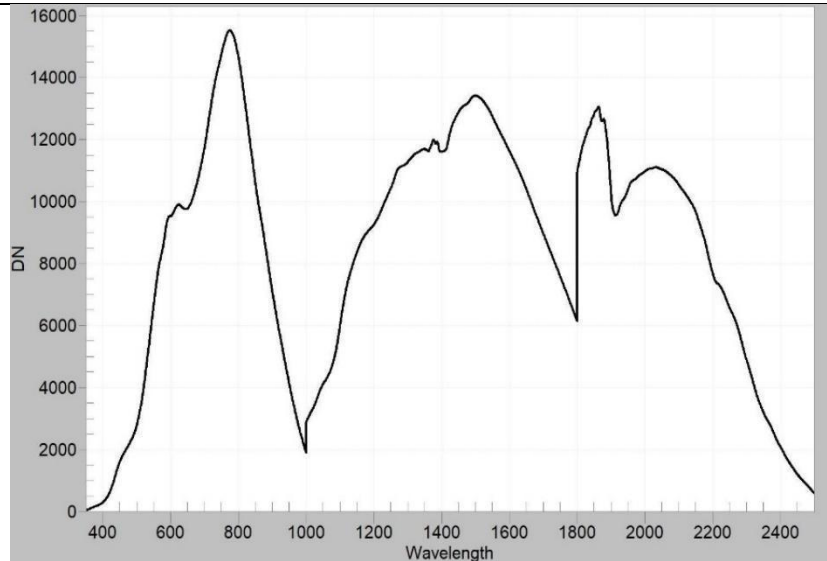


Muestra: 20250716_M66	Coordenada norte: 7025416	Coordenada este: 405016	Cota (m s.n.m.): 1988
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Dolomita

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita + CloritaMg + Prehnita

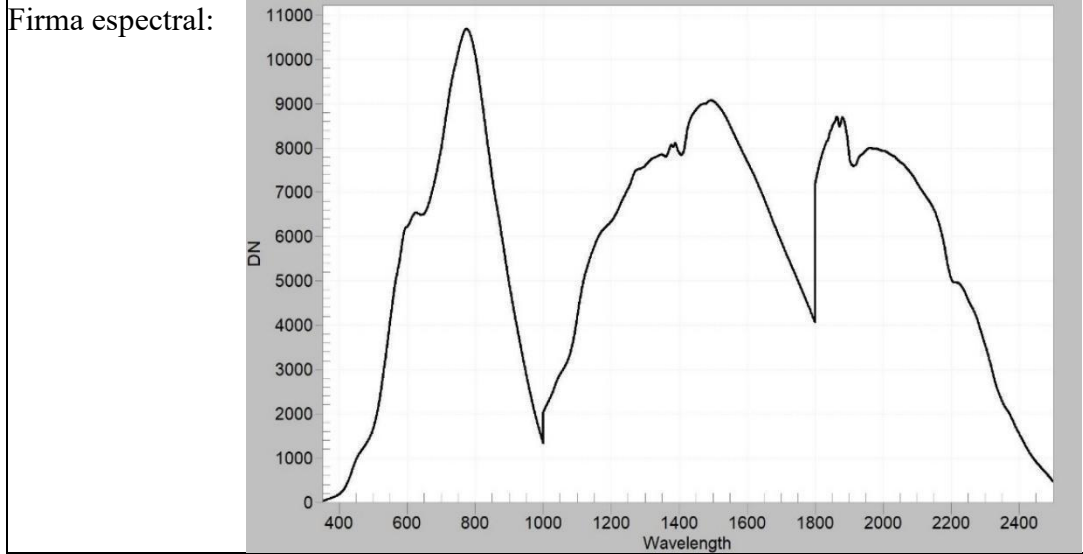
Firma espectral:



Muestra: 20250716_M67	Coordenada norte: 7025740	Coordenada este: 404129	Cota (m s.n.m.): 1923
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Dolomita

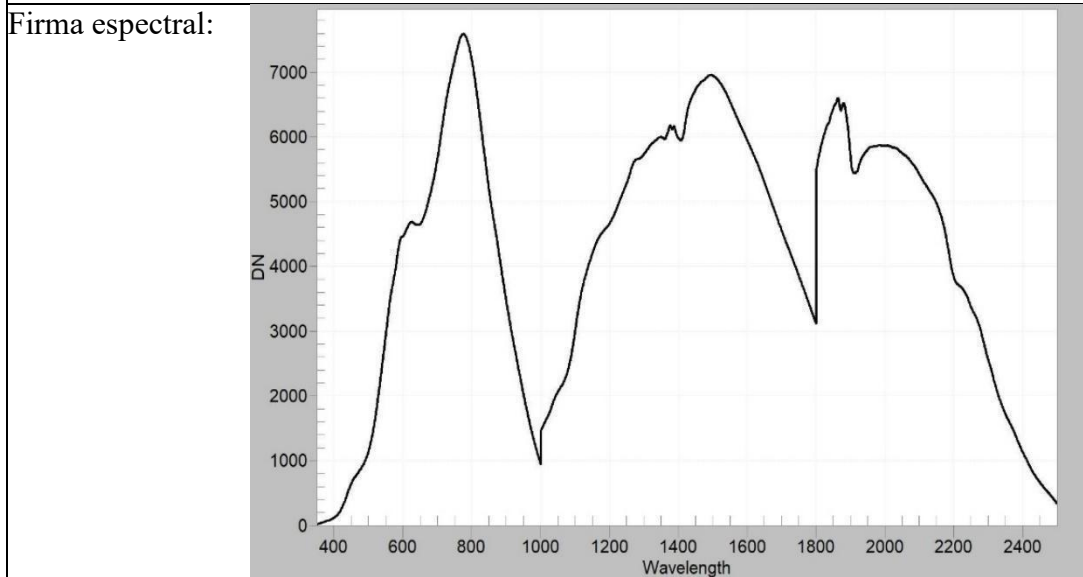
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita + Illita + CloritaMg + Prehnita



Muestra: 20250716_M68	Coordenada norte: 7025242	Coordenada este: 404059	Cota (m s.n.m.): 1947
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Dolomita

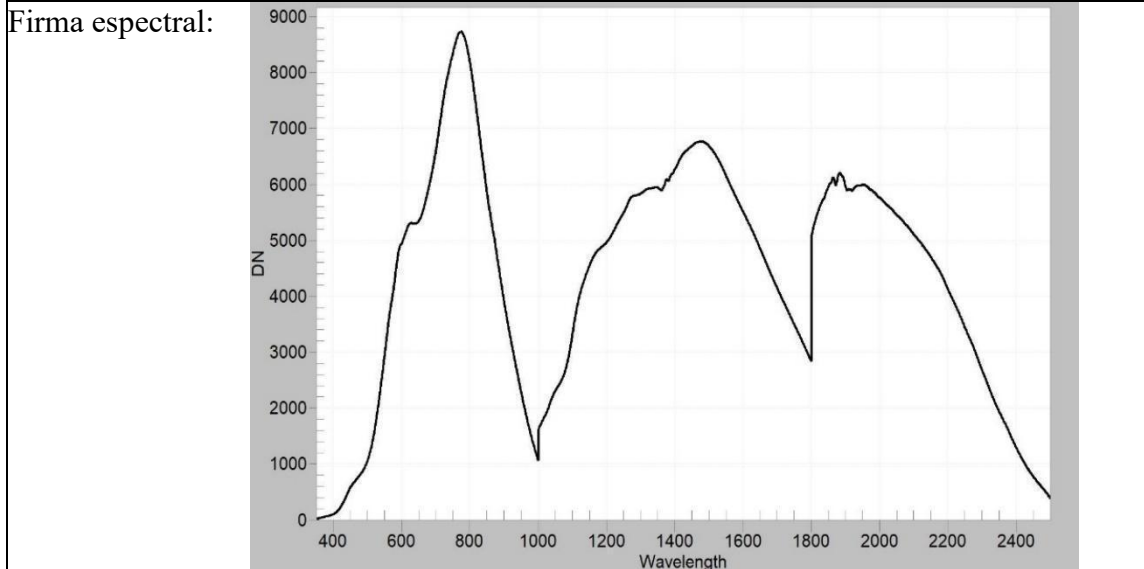
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita + Illita + CloritaMg



Muestra: 20250716_M69	Coordenada norte: 7024978	Coordenada este: 404195	Cota (m s.n.m.): 2015
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Vesuvianita y hornblenda

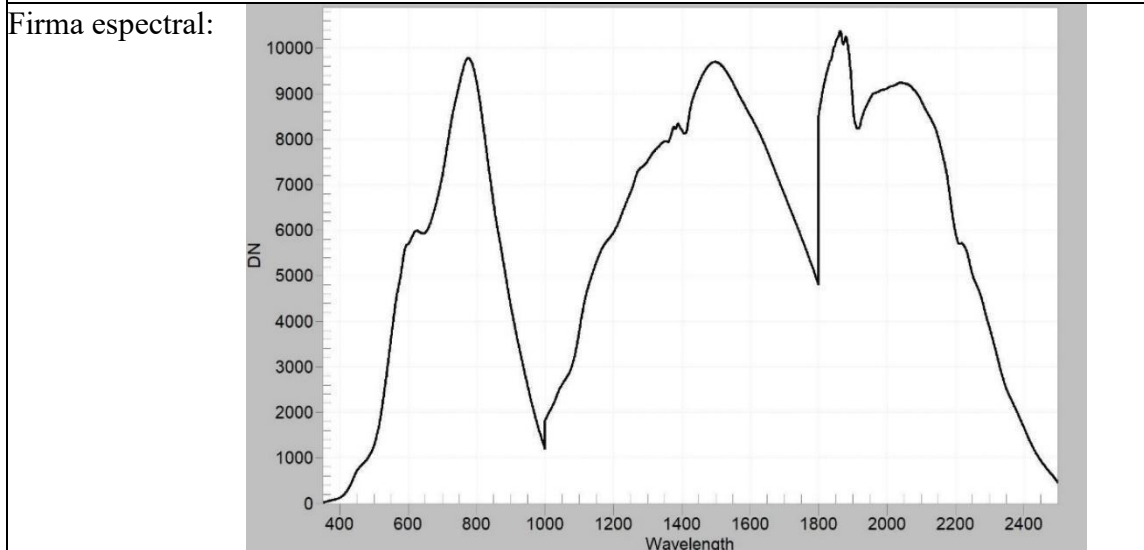
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita + CloritaMg + Carbonato



Muestra: 20250716_M70	Coordenada norte: 7025767	Coordenada este: 404994	Cota (m s.n.m.): 1998
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Sericita, pirofilita, diaspora y dolomita

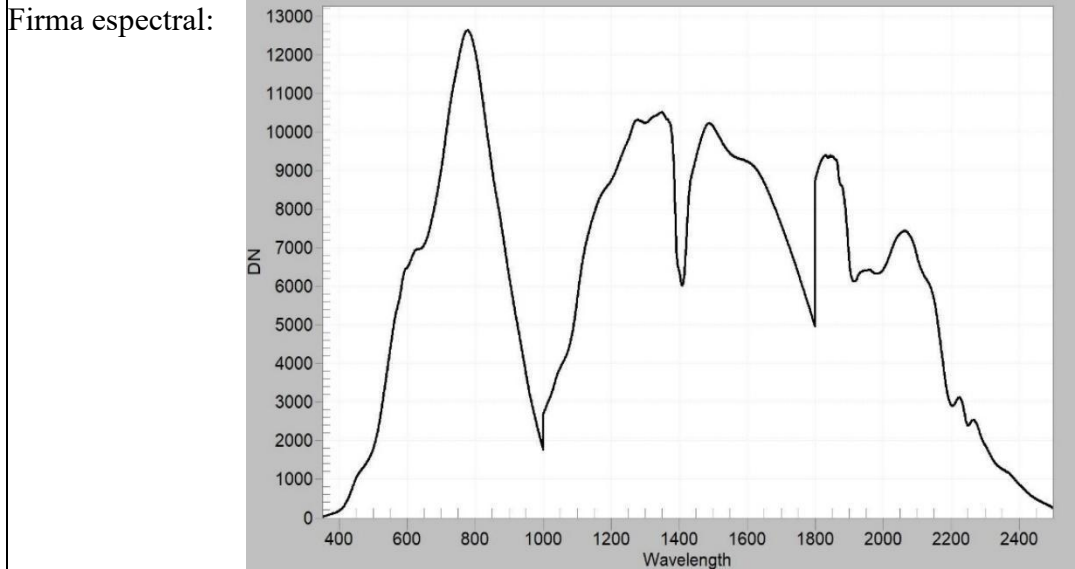
Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita + Illita + CloritaFeMg



Muestra: 20250716_M71	Coordenada norte: 7025764	Coordenada este: 405016	Cota (m s.n.m.): 2002
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Sericita, pirofilita, diaspora y dolomita

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Illita + Montmorillonita + CloritaMg



Muestra: 20250716_M72	Coordenada norte: 7025800	Coordenada este: 405024	Cota (m s.n.m.): 2004
--------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------

Mineral(es) detectado(s) mediante SAM: Sericita, pirofilita, diaspora, dolomita y alunita

Resultado de mineral(es) identificado(s) por ASD TerraSpec: Montmorillonita + Illita + CloritaMg

