

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS PROFESIONAL

**CARACTERIZACIÓN DE ALTERACIONES HIDROTERMALES MEDIANTE
IMÁGENES ASTER Y SENTINEL 2, EN LA PROVINCIA DEL SANTA
DEPARTAMENTO DE ANCASH**

Para optar el Título Profesional de:
INGENIERO GEÓLOGO

Presentado por
Bach. César Raphael Cabellos Roncal

Asesor
M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca

Cajamarca, Perú
2022

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. Investigador: **CABELLOS RONCAL, CÉSAR RAPHAEL**
DNI: 46410802
Escuela Profesional: Ingeniería Geológica
2. Asesor: Arapa Vilca Victor Ausberto
Facultad: Ingeniería
3. Grado académico o título profesional
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor
4. Tipo de Investigación:
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación: **CARACTERIZACIÓN DE ALTERACIONES HIDROTERMALES MEDIANTE IMÁGENES ASTER Y SENTINEL 2, EN LA PROVINCIA DEL SANTA DEPARTAMENTO DE ANCASH**
6. Fecha de evaluación: 21-07-2022
7. Software antiplagio: TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: 5%
9. Código Documento: D142253945
10. Resultado de la Evaluación de Similitud: 5 %
 APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 11 de junio 2024



FIRMA DEL ASESOR

Nombres y Apellidos **VICTOR ARAPA VILCA**

DNI: **29552145**



Firmado digitalmente por:
FERNANDEZ LEON Yvonne
Katherine FAU 20148258601 soft
Motivo: Soy el autor del
documento
Fecha: 11/06/2024 13:50:31-0500

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI

AGRADECIMIENTO

Son muchas las personas que han contribuido en el desarrollo de este trabajo, que sin ellas no habría sido posible concluirlo.

Agradezco a la Universidad Nacional de Cajamarca, donde conocí esta maravillosa ciencia que es la geología, donde me he formado y he recibido el apoyo necesario para el desarrollo de esta investigación.

A los docentes de la escuela académico profesional de ingeniería geológica, por todos los conocimientos impartidos durante mi paso por esta formidable institución. Particularmente al ingeniero Víctor Arapa, asesor de esta tesis, quien fue el primero que creyó en este proyecto y me apoyo de manera personal y me alentó para que concluyera esta investigación.

DEDICATORIA

Para Héctor y Catalina.

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: A) Espectro Electromagnético mostrando la región UV, visible, infrarrojo y de microondas de radar. Se puede notar el rango de reflectividad entrante del sol (en amarillo) y emitido por la tierra (en rojo). B) Rangos del espectro electromagnético desde los rayos gamma hasta las ondas de radio se puede notar la relación inversa entre la longitud de onda (m) y la frecuencia en (Hz) (modificado de Smith, 2012).	6
Figura 2: Espectro Electromagnético mostrando la longitud de onda del rango visible (modificado de Smith 2012).	7
Figura 3: Espectro electromagnético del rango infrarrojo (IR Cercano, IR Medio, IR Lejano), nótese la delimitación del rango IR reflejado (radiación EM reflejada, proveniente del sol) e IR térmico (radiación EM emitida por la tierra) (modificado de Smith 2012).	7
Figura 4: Proceso de interacción entre la materia y la energía EM, la línea horizontal representa el límite entre dos materiales (modificado de Smith, 2012).	8
Figura 5: Típica interacción de la radiación electromagnética en la atmósfera y la superficie de la tierra (modificado de Smith 2012).	11
Figura 6: Variación en la transmisión atmosférica respecto a la longitud de onda de la radiación EM, debido a la absorción selectiva por los gases atmosféricos. Solo los rangos de longitud de onda con valores de transmisión moderados a altos son adecuados para el uso en la detección remota (Modificado Smith 2012).	12
Figura 7: Espectros de laboratorio de alteraciones hidrotermales. A) Espectros de laboratorio de minerales arcillosos. B) Espectros de laboratorio, adaptado a las bandas del Radiómetro de Reflexión y Emisión térmica avanzada (ASTER) (Beiranvand & Hashim, 2014)	15
Figura 8. Imágenes con distinta resolución espacial: A) 2m/pixel y B) 0.5 m/pixel.	17

	Pág.
Figura 9: Espectro EM con la Comparación de las bandas espectrales de los principales sistemas de teledetección SENTINEL 2, LANDSAT 8, LANDSAT 7, ASTER Y MODIS.	19
Figura 10. Resolución Radiométrica: Comparación en los niveles de grises o niveles digitales (ND) de una imagen. A mayor resolución radiométrica mayor diferenciación en las tonalidades grises de la imagen.	20
Figura 11. Nave espacial TERRA mostrando sus principales instrumentos, incluido el instrumento ASTER con sus tres subsistemas separados (VNIR, SWIR, TIR) (NASA).	25
Figura 12. El instrumento ASTER antes de lanzamiento (Abrams 2002).	26
Figura 13 Espectro de reflectancia de laboratorio de importantes minerales de alteración hidrotermal, se muestran las bandas ASTER en la figura. (modificado de Honarmand et al. 2011).....	27
Figura 14. Modelo del satélite Sentinel-2, usado para monitoreo de tierra y mar, mapeo de desastres naturales, observaciones de hielo marino, detección de barcos.	28
Figura 15. Ubicación y accesibilidad.	32
Figura 16. A) Imagen ASTER VNIR sin corrección radiométrica B) Imagen ASTER VNIR con corrección radiométrica.	35
Figura 17. Apilamiento de Capas de imagen ASTER	36
Figura 18. A) Combinación de bandas ASTER 3,2,1 resaltando en tonalidades rojas la presencia de vegetación. B) Enmascaramiento de vegetación en tonalidades grises.....	38
Figura 19. Plano de abundancia de mineral de Alunita en magenta.	39
Figura 20. Plano de abundancia de mineral de Caolinita en amarillo.....	40
Figura 21. Plano de abundancia de mineral de Illita en verde.	41
Figura 22. Plano de abundancia de mineral en tonalidades blancas A) Sílice B) SiO ₂ . Generados usando Cociente de bandas de las imágenes ASTER.	42
Figura 23. Apilamiento de capas de la imagen SENTINEL 2, se generó una solo imagen apilada de 10m de resolución usando las bandas 2,3,4 y 8.....	43

Figura 24. A) Combinación de bandas 8,4,2 de imagen SENTINEL 2 resaltando la vegetación en tonalidades rojas B) Enmascaramiento de nubes, vegetación y agua en tonalidades negras.....	44
Figura 25. Plano de abundancia de mineral de Óxidos de Hierro en naranja. Generados usando Análisis de Componentes Principales (ACP) de las imágenes SENTINEL 2.....	45
Figura 26. Mapa geológico regional y dominios estratigráficos (Modificado de Navarro, Rivera y Monge 2010).....	48
Figura 27. Contexto Estructural. (Modificado de Navarro, Rivera y Monge 2010).....	52
Figura 28. Plano de abundancia mineral de alunita (magenta).....	54
Figura 29. Plano de abundancia mineral de caolinita (amarillo).....	55
Figura 30. Plano de abundancia mineral de Illita (verde).....	56
Figura 31. Plano de abundancia de SiO ₂ (azul).....	57
Figura 32. Plano de abundancia de Goethita (ion férrico Fe ³⁺) y hematita (ion ferroso Fe ²⁺) (naranja).....	58
Figura 33. Mapa temático mostrando los productos resultantes del análisis de imágenes ASTER y SENTINEL 2 junto a las principales anomalías identificadas.....	59
Figura 34. Targets de exploración identificados a partir de los planos de abundancia mineral obtenidos mediante el análisis de componentes principales y cociente de bandas aplicados a las imágenes ASTER y SENTINEL 2.	60
Figura 35. Anomalía Pampa Blanca mirando hacia el NO, nótese la abundante presencia de OxFe. En el fondo se observa parte del valle del rio Santa.	61
Figura 36. Ubicación de la toma de lecturas de firmas espectrales en la Anomalía Pampa Blanca. Se realizaron dos lecturas de firmas espectrales con el software ENVI	62
Figura 37. Análisis espectral anomalía Pampa Blanca: en negro firma espectral de la alunita proporcionada por la USGS adaptados a la resolución espectral de las bandas ASTER, en magenta firma espectral de alunita identificada en la imagen ASTER.	63

	Pág.
Figura 38. Análisis espectral anomalía Pampa Blanca: en negro firma espectral de la caolinita proporcionada por la USGS adaptados a la resolución espectral de las bandas ASTER, en amarillo firma espectral de caolinita identificada en la imagen ASTER.	63
Figura 39. Diques cortando secuencias de lavas andesíticas de la Formación Casma.	64
Figura 40. Muestra de mano del sector Anomalía Pampa Blanca, en círculos amarillos los sectores donde se tomó las lecturas al Terraspec. A) Lectura al Terraspec muestra una importante presencia de alunita, B) Lectura al Terraspec presenta una importante presencia de caolinita. Ambos sectores contienen jarosita.	65
Figura 41. Anomalía Cerro Colorado, se realizaron dos lecturas de firmas espectrales.....	67
Figura 42. Análisis espectral: en negro firma espectral de la caolinita proporcionada por la USGS adaptados a la resolución espectral de las bandas ASTER, en amarillo firma espectral de Caolinita identificada en el sector “Cerro Colorado”.....	68
Figura 43. Análisis espectral: en negro firma espectral de la illita proporcionada por la USGS adaptados a la resolución espectral de las bandas ASTER, en verde firma espectral de illita identificada en el sector “Cerro Colorado”.	68
Figura 44. Vista panorámica del sector Cerro Colorada.	69
Figura 45. Muestra de mano del sector Anomalía Cerro Colorado, en círculos amarillos los sectores donde se tomó las lecturas al terraspec. Circulo de la izquierda muestra un espectro coincidente con la presencia de clorita, circulo de la derecha presenta una importante presencia de caolinita.	70
Figura 46. Anomalía Quebrada Grande, se realizaron dos lecturas de firmas espectrales.....	72
Figura 47. Análisis espectral: en negro firma espectral de la Alunita proporcionada por la USGS adaptados a la resolución espectral de las bandas ASTER. en magenta firma espectral de Alunita identificada en el sector “Quebrada Grande”.	73

Figura 48. Análisis espectral: en negro firma espectral de la Caolinita proporcionada por la USGS adaptados a la resolución espectral de las bandas ASTER, en amarillo firma espectral de Caolinita identificada en el sector “Quebrada Grande”.73

Figura 49. Vista panorámica del sector Quebrada Grande, se observa la presencia de diques aplíticos de dirección sur este.74

Figura 50. Muestra de mano del sector Quebrada Grande, en círculos amarillos los sectores donde se tomó las lecturas al terraspec. Circulo de la izquierda muestra un espectro coincidente con la presencia de alunita, circulo de la derecha muestra un espectro coincidente con la presencia de Caolinita.75

LISTA DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1.	Satélites de Teledetección.....	21
Tabla 2.	ASTER características (modificado Abrams, 2002)	26
Tabla 3.	Relación de banda ASTER para mejorar las características minerales (según Van der Meer, 2012)	27
Tabla 4.	Sentinel-2 bandas espectrales y resolución.....	29
Tabla 5.	Acceso hacia la zona de estudio.	31
Tabla 6.	Estadística de bandas VNIR – SWIR imagen ASTER original	36
Tabla 7.	Estadística de bandas VNIR – SWIR imagen ASTER calibración radiométrica	37
Tabla 8.	Estadística de bandas VNIR – SWIR imagen ASTER corrección atmosférica.....	37
Tabla 9.	Bandas ASTER (VNIR - SWIR) usado para la generación de planos de abundancia mineral mediante PCA (Modificado de Crosta, 2002).....	39
Tabla 10.	Ratio de Bandas para Sílice y SiO ₂ (Modificado de Kalinowski & Oliver 2004).....	41
Tabla 11.	Estadísticas de vectores propios para las bandas ASTER 1, 3, 5 y 7. El CP4 muestra altos valores de vectores propios entre las bandas 5 y 7 (Crosta, 2002).	54
Tabla 12.	Estadísticas de vectores propios para las bandas ASTER 1, 4, 6 y 7. El CP4 muestra altos valores de vectores propios entre las bandas 4 y 6 (Crosta, 2002).	55
Tabla 13.	Estadísticas de vectores propios para las bandas ASTER 1, 3, 5 y 6. El CP4 muestra altos valores de vectores propios entre las bandas 3 y 6 (Crosta, 2002).	56
Tabla 14.	Estadísticas de vectores propios de la imagen SENTINEL 2 para las bandas 2, 3, 4 y 8. El CP4 muestra altos valores de vectores propios entre las bandas (Vargas, 2015)	58

LISTA DE ABREVIATURAS

ACP.	Análisis de componentes principales.
ASTER.	Radiómetro espacial avanzado de emisión y reflexión térmica.
AVIRIS.	Espectrómetro aerotransportado de imágenes visibles e infrarrojas.
CNES.	Agencia espacial francesa
DLR.	Centro Aeroespacial Alemán
EM.	Electro Magnetismo
ENVI.	Software de análisis y procesamiento de imágenes
EO-1.	Observador Terrestre-1.
ESA.	Agencia Espacial Europea.
EROS.	Satélites de observación de recursos terrestres.
HyMap.	Sensor Hiperspectral Aerotransportado.
MODIS.	Espectro radiómetro de imágenes de resolución moderada.
NASA.	Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio.
NRCAN.	Natural Resources Canada
PCG.	Puntos de control georreferenciados.
SWIR.	Infrarrojo de onda corta.
TIR.	Infrarrojo termal.
USGS.	Servicio Geológico de los Estados Unidos
VNIR.	Visible e infrarrojo cercano.

RESUMEN

La investigación está localizada en la provincia del Santa, departamento de Ancash al norte de Perú, comprendiendo un área total de 4 000 km². La investigación está emplazada dentro de la franja metalogénica XXI - A asociada a Epitermales de Au-Ag hospedadas en rocas volcánicas, las cuales, debido a sus características, son idóneas para el emplazamiento de alteraciones hidrotermales. Estas alteraciones hidrotermales pueden ser identificadas usando imágenes ASTER y SENTINEL 2. Para determinar posibles zonas de interés en la búsqueda de nuevos yacimientos, se aplicaron técnicas de identificación espectral en las bandas Visible, VNIR y SWIR de las imágenes ASTER y SENTINEL 2 con el objetivo de realizar la discriminación de zonas con presencia de alteración hidrotermal. Para el análisis se usó el método Crosta (*Crosta method/technique*) que incluyen el Análisis de componentes principales (ACP) y los cocientes entre bandas (*Band Ratio*) esto para elaborar mapas de alteración argílica, argílica avanzada y propilítica, además de la identificación de minerales con contenido de hierro como jarosita y goethita. Los resultados muestran que las imágenes ASTER y SENTINEL 2 proporcionan información mineralógica preliminar y de bajo costo.

Palabras claves: ASTER, SENTINEL 2, Alteraciones Hidrotermales, Lineamientos Estructurales.

ABSTRACT

The research is located in the province of Santa, department of Ancash in northern Peru, covering a total area of 4,000 km². The research is located within the XXI - A metallogenic band associated with Au-Ag Epithermals hosted in volcanic rocks, which, due to their characteristics, are suitable for the emplacement of hydrothermal alterations. These hydrothermal alterations can be identified using ASTER and SENTINEL 2 images. To determine possible areas of interest in the search for new deposits, spectral identification techniques were applied in the Visible, VNIR and SWIR bands of the ASTER and SENTINEL 2 images with the objective to perform the discrimination of zones with the presence of hydrothermal alteration. For the analysis, the Crosta method (Crosta method/technique) was used, which includes the Principal Component Analysis (ACP) and the ratios between bands (Band Ratio) to prepare maps of argillic, advanced argillic and propylitic alteration, in addition to the identification iron-bearing minerals such as jarosite and goethite. The results show that ASTER and SENTINEL 2 images provide preliminary and low-cost mineralogical information.

Keywords: ASTER, SENTINEL 2, Hydrothermal Alterations, Structural Guidelines.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El Perú a nivel mundial y de latinoamérica se ubica entre los principales productores de diversos metales, lo cual, no solo es un reflejo de la abundancia de estos recursos sino también de la capacidad de producción de la actividad minera peruana. El Perú cuenta con una importante presencia de yacimientos mineros como son: Yanacocha, Las Bambas, Minas Conga, Pampa del Pongo, Quellaveco, Galeno, Toromocho, Quiruvilca, Lagunas Norte, La virgen, La Arena, Shahuindo, Antamina, Rio Blanco, entre otros.

La presente investigación está localizada en la provincia del Santa, departamento de Ancash al norte de Perú, comprendiendo un área total de 4 000 km². Geológicamente en la zona de estudio se puede evidenciar afloramientos de rocas volcánicas como es el Grupo Calipuy formado por una secuencia volcánica de lavas y rocas piroclásticas gruesas de composición andesítica, ignimbrítica y tobas dacíticas, además de tobas piroclásticas y cenizas (Navarro, Rivera y Monge 2010) también se evidencia la presencia de intrusivos como granodiorita y tonalita pertenecientes al batolito de la Cordillera Blanca (Navarro, Rivera y Monge 2010) y formaciones volcano - sedimentarias como el grupo Casma, conformado flujos de lavas andesíticas y por lutitas grises a negras con nódulos calcáreos, intercalados con delgados estratos de calizas grises y areniscas grises de grano fino (Navarro, Rivera y Monge 2010).

En los últimos años, las técnicas de análisis espectral asociadas al infrarrojo de onda corta (SWIR) han sido utilizadas ampliamente, especialmente en la exploración e investigación de yacimientos minerales (Chang & Yang 2012). Las ventajas de estas técnicas incluyen la adquisición y procesamiento de datos a bajo costo.

Inicialmente, con la resolución espectral limitada proporcionada por las imágenes del satélite Landsat TM, la identificación de alteraciones estaba restringido a la detección de áreas donde solo se podía determinar la probabilidad de que se hayan producido procesos de alteración hidrotermal (Crosta 2002), ya que las bandas Landsat TM visible, infrarroja

cercana (VNIR) e infrarroja de onda corta (SWIR) solo son capaces de discriminar áreas ricas en óxidos/hidróxidos de hierro y minerales de arcilla y carbonato, respectivamente.

Sin embargo, con la llegada de las imágenes ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), la identificación de ensambles específicos de alteración se vuelve factible, esto debido a que posee seis bandas espectrales en el infrarrojo de onda corta (SWIR) (Abrams 2000) las cuales están ligadas a una región específica del espectro electromagnético, donde la mayoría de arcillas y carbonatos muestran características espectrales diferenciadas. Esto demuestra la capacidad de las imágenes ASTER para discriminar los minerales de alteración, útiles en la búsqueda de nuevos yacimientos minerales.

La teledetección ha ganado importancia debido a que sus aplicaciones se dan en diversos escenarios de exploración. Los cuerpos minerales pueden estar asociados con tipos de roca específicos, controlados por estructuras geológicas y asociados a diferentes tipos de alteraciones hidrotermales. Algunos de los depósitos geológicamente económicos, como la laterita, la bauxita, muestran diferentes características morfológicas (Roonwal 2018). La teledetección puede ayudar al geólogo de exploración a distinguir diferentes tipos de rocas, identificar las rocas alteradas hidrotermalmente, investigar las características morfológicas y analizar las características estructurales.

Lo indicado anteriormente es analizado en detalle en los siguientes capítulos: En el Capítulo II: marco teórico, detallamos los aspectos teóricos que nos permiten comprender las propiedades y características de la naturaleza de las ondas electromagnéticas, así como los antecedentes locales, nacionales e internacionales existentes en el área de estudio; en el Capítulo III, describimos los materiales y métodos usados, así como la ubicación y accesibilidad a la zona de estudio, geología local y geología estructural, además del tratamiento y recolección de datos; en el Capítulo IV realizamos el análisis y discusión de resultados donde identificamos anomalías con presencia de minerales de alteración hidrotermal, se realiza además la contrastación de la hipótesis, usando los resultados del análisis de firmas espectral así como los resultados de las lecturas al Terraspec al que fueron sometidas las muestras de mano obtenidas en las visitas de campo. De esta forma en el Capítulo V establecemos las conclusiones y recomendaciones a futuros investigadores.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

INTERNACIONALES

Beiranvand y Hashim (2014). ASTER, ALI and Hyperion sensors data for lithological mapping and ore minerals exploration. Realizan una revisión de las aplicaciones de las imágenes ASTER, con resultados que indican que la banda SWIR permite hacer una distinción entre distintos tipos de arcillas, clorita, epidota y sulfatos.

Crosta et al. (2002). Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. Los resultados obtenidos demuestran que el PCA puede extraer información mineralógica detallada de datos multiespectrales de imágenes ASTER, para producir imágenes de abundancia de algunos minerales de alteración ampliamente utilizados en la exploración de depósitos de metales preciosos y básicos.

Rockwell & Hofstra (2012). Mapping Argillic and Advanced Argillic Alteration in Volcanic Rocks, Quartzites, and Quartz Arenites in the Western Richfield 1° x 2° Quadrangle, Southwestern Utah, Using ASTER Satellite Data. Demuestran que el análisis espectroscópico de los datos de ASTER multiespectral VNIR-SWIR, especialmente cuando se combina con el análisis basado en la relación de los datos de ASTER TIR, es altamente efectivo para mapear la mineralogía asociada con rocas sin alteraciones, metamorfosadas y alteradas hidrotermalmente.

NACIONALES

Carrino et al. (2015). Geology and Hydrothermal Alteration of the Chapi Chiara Prospect and Nearby Targets, Southern Peru, Using ASTER Data and Reflectance Spectroscopy. Llegan a la conclusión de que las imágenes ASTER son una herramienta importante para caracterizar las unidades geológicas y las alteraciones Hidrotermales en zonas expuestas de roca base.

Mitchell (2017) La teledetección como herramienta de identificación en zonas anómalas en el prospecto la China. Dan a conocer a la teledetección, como una herramienta de suma utilidad para desarrollar una metodología de identificación de zonas anómalas, mediante imágenes satelitales, brindándonos información visual y digital para su tratamiento y su posterior interpretación.

Vargas (2015). Caracterización Espectral de tipos de Alunita y Silice en Depósitos Epitermales de Alta Sulfuración utilizando imágenes ASTER. Analiza la utilidad de las imágenes ASTER en la detección de Alunita-Na y Alunita-K, llegando a la conclusión de que son una excelente herramienta para la identificación de depósitos epitermales de alta sulfuración.

LOCALES

Díaz (2018). Prospección de aguas subterráneas usando imágenes Landsat 8 y áster GDEM mediante el método de árbol de decisiones en el cuadrángulo 15 G - San Marcos. Tiene como hipótesis que mediante el uso de Imágenes Satelitales y por medio del método árbol de decisiones se puede prospeccionar agua subterránea. Finalmente, se combinó toda esta información por medio del método de árbol de decisiones, obteniendo una certeza de 92% de precisión en la ubicación de agua subterránea.

Gamboa (2015). Caracterización mineralógica de la alteración en las calizas de la microcuenca del Río Tres Ríos en el distrito de Cajamarca. Utiliza el mapeo espectral para zonificar la distribución de las alteraciones y determinar que las calizas clásticas de la Formación Yumagual y las margas ferruginosas de la Formación Chúlec tienden a

formar suelos tipo terra rosa mientras que las calizas no clásticas de las Formaciones Pariatambo y Yumagual tienden a formar calcretas.

Salazar (2016). Análisis del impacto geo ambiental de pasivos ambientales aplicando sensoramiento remoto y firmas espectrales utilizando ENVI, provincia de Hualgayoc, Cajamarca, 2016. En la investigación pretende analizar el Impacto Geoambiental de Pasivos Ambientales aplicando el Sensoramiento Remoto y Firmas Espectrales utilizando ENVI. Al analizar las imágenes LANDSAT, donde se pudo concluir con la identificación a través de las firmas espectrales cambios geomorfológicos, hidrológicos y de Vegetación considerables desde 1984 hasta el año 2015.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 INTRODUCCIÓN A LA TELEDETECCIÓN

La teledetección es la ciencia de la obtención e interpretación de información a distancia, usando sensores que no están físicamente en contacto con los objetos observados (Reddy 2008). La ciencia de la teledetección incluye observaciones aéreas, satelitales y espaciales de las superficies y atmósferas de los planetas en nuestro sistema solar, aunque la tierra es el objetivo de más frecuente estudio (Smith 2012). El término de teledetección está restringido a métodos que detectan y miden la energía electromagnética, incluyendo la luz visible, que interactúa con los materiales de la superficie y la atmósfera. La teledetección tiene muchos propósitos, los cuales incluyen la creación y actualización de mapas, predicción de tiempo, salud de vegetación, etc (Chuvieco, 1996).

2.2.2 EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

La teledetección comenzó con la fotografía aérea, usando luz visible del sol o de una fuente de energía, pero la luz visible constituye solo una pequeña parte del espectro electromagnético, que abarca desde los rayos gamma de alta energía y longitud de onda corta hasta las ondas de radio de energía más baja y de longitud de onda larga (figura 01).

La región ultravioleta o UV del espectro electromagnético. Es la radiación que está justo debajo de la porción violeta de la luz visible, en algunos casos los materiales de la superficie de la tierra, principalmente rocas y minerales, fluorescen o emiten luz cuando son iluminadas por la radiación UV (NRCAN, 2016).

La región de **luz visible** del espectro electromagnético es una pequeña parte en proporción al resto del mismo (figura 2), por lo cual hay una gran cantidad de radiación alrededor, que no es invisible para nuestros ojos, pero que puede ser detectada por otros instrumentos de teledetección. Estas longitudes de onda visibles cubren un rango aproximadamente de 0.4 a 0.7 μm donde la longitud de onda visible más larga es la roja y la más corta es la violeta. Es importante notar que es la única porción del espectro que podemos asociar al concepto de color (NRCAN, 2016).

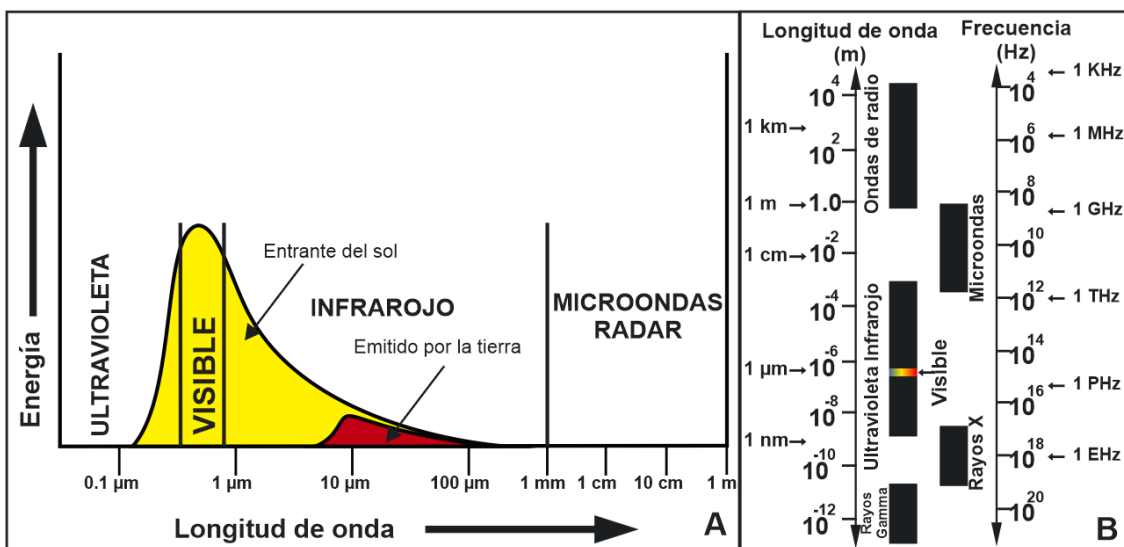


Figura 1: A) Espectro Electromagnético mostrando la región UV, visible, infrarrojo y de microondas de radar. Se puede notar el rango de reflectividad entrante del sol (en amarillo) y emitido por la tierra (en rojo). B) Rangos del espectro electromagnético desde los rayos gamma hasta las ondas de radio se puede notar la relación inversa entre la longitud de onda (m) y la frecuencia en (Hz) (modificado de Smith, 2012).

La región Infrarroja o IR del espectro electromagnético, cubre un rango de longitud de onda de 0.7 μm a 100 μm . la región del infrarrojo puede ser dividido en dos categorías basadas según sus propiedades de radiación, el IR reflejado y el IR emitido o térmico (figura 3). La radiación en la región IR reflejado se usa para propósitos de detección remota de manera muy similar a la radiación en la parte visible. El IR reflejado cubre

longitudes de onda de aproximadamente $0.7 \mu\text{m}$ a $3.0 \mu\text{m}$. La región IR térmica es bastante diferente de las partes visibles e IR reflejadas, ya que esta energía es esencialmente la radiación que se emite desde la superficie de la Tierra en forma de calor. El IR térmico cubre longitudes de onda de aproximadamente $3.0 \mu\text{m}$ a $100 \mu\text{m}$ (NRCAN, 2016).

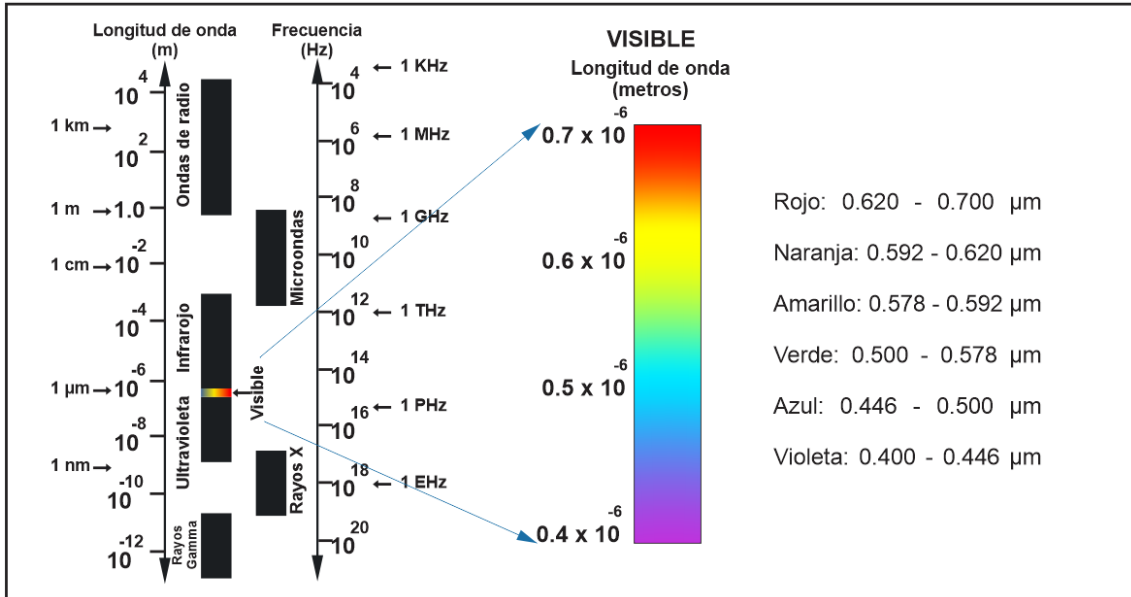


Figura 2: Espectro Electromagnético mostrando la longitud de onda del rango visible (modificado de Smith 2012).

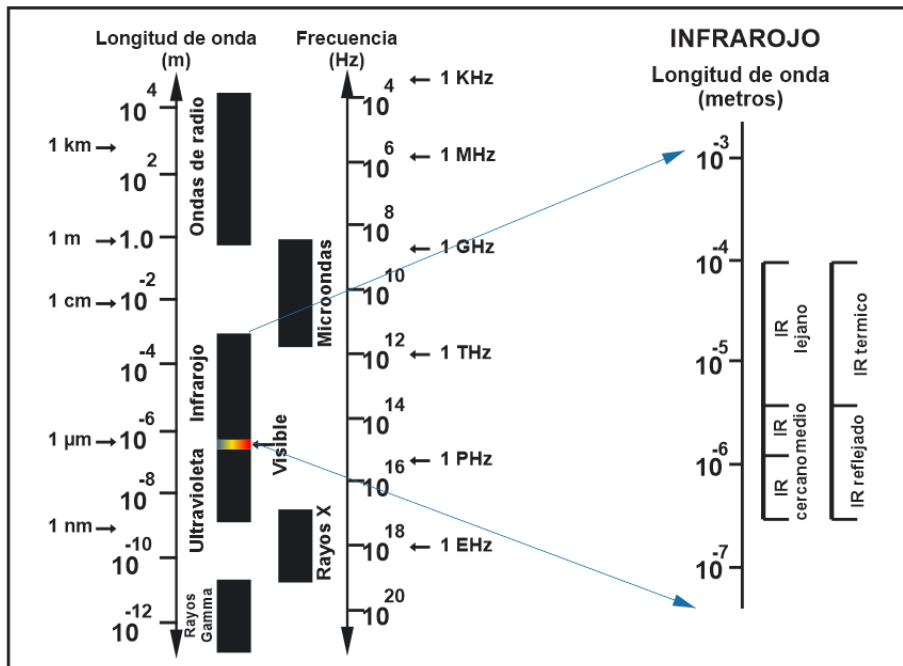


Figura 3: Espectro electromagnético del rango infrarrojo (IR Cercano, IR Medio, IR Lejano), nótese la delimitación del rango IR reflejado (radiación EM reflejada, proveniente del sol) e IR térmico (radiación EM emitida por la tierra) (modificado de Smith 2012).

La región de Microondas cubre el rango de aproximadamente 1 cm a 1 m de longitud de onda del espectro electromagnético. La detección de microondas abarca formas activas y pasivas de detección remota. Debido a sus largas longitudes de onda, en comparación con el visible y el infrarrojo, las microondas tienen propiedades especiales que son importantes para la detección remota. La radiación de microondas de longitud de onda más larga puede penetrar a través de la capa de nubes, la bruma, el polvo y la lluvia más intensa, ya que las longitudes de onda más largas no son susceptibles a la dispersión atmosférica que afecta a las longitudes de onda ópticas más cortas. Esta propiedad permite la detección de energía de microondas en casi todas las condiciones climáticas y ambientales para que los datos se puedan recopilar en cualquier momento (NRCAN, 2016).

2.2.3 PROCESOS DE INTERACCIÓN EN TELEDETECCIÓN

Los sensores remotos miden la radiación electromagnética (EM) que ha interactuado con la superficie de la Tierra. Las interacciones con la materia pueden cambiar la dirección, la intensidad, el contenido de la longitud de onda y la polarización de la radiación EM. La naturaleza de estos cambios depende de la composición química y la estructura física del material expuesto a la radiación EM. Los cambios en la radiación EM que resultan de sus interacciones con la superficie de la Tierra, proporcionan pistas importantes sobre las características de los materiales de la superficie.

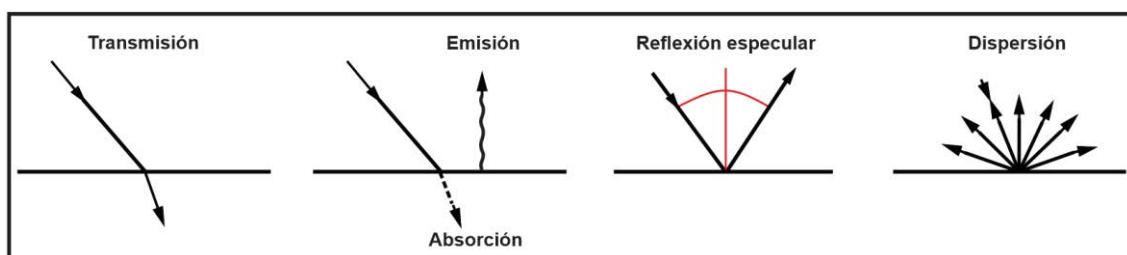


Figura 4: proceso de interacción entre la materia y la energía EM, la línea horizontal representa el límite entre dos materiales (modificado de Smith, 2012).

La radiación electromagnética transmitida es la que pasa a través de un material (o a través del límite entre dos materiales) con poco cambio en la intensidad. Los materiales también pueden absorber la radiación EM, donde por lo general, la absorción es específica de la

longitud de onda: es decir, se absorbe más energía en algunas longitudes de onda que en otras. La radiación EM que se absorbe se transforma en energía térmica, lo que eleva la temperatura del material. Parte de esa energía calorífica puede luego emitirse como radiación EM a una longitud de onda que depende de la temperatura del material. Cuanto más baja sea la temperatura, más larga será la longitud de onda de la radiación emitida (Smith, 2012).

Como resultado del calentamiento solar, la superficie de la Tierra emite energía en forma de radiación infrarroja de longitud de onda más larga (figura 1). Por esta razón, la porción del espectro infrarrojo con longitudes de onda superiores a 3 μm se denomina comúnmente región infrarroja térmica.

Si la superficie es lisa a una escala comparable a la longitud de onda de la energía incidente, se produce una reflexión especular: la mayor parte de la energía se refleja en una sola dirección, en un ángulo igual al ángulo de incidencia, por el contrario, en superficies más ásperas causan dispersión (*scattering*) en todas las direcciones.

Para comprender cómo los diferentes procesos de interacción afectan la adquisición de imágenes aéreas y de satélite, analicemos la radiación solar reflejada que se mide en un sensor satelital (Chuvienco, 1996).

- Cuando la luz solar ingresa inicialmente a la atmósfera, encuentra moléculas de gas, partículas de polvo suspendidas y aerosoles. Estos materiales tienden a dispersar una porción de la radiación entrante en todas las direcciones, con longitudes de onda más cortas experimentando el efecto más fuerte.
- Como resultado de estos efectos, la iluminación que llega a la superficie es una combinación de radiación solar altamente filtrada que se transmite directamente al suelo y una luz más difusa dispersada desde todas las partes del cielo, que ayuda a iluminar las áreas sombreadas.
- Cuando esta radiación solar modificada llega al suelo, puede encontrarse con: el suelo, las superficies de las rocas, la vegetación u otros materiales que absorben una parte de la radiación. La cantidad de energía absorbida varía en longitud de onda para cada material de una manera característica, creando una especie de firma espectral. (La absorción selectiva de diferentes longitudes de onda de la luz visible determina lo que percibimos como el color de un material).

- La mayor parte de la radiación no absorbida se refleja de manera difusa (dispersa) hacia la atmósfera, parte de ella en dirección al satélite. Esta radiación ascendente experimenta una nueva ronda de dispersión y absorción a medida que pasa a través de la atmósfera antes de ser finalmente detectada y medida por el sensor. Si el sensor es capaz de detectar la radiación infrarroja térmica, también captará la radiación emitida por los objetos de la superficie como resultado del calentamiento solar.

2.2.4 EFECTOS ATMOSFÉRICOS

La dispersión y absorción de la radiación EM por la atmósfera tienen efectos significativos que afectan el diseño del sensor, así como el procesamiento e interpretación de las imágenes (Chuvienco, 1996). Cuando la concentración de agentes dispersantes es alta, la dispersión produce el efecto visual denominado bruma o *haze*.

La bruma o *haze*, aumenta el brillo de una imagen y reduce el contraste entre los diferentes materiales de base. Una atmósfera brumosa dispersa parte de la luz hacia arriba, por lo que una parte de esta radiación es registrada por el sensor, a este efecto se denomina radiancia. Dado que la cantidad de dispersión varía con la longitud de onda, también lo hace la radiancia (NRCAN, 2016). El efecto de la radiancia es mayor para las longitudes de onda más cortas, disminuyendo rápidamente a medida que aumenta la longitud. Cuando las imágenes se capturan en varios rangos de longitud de onda, el efecto de radiancia de la trayectoria diferencial complica la comparación de los valores de brillo en las diferentes longitudes de onda, los cuales deberán ser corregidos (Smith 2012).

Los componentes atmosféricos que son absorbentes efectivos de la radiación solar son vapor de agua, dióxido de carbono y el ozono. Cada uno de estos gases tiende a absorber energía en rangos de longitud de onda específicos. Algunas longitudes de onda son casi completamente absorbidas (Chuvienco, 2008).

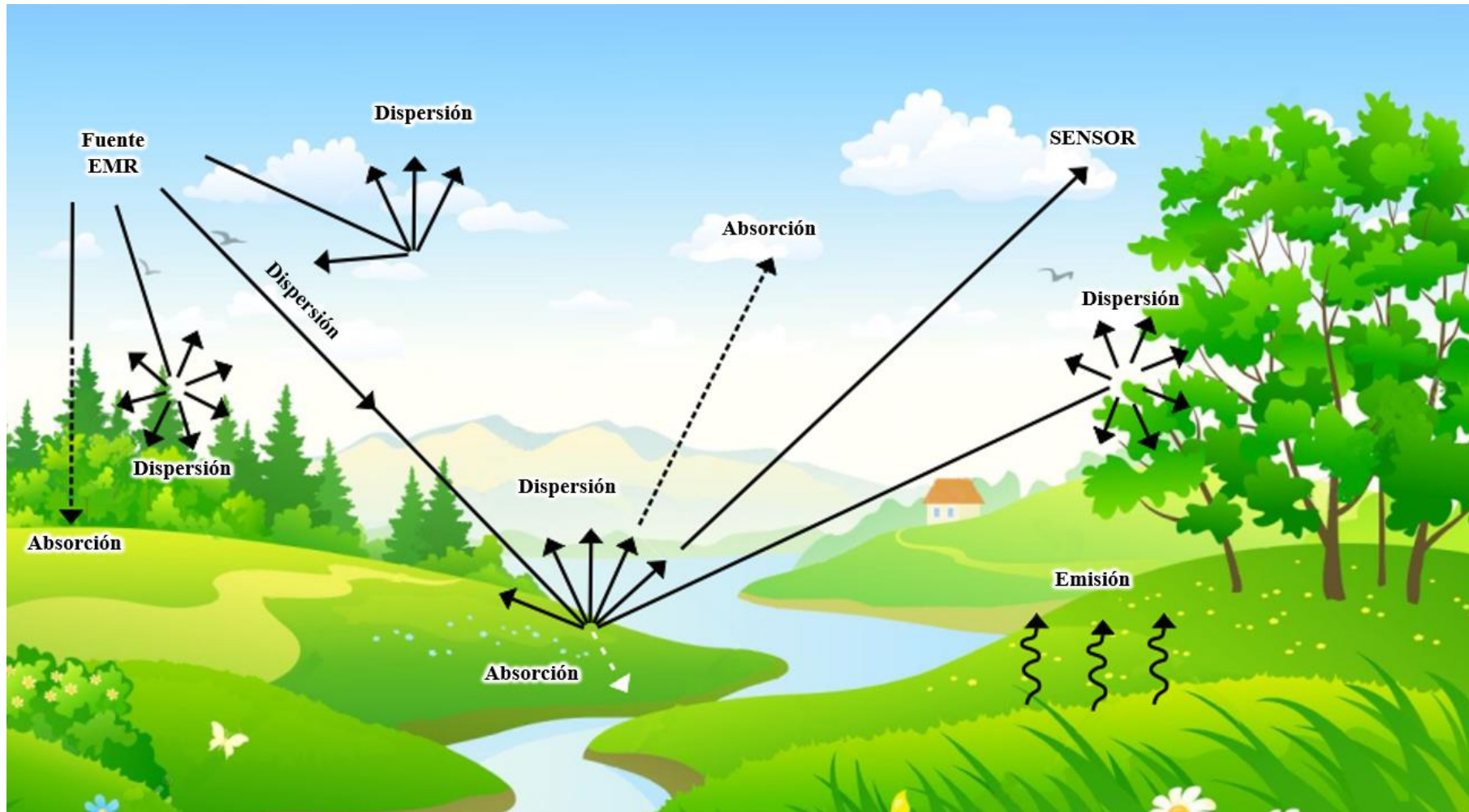


Figura 5: Típica interacción de la radiación electromagnética en la atmosfera y la superficie de la tierra (modificado de Smith 2012).

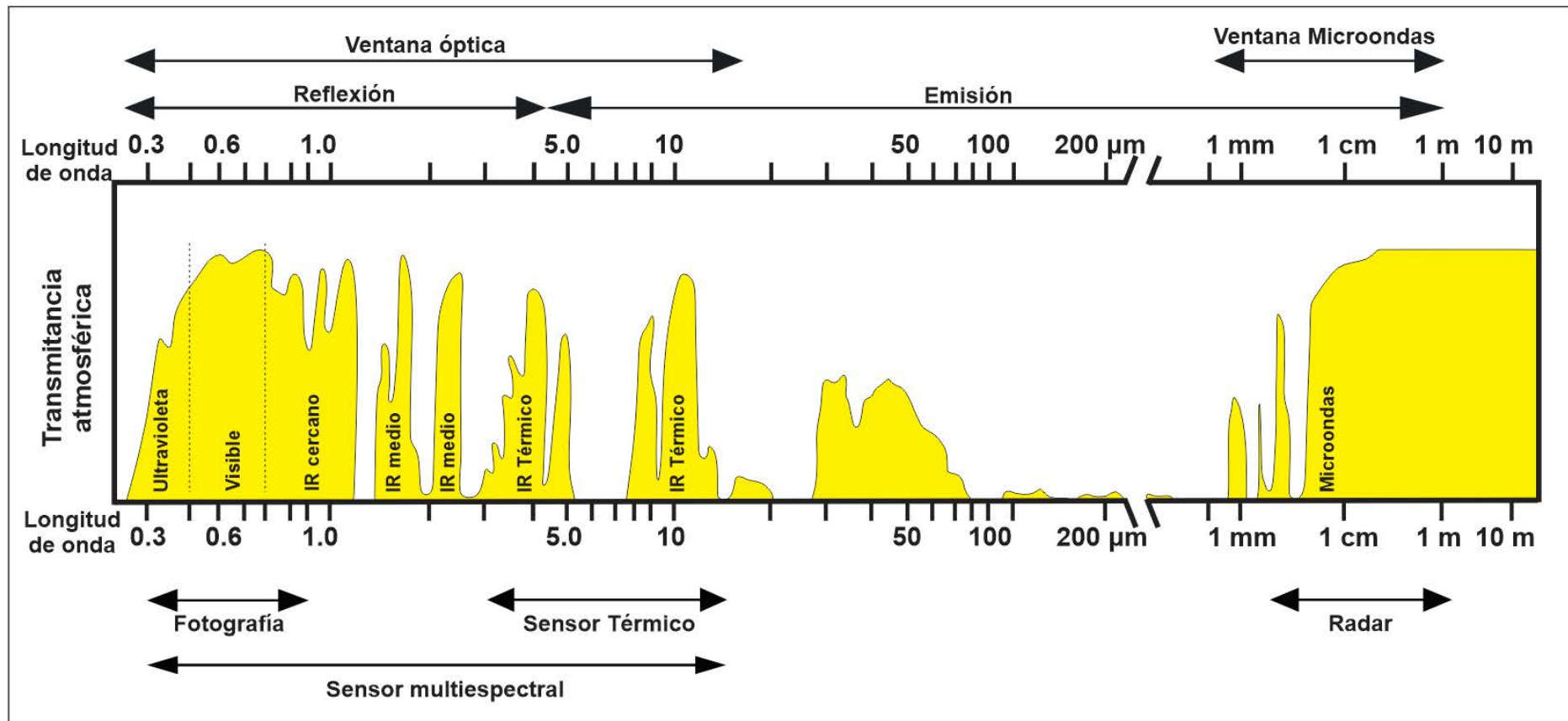


Figura 6: Variación en la transmisión atmosférica respecto a la longitud de onda de la radiación EM, debido a la absorción selectiva por los gases atmosféricos. Solo los rangos de longitud de onda con valores de transmisión moderados a altos son adecuados para el uso en la detección remota (Modificado Smith 2012).

2.2.5 TIPOS DE SENSORES EN LA TELEDETECCIÓN

Todos los sistemas de detección remota diseñados para monitorear la superficie de la Tierra dependen de la energía que es reflejada o emitida de manera difusa por la superficie.

Un sistema de teledetección requiere de al menos tres componentes: un foco de energía, una superficie y un sensor. La forma más habitual de clasificar los sensores remotos considera el procedimiento de recepción de energía procedente de los objetos observados. En este sentido se habla de:

2.2.5.1 SENSOR PASIVO

Estos sensores se limitan a recoger la radiación EM procedente de una fuente exterior a ellos.

2.2.5.2 SENSOR ACTIVO

Estos sensores son capaces de emitir su propio haz de energía, siendo más flexibles ya que no dependen de las condiciones exteriores al sistema sensor-tierra.

2.2.5.3 SENSORES DE RADIACIÓN SOLAR REFLEJADA

Estos sistemas de sensores detectan la radiación solar que se ha reflejado difusamente (dispersada) hacia arriba desde la superficie. Los rangos de longitud de onda que proporcionan información útil incluyen los rangos ultravioleta, visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio. Los sistemas de detección solar reflejados discriminan los materiales que tienen patrones diferentes de absorción específica de longitud de onda, que se relacionan con la composición química y la estructura física del material. Debido a que dependen de la luz solar como fuente, estos sistemas solo pueden proporcionar imágenes útiles durante el día, y el cambio de las condiciones atmosféricas y los cambios en la iluminación con la hora del día y la estación pueden plantear problemas de interpretación.

Los sistemas de sensores remotos solares reflejados son el tipo más común usado para monitorear los recursos de la Tierra (Chuvieco, 1996).

2.2.5.4 SENSORES INFRARROJOS TÉRMICOS

Los sensores que pueden detectar la radiación infrarroja térmica emitida por las características de la superficie pueden revelar información sobre las propiedades térmicas de estos materiales. Al igual que los sensores solares reflejados, estos son sistemas pasivos que dependen de la radiación solar como la última fuente de energía. Debido a que la temperatura de las características de la superficie cambia durante el día, los sistemas de detección de infrarrojos térmicos son sensibles a la hora del día en que se adquieren las imágenes.

2.2.5.5 SENSORES DE RADAR DE IMAGEN

En lugar de depender de una fuente natural, estos sistemas “activos” “iluminan” la superficie con radiación de microondas de emisión, luego miden la energía que se refleja de manera difusa hacia el sensor. La energía de retorno proporciona información sobre la rugosidad de la superficie y el contenido de agua de los materiales de la superficie y la forma de la superficie de la tierra. Las microondas de longitud de onda larga se dispersan poco en la atmósfera, incluso penetrando en la capa de nubes gruesas. Por lo tanto, el radar de imágenes es particularmente útil en regiones tropicales propensas a las nubes (Chuvieco, 1996).

2.2.6 FIRMAS ESPECTRALES

Diferentes tipos de superficies, como el agua, la tierra desnuda o la vegetación, reflejan la radiación de manera distinta en los rangos de longitud de onda. La radiación reflejada en función de la longitud de onda se llama firma espectral de la superficie. En las imágenes LANDSAT, la vegetación presenta una reflexión considerablemente elevada en el canal infrarrojo cercano y una baja reflexión en el canal visible rojo. De esta manera

podemos distinguir las áreas cubiertas de vegetación de la tierra desnuda (Chuvieco, 1996).

Las firmas espectrales proporcionan la clave para discriminar diferentes materiales a partir de la energía solar reflejada. La propiedad utilizada para cuantificar estas firmas se denomina reflectancia espectral, la cual mide la relación entre la energía reflejada y la energía incidente en función de la longitud de onda. La reflectancia espectral de diferentes materiales se puede medir en el laboratorio o en el campo, proporcionando datos de referencia que pueden ser usados para la interpretación de imágenes.

La reflectancia espectral puede usarse para inferir cambios en las composiciones de fluidos y/o temperaturas, lo que es particularmente útil en la exploración, ya que pueden indicar las direcciones hacia las fuentes de fluidos y/o los posibles sitios de deposición de minerales (Chang & Yang 2012).

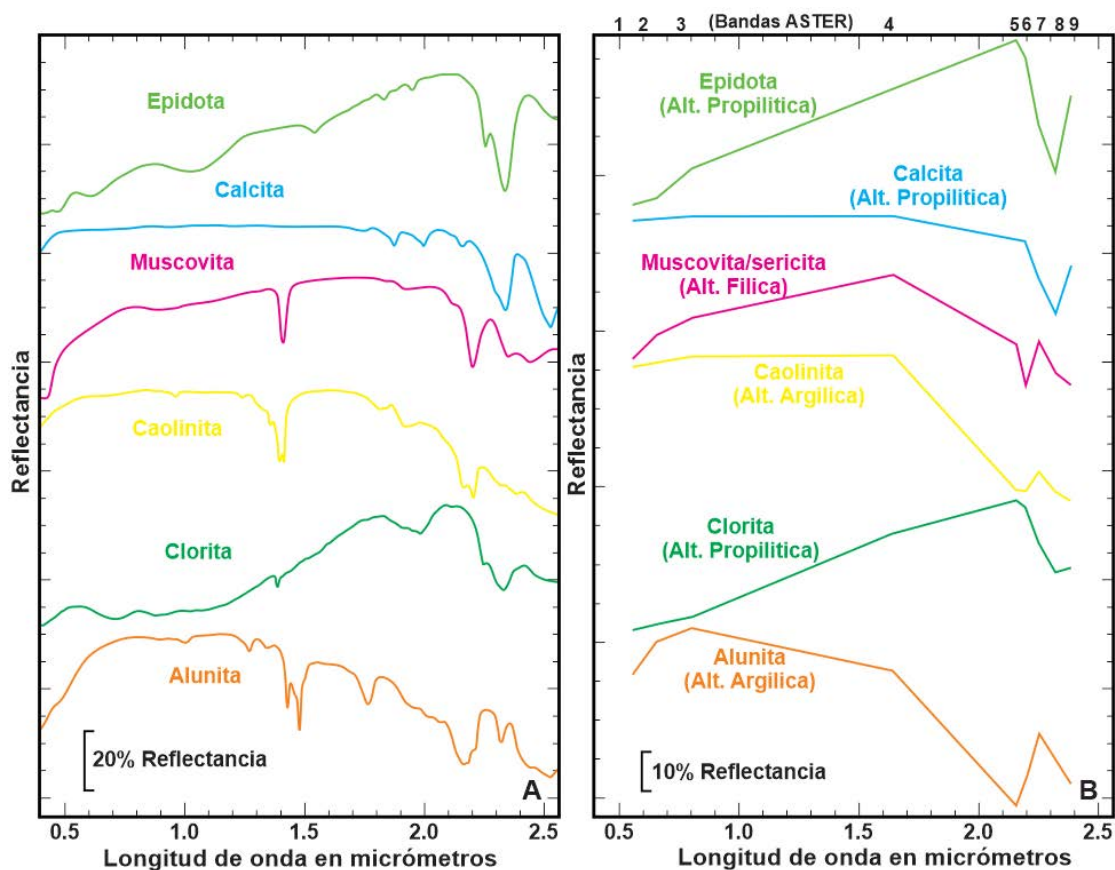


Figura 7: Espectros de laboratorio de alteraciones hidrotermales. A) Espectros de laboratorio de minerales arcillosos. B) Espectros de laboratorio, adaptado a las bandas del Radiómetro de Reflexión y Emisión térmica avanzada (ASTER) (Beiranvand & Hashim, 2014)

2.2.7 RESOLUCIÓN DE LOS SENSORES REMOTOS

Los sensores son dispositivos utilizados para hacer observaciones. Estos consisten en mecanismos altamente sofisticados que son sensibles a una región particular del espectro EM. Las principales características de un instrumento de detección remota de imágenes, que funciona en las bandas espectrales visible e infrarroja, se describen en términos de su resolución espacial, espectral y radiométrica (Chuvieco, 1996). Estos tres tipos de resoluciones varían de un sensor a otro. Cada sensor tiene su propia capacidad de detectar la energía reflejada por la superficie de la tierra.

2.2.7.1 RESOLUCIÓN ESPACIAL

La resolución espacial es una medida de la distancia angular o lineal más pequeña que puede captar un sensor remoto de la superficie de la Tierra, y viene representada por un píxel. La resolución espacial de un sensor se suele expresar en metros o metros/píxel. Son varios los factores que determinan la resolución espacial de un sensor remoto (distancia sensor-superficie terrestre, ángulo de visión y campo de visión instantáneo) (Arbelo, Évora y Labrador 2012). Para el caso de los sensores a bordo de satélites estos factores son prácticamente fijos, por lo que la resolución espacial puede ser considerada constante. Cuanto mayor sea la resolución espacial, es decir, menor superficie represente un píxel de la imagen, más pequeños serán los objetos que se pueden distinguir en la superficie y viceversa. A modo de ejemplo, una imagen con una resolución de 0,5 m/píxel permitirá distinguir objetos más pequeños que una imagen de 2 m/píxel, como se observa en la figura 8.



Figura 8. Imágenes con distinta resolución espacial: A) 2m/pixel y B) 0.5 m/pixel.

2.2.7.2 RESOLUCIÓN ESPECTRAL

La resolución espectral se puede describir como la capacidad para distinguir diferentes partes del rango de longitudes de onda del espectro electromagnético. En esencia, esto equivale a la cantidad de intervalos de longitud de onda ("bandas") que puede medir un sensor, y cuán estrecho es cada intervalo (NRCAN, 2016).

Una "imagen" producida por un sistema de sensores puede consistir en una banda de longitud de onda muy amplia, unas pocas bandas anchas o muchas bandas de longitud de onda estrecha. Los nombres utilizados habitualmente para estas tres categorías de imagen son pancromáticos, multiespectrales e hiperespectrales, respectivamente.

Con el fin de proporcionar una mayor discriminación espectral, los sistemas de teledetección emplean un diseño multiespectral, que son un conjunto de sensores paralelos que detectan radiación en un número determinado de bandas de longitud de onda (Chuvienco, 2008). La cantidad de bandas que utilizan estos satélites van desde la longitud de onda visible a infrarroja permitiendo así la discriminación de diferentes tipos de vegetación suelo, roca, agua, etc.

Los sensores que adquieren cientos de bandas espectrales de una sola área son llamados sensores hiperespectrales estos nos proveen de imágenes que son capaces de realizar un mapeo de la composición mineralógica de la superficie de la tierra. Actualmente el espectrómetro de imágenes de infrarrojo visible en el aire (AVIRIS) y HyMap (EO-1) son los sensores hiperespectrales capaces de adquirir hasta 200 bandas de una sola área. (El satélite Earth-Observing One, EO-1, se retiró en marzo de 2017).

2.2.7.3 RESOLUCIÓN TEMPORAL

La resolución temporal es la frecuencia de cobertura que proporciona un sistema de teledetección, es decir es la periodicidad con la que se adquieren imágenes de la misma área en la superficie terrestre. El ciclo de cobertura está en función de las características orbitales (velocidad, altura, inclinación), así como del diseño del mismo sensor. El intervalo de tiempo entre la toma de imágenes sucesivas de una misma porción de la superficie varía de acuerdo a los objetivos fijados para el sensor.

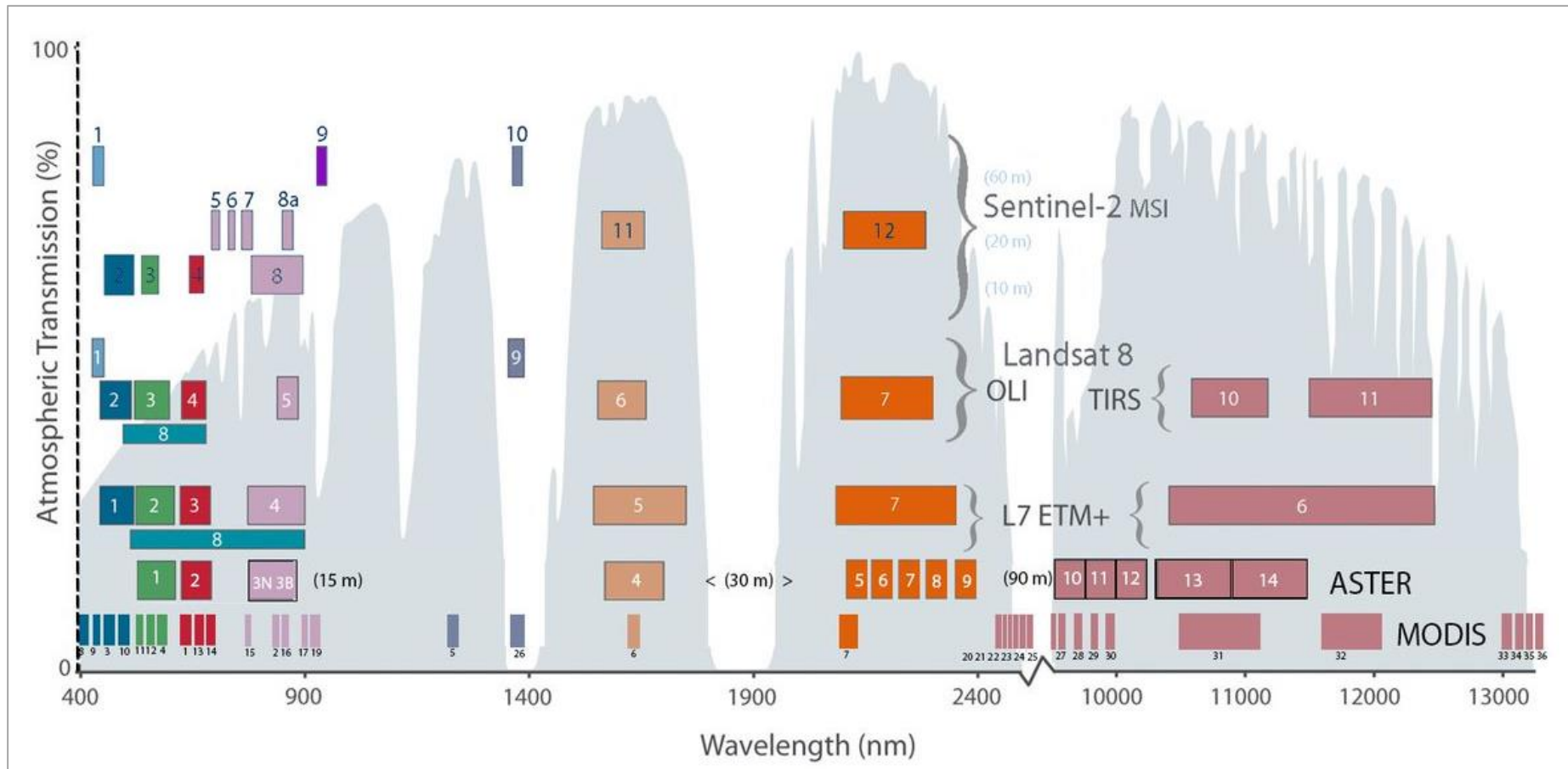


Figura 9: Espectro EM con la Comparación de las bandas espectrales de los principales sistemas de teledetección SENTINEL 2, LANDSAT 8, LANDSAT 7, ASTER Y MODIS.

2.2.7.4 RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA

Es la cantidad mínima de energía requerida para incrementar el valor de un pixel en un nivel digital o número digital (ND). Asimismo, se define la amplitud o extensión radiométrica como el intervalo dinámico, o máximo número de niveles digitales, que pueden ser detectados por un sensor particular. En los sensores más recientes lo habitual suele ser que los niveles vayan de 0 a 2047. En este caso hablaríamos de 11 bits de resolución radiométrica, ya que todos los valores de ese intervalo se pueden representar mediante 11 bits (dígitos binarios) en un sistema digital. La resolución radiométrica en imágenes digitales es comparable al número de tonos de gris en una fotografía en blanco y negro, ya que ambos se relacionan con el contraste.

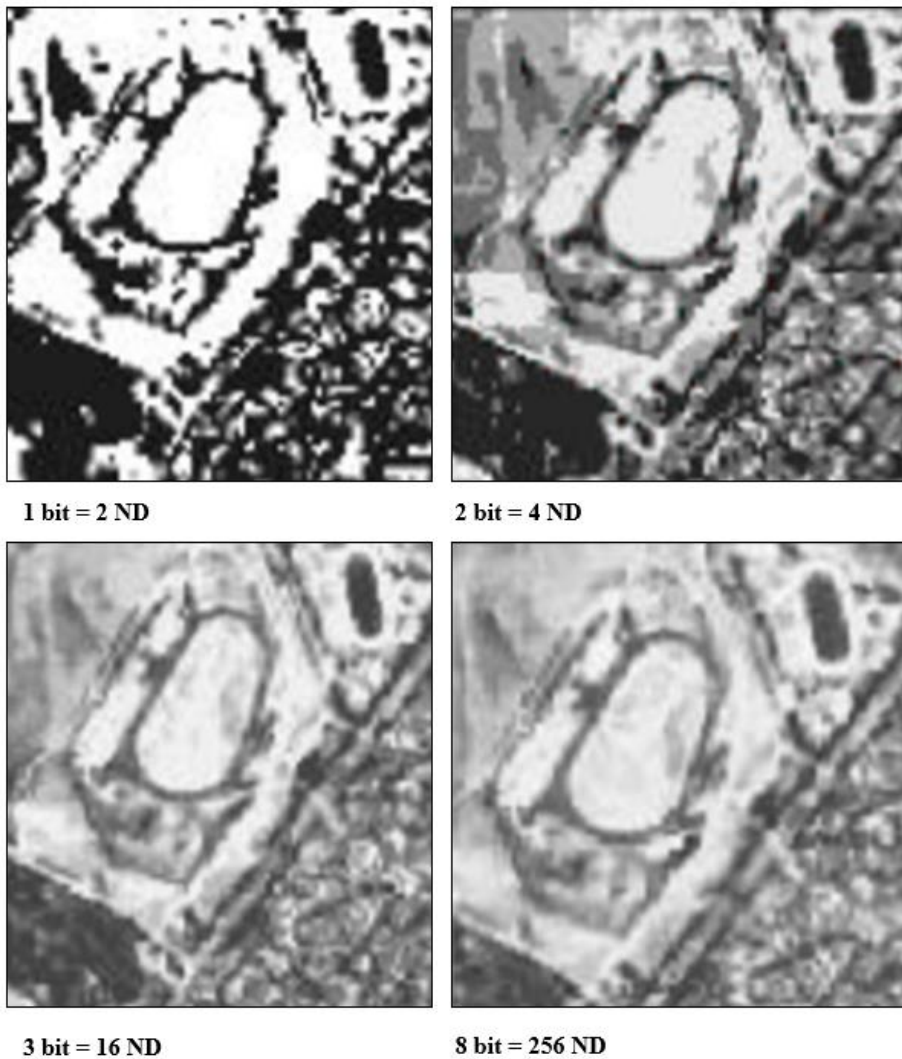


Figura 10. Resolución Radiométrica: Comparación en los niveles de grises o niveles digitales (ND) de una imagen. A mayor resolución radiométrica mayor diferenciación en las tonalidades grises de la imagen.

Tabla 1. Satélites de Teledetección

Satélite	Sensor	Resolución Espacial (m/pixel)	Numero De Bandas	Resolución Temporal (Día)
EARTH OBSERVING - 1	ALI	MS: 30 PAN:10	9	16
	HYPERION	30	220	16
GEOEYE-1	GEOEYE-1	MS: 2 PAN: 0.5	4	3
LANDSAT-7	ETM+	MS:30 PAN:15	8	16
QUICKBIRD	QUICKBIRD	MS:2.44 PAN:0.61	4	2-4
RAPIDEYE	RAPIDEYE	6.5	5	1
	HRS	PAN: 10	1	26
TERRA (EOS-AM 1)	ASTER	15-90	14	16
THEOS	THEOS	MS: 15 PAN: 2	4	1-5
WORLDVIEW-2	WORLDVIEW-2	MS: 2 PAN: 0.5	8	1-3
WORLDVIEW-3	WORLDVIEW-3	MS:8 PAN:1	29	<1
WORLDVIEW-4	WORLDVIEW-4	MS:1.24 PAN:0.31	5	<1
PLEIADES	HRVIR	MS:2.8 PAN:0.7	5	1
SENTINEL-2	SENTINEL-2	10-60	13	10
PERU SAT	NAOMI	MS: 0.7 PAN:2.8	5	<1

Principales Satélites de Teledetección, indicando el nombre, tipo de sensor, resolución espacial, resolución espectral (número de bandas), resolución temporal.

2.2.8 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES

El procesamiento digital de imágenes satelitales, generalmente implica la corrección de imágenes, el registro de imágenes, la mejora de imágenes, la segmentación de imágenes y la clasificación de imágenes según los objetivos del estudio.

2.2.8.1 REGISTRO DE IMÁGENES

El registro de imágenes implica la transformación geométrica de una imagen. El objetivo es generar una imagen que se pueda registrar o alinear, con algunas características de la

superficie fotografiada, por ejemplo, mapas del área cubierta por la imagen u otra imagen rectificadas de la misma área. Por ello son necesarios identificar los puntos de control (PCG) en tierra para el proceso de registro. Donde se selecciona pocos PCG que se pueden reconocer fácilmente tanto en la imagen como en el mapa (por ejemplo, uniones de corrientes, intersecciones de carreteras, etc.) los cuales se introducen en la computadora y, según las coordenadas de PCG, la imagen se somete a una transformación de coordenadas de acuerdo con un conjunto de ecuaciones denominadas proyecciones afines (Roonwal, 2018).

2.2.8.2 MEJORA DE IMAGEN

Implica los procesos aplicados en las imágenes para mejorar la calidad de la misma y hacerlas más interpretables. Al aplicar una técnica de mejora, algunas características pueden ser más discernibles a costa de otras, por ejemplo, el filtrado direccional mejora las características lineales en una dirección particular, aunque otras características en la imagen se suprimen. Una relación de banda particular puede mejorar la cobertura de vegetación y otra relación puede mejorar el óxido de hierro o la alteración argílica. Hay varios métodos de mejora de la imagen, como el estiramiento de contraste, racionamiento de banda, análisis de componentes principales, suma y resta, codificación RGB, mapeador de ángulo espectral y filtrado de imágenes (Roonwal, 2018).

2.2.8.3 ESTIRAMIENTO DE CONTRASTE

La pantalla de un monitor o una fuente de luz digital tiene valores desde 0 (para el negro) a 255 (máxima intensidad), pero en general, los píxeles de una imagen a menudo ocupan una pequeña porción de este rango de, lo que resulta en que una pantalla de bajo contraste algunas características pueden ser indistinguibles y otras no. Por lo cual los softwares de procesamiento de imágenes pueden cambiar cualquier valor del número digital (ND) en una imagen a cualquiera de los 255 niveles de intensidad. El estiramiento se realiza extendiendo los ND por igual en el rango de 0 a 255. El ND mínimo se establece en 0 y el máximo en 255 con otros ND que se encuentran entre estos dos valores extremos. En los softwares modernos de procesamiento de imágenes se encuentran disponibles diferentes métodos de estiramiento de contraste, como estiramiento de contraste lineal,

estiramiento lineal múltiple, estiramiento logarítmico, de potencia o funcional, estiramiento gaussiano, estiramiento de ecualización de histograma y corte de densidad (Chuvieco, 2008).

2.2.8.4 COCIENTE DE BANDAS

El cociente de bandas o la división espectral es un proceso muy útil para el mejoramiento de las imágenes multiespectrales, en esta técnica, los valores de números digitales (ND) de una banda, se dividen por el correspondiente valor ND de otra, y los datos resultantes se vuelven a escalar para llenar el rango dinámico del dispositivo de visualización mediante la operación de estiramiento de contraste. Esta propiedad ha hecho que el cociente de bandas sea bastante útil en aplicaciones geológicas porque exageran las sutiles diferencias de color en una escena y muchos problemas geológicos requieren distinción entre tipos de roca que pueden parecer bastante similares. El cociente de bandas es importante ya que está directamente relacionadas a las propiedades espectrales de los materiales (Roonwal, 2018).

2.2.8.5 ADICIÓN Y SUSTRACCIÓN

La sustracción y adición de imágenes satelitales son métodos simples y útiles para mejorar la imagen cuando las imágenes multiespectrales están altamente correlacionadas. La adición de imágenes espectrales genera una imagen con un rango dinámico mucho mayor que las imágenes originales. Por lo tanto, el resultado es una imagen de mayor contraste (Roonwal, 2018).

2.2.8.6 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP)

El objetivo del Análisis de Componentes Principales (ACP) es resumir un grupo amplio de variables en un nuevo conjunto (más pequeño) sin perder una parte significativa de la información original (Chuvieco, 1996). Para el usuario final de productos de teledetección, el objetivo del ACP es construir una o varias imágenes que incrementen su capacidad de diferenciar distintas coberturas. Es por ello que al realizar una composición

color resulta interesante usar, en lugar de algunas bandas de la imagen, los componentes principales 1, 2 y 3 en la secuencia RGB respectivamente. Un tipo de ACP conocido como técnica de Crosta. Permite la identificación de los componentes principales (a través del análisis de los valores de vectores propios) que contienen información espectral sobre minerales específicos, así como la contribución de cada una de las bandas originales a los componentes en relación con la respuesta espectral de los materiales de interés (Crosta, 2002).

2.2.8.7 FILTRO DE IMAGEN

Los filtros espaciales enfatizan o resaltan los datos de la imagen en varias frecuencias espaciales. La frecuencia espacial se refiere al grado de cambios en los valores de píxeles de un píxel a otro. En una imagen de alta frecuencia, los cambios tonales son abruptos (por ejemplo, en límites de cambios litológicos). En contraste, una imagen de baja frecuencia tiene cambios tonales graduales (por ejemplo, cambios tonales dentro de una misma litología o cuerpo de agua). Los filtros de paso bajo están diseñados para enfatizar las funciones de baja frecuencia y restar importancia a los componentes de alta frecuencia de una imagen (detalle local). Los filtros de paso alto enfatizan los componentes detallados de alta frecuencia de una imagen y resaltan la información más general de baja frecuencia (Roonwal 2018). Existen varios tipos de filtros de baja frecuencia como media, mediana, modo, gaussiano, etc. Los filtros de paso alto incluyen Laplaciano, Sobel y Roberts. Los filtros de paso alto son de dos tipos de la siguiente manera:

- Los filtros de mejoramiento de alta frecuencia en todas las direcciones.
- Los filtros de mejoramiento de alta frecuencia en direcciones específicas.

2.2.9 ASTER

El radiómetro ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) es un generador de imágenes multiespectrales avanzado, que se lanzó a bordo de la nave espacial TERRA de la NASA en diciembre de 1999 (figura 11). ASTER es un esfuerzo cooperativo entre la NASA y el Ministerio de Economía e Industria de Japón, con la colaboración de organizaciones científicas y de la industria en ambos países.

El instrumento ASTER consta de tres subsistemas separados. el VNIR (*Visible and Near Infrared Radiometer*), SWIR (*Short-Wave Infrared Radiometer*) y el TIR (*Thermal Infrared Radiometer*) (Abrams et al. 2002) (tabla 02). Cubriendo una amplia región espectral con 14 bandas que van desde el visible hasta el infrarrojo termal con una alta resolución espacial, espectral y radiométrica. Además de una banda adicional, con vista hacia atrás, en el infrarrojo cercano que proporciona una cobertura estereográfica. La resolución espacial varía con la longitud de onda: 15 m x 15 m en el visible e infrarrojo cercano (VNIR), 30 m x 30 m en el infrarrojo de onda corta (SWIR), y 90 m x 90 m en el infrarrojo termal (TIR). Cada escena cubre un área de 60 x 60 km.

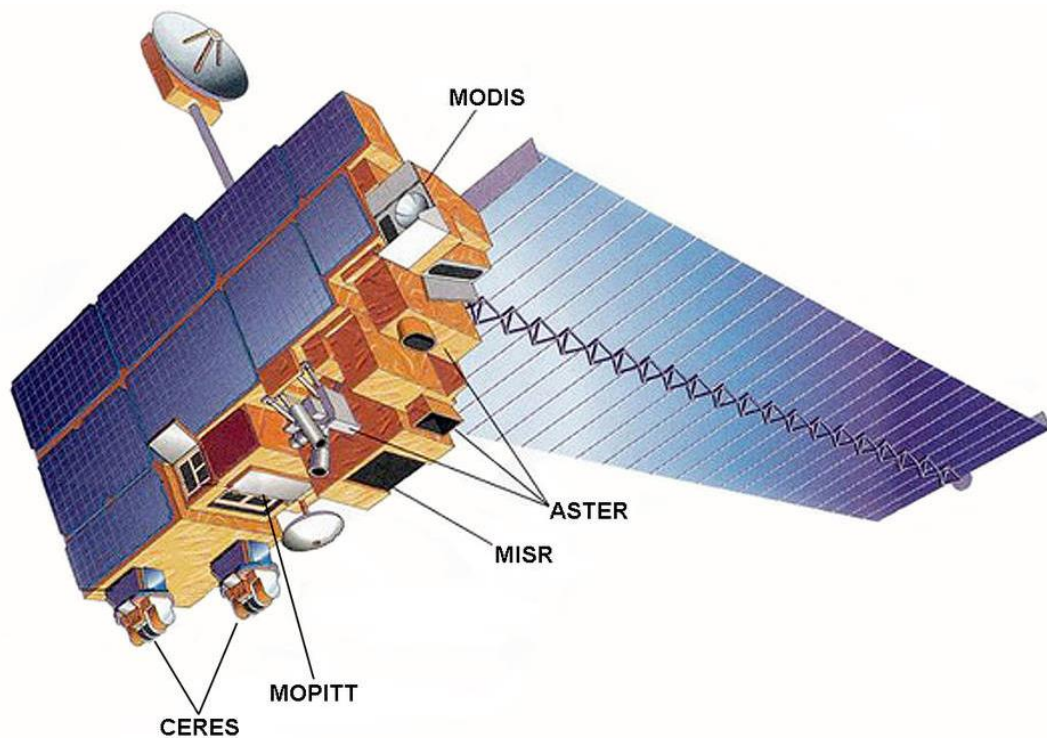


Figura 11. Nave espacial TERRA mostrando sus principales instrumentos, incluido el instrumento ASTER con sus tres subsistemas separados (VNIR, SWIR, TIR) (NASA).

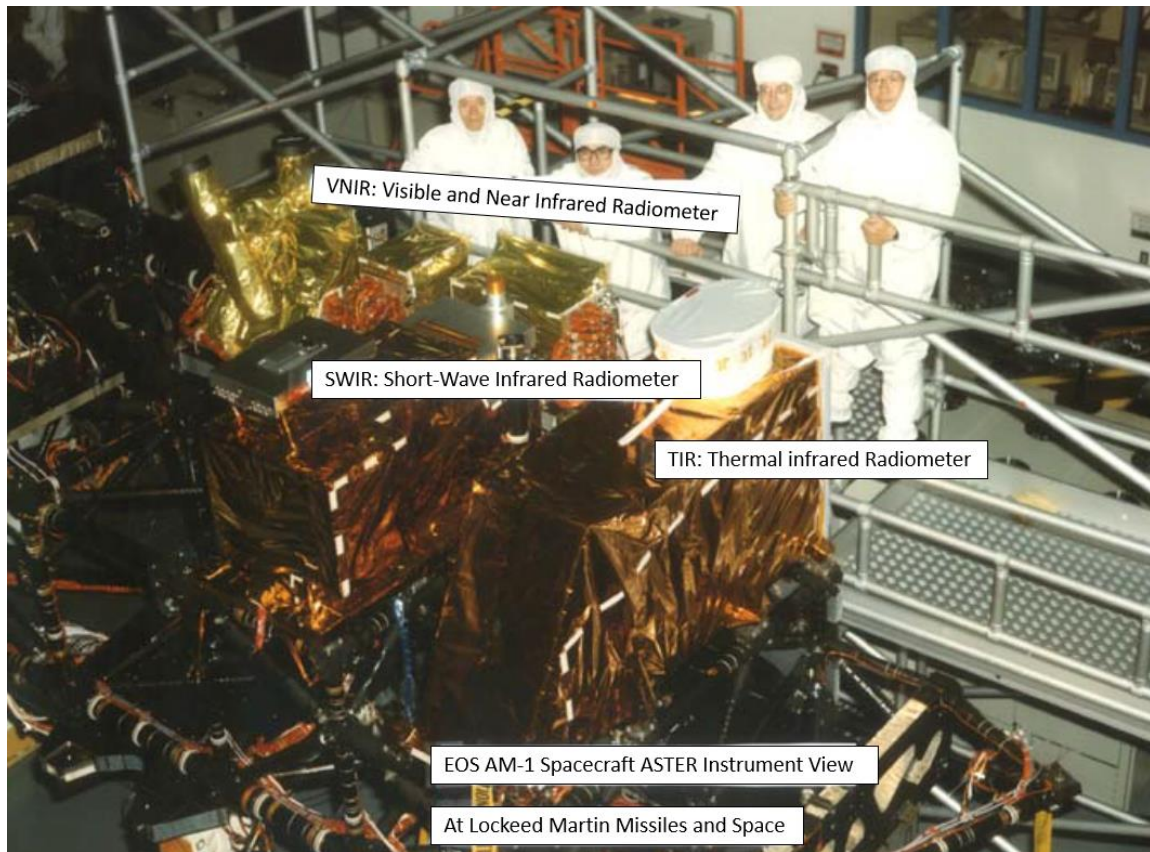


Figura 12. El instrumento ASTER antes de lanzamiento (Abrams 2002).

Tabla 2. ASTER características (modificado Abrams. 2002)

Banda	VNIR resolución espectral (mm)	Banda	SWIR resolución espectral (mm)	Banda	TIR resolución espectral (mm)
1 (nadir)	0.52-0.60	4	1.600-1.700	10	8.125-8.475
2 (nadir)	0.63-0.69	5	2.145-2.185	11	8.475-8.825
3 (nadir)	0.76-0.86	6	2.185-2.225	12	8.925-9.275
3 (hacia atrás)	0.76-0.86	7	2.235-2.285	13	10.25-10.95
		8	2.295-2.365	14	10.95-11.65
		9	2.360-2.430		
Resolución espacial	15x15		30x30		90x90
Resolución radiométrica	8 bits		8 bits		8 bits

Instrumento ASTER, mostrando las características de cada banda y la resolución espectral espacial y radiométrica de los tres subsistemas VMIR. SWIR Y TIR.

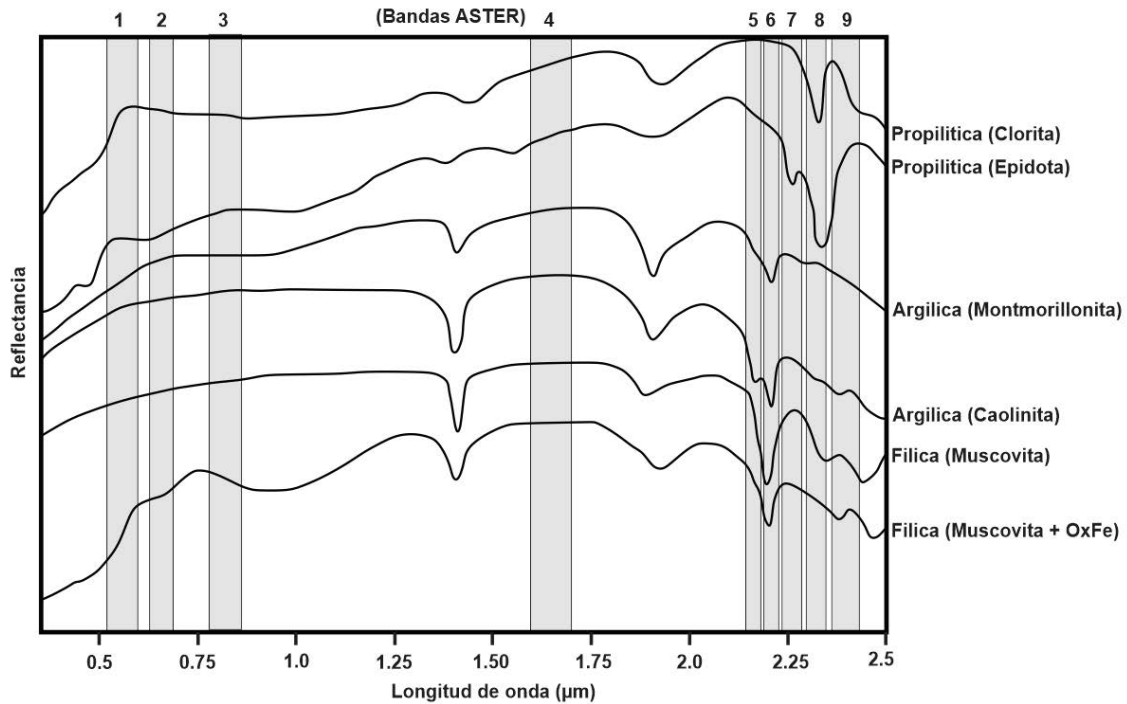


Figura 13 Espectro de reflectancia de laboratorio de importantes minerales de alteración hidrotermal, se muestran las bandas ASTER en la figura. (modificado de Honarmand et al. 2011)

Tabla 3. Relación de banda ASTER para mejorar las características minerales (según Van der Meer et al 2012)

Mineral	ASTER combinación
Hierro férrico	2/1
Hierro ferroso	5/3 y 1/2
Óxido férrico	4/3
Gossan	4/2
Carbonato/Clorita/Epidota	(7+9)/8
Epidota/Clorita/Amfibol	(6+9)/(7+8)
Amfibol	(6+9)/8 y 6/8
Dolomita	(6+8)/7
Carbonato	13/14
Sericita/Muscovita/Illita/Smectita	(5+7)/6
Alunita/Caolinita/Pirofilita	(4+6)/5
Fengita	5/6
Caolinita	7/5
Sílice	11/10, 11/12, 13/10
SiO ₂	13/12, 12/13
Rocas silíceas	(11x11)/(10x12)

2.2.10 SENTINEL 2

La misión Sentinel-2 es el resultado de una colaboración entre la Agencia Espacial Europea (ESA), la Comisión Europea, la industria, los proveedores de servicios y los usuarios de datos. La misión ha sido diseñada y construida por un consorcio de alrededor de 60 compañías lideradas por Airbus Defence and Space, y apoyada por la agencia espacial francesa CNES para optimizar la calidad de imagen y por el Centro Aeroespacial Alemán DLR para mejorar la recuperación de datos mediante comunicaciones ópticas (ESA 2015).

La misión Sentinel-2 consiste en dos satélites desarrollados para dar soporte a la vegetación, la cubierta terrestre y el monitoreo ambiental. El satélite Sentinel-2A fue lanzado por la ESA el 23 de junio de 2015 y opera en una órbita sincrónica al sol con un ciclo de repetición de 10 días. Un segundo satélite idéntico (Sentinel-2B) se lanzó el 7 de marzo de 2017 y está operativo con las adquisiciones de datos disponibles en EarthExplorer. Juntos cubren todas las superficies terrestres, las islas grandes y las aguas interiores y costeras cada cinco días. El instrumento multiespectral (MSI) Sentinel-2 adquiere 13 bandas espectrales que van desde las longitudes de onda Visible y casi infrarroja (VNIR) a infrarrojo de onda corta (SWIR) a lo largo de una franja orbital de 290 km (ESA 2015).



Figura 14. Modelo del satélite Sentinel-2, usado para monitoreo de tierra y mar, mapeo de desastres naturales, observaciones de hielo marino, detección de barcos.

Tabla 4. Sentinel-2 bandas espectrales y resolución.

Banda	Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)	Resolución espacial (m/pixel)
1	443	20	60
2	490	65	10
3	560	35	10
4	665	30	10
5	705	15	20
6	740	15	20
7	783	20	20
8	842	115	10
8a	865	20	20
9	945	20	60
10	1375	30	60
11	1610	90	20
12	2190	180	20
TCI*	RGB	Composite	10

El MSI mide la radiación reflejada a través de la atmósfera dentro de 13 bandas espectrales. La resolución espacial depende de cada banda en particular (4 bandas de 10 metros, 6 bandas de 20 metros y 3 bandas de 60 metros).

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Alteraciones hidrotermales. Las alteraciones hidrotermales típicamente representan cambios en la mineralogía producto de la interacción de fluidos relacionados a un proceso mineralizador, con la roca caja (Corbett, 2017).

Análisis de componentes principales. Es una técnica de procesamiento de imágenes que se ha aplicado comúnmente a los datos del Landsat Thematic Mapper (TM) para localizar zonas de alteración hidrotérmica relacionadas con depósitos metálicos (Crosta, 2002).

Bruma o haze. Es un efecto que aumenta el brillo de una imagen y reduce el contraste entre los diferentes materiales de base. Una atmosfera brumosa dispersa parte de la luz hacia arriba, por lo que una parte de esta radiación es registrada por el sensor, a este efecto se denomina radiancia (NRCAN, 2016).

Espectro electromagnético. Se denomina espectro electromagnético a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas. Se extiende desde la radiación de menor longitud de onda, como los rayos gamma y los rayos X, pasando por la radiación

ultravioleta, la luz visible y la radiación infrarroja, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda, como son las ondas de radio (Chuvieco, 1996).

Reflectancia espectral. La propiedad utilizada para medir la relación entre la energía reflejada y la energía incidente en función de la longitud de onda (Chuvieco, 1996).

Resolución espacial. Es una medida de la distancia angular o lineal más pequeña que puede captar un sensor remoto de la superficie de la Tierra, y viene representada por un pixel (Arbelo, Évora y Labrador, 2012).

Resolución espectral. se puede describir como la capacidad para distinguir diferentes partes del rango de longitudes de onda del espectro electromagnético. En esencia, esto equivale a la cantidad de intervalos de longitud de onda ("bandas") que puede medir un sensor, y cuán estrecho es cada intervalo (NRCAN, 2016).

Resolución radiométrica. Es la cantidad mínima de energía requerida para incrementar el valor de un pixel en un nivel digital o número digital (NRCAN, 2016).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1 GEOGRÁFICA

El área de estudio está localizada en la provincia del Santa, departamento de Ancash al norte de Perú, comprendiendo un área Total de 4 000 km², con cotas que varían entre los 500 m.s.n.m y los 3000 m.s.n.m.

3.1.2 ACCESIBILIDAD

Desde la ciudad de Lima se accede a través de la carretera Panamericana Norte hasta la ciudad de Chimbote. La distancia desde la ciudad de Lima es de 427 km aproximadamente, tomando un tiempo aproximado de 7 horas de viaje.

Tabla 5. Acceso hacia la zona de estudio.

Ruta	Distancia (km)	Tipo de Vía	Tiempo
Lima – Chimbote	427	Asfalto	6 horas
Cajamarca – Chimbote	431	Asfalto	8 horas



Figura 15. Ubicación y accesibilidad.

3.2 METODOLOGÍA

3.2.1 TIPO, NIVEL Y MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

La metodología empleada en la realización de este estudio está basada en una investigación descriptiva y explorativa, fundamentada en la observación indirecta, a través de instrumentos satelitales, de afloramientos de roca presentes en la superficie terrestre con el fin de determinar posibles zonas de alteración hidrotermal.

3.2.2 POBLACIÓN DE ESTUDIO

Representado por las zonas de alteración hidrotermal presentes en la superficie terrestre dentro de los límites de la zona de investigación que comprenden 4000 km² en la provincia del Santa el departamento de Ancash.

3.2.3 MUESTRA

Los tipos de Alteración Argílica, fílica, Propilítica y Silicificación.

3.2.4 UNIDAD DE ANÁLISIS

En cada imagen satelital se evalúa la reflectancia de las diferentes longitudes de ondas electromagnéticas en el rango del visible y del infrarrojo cercano (VNIR), del infrarrojo de onda corta (SWIR) y del infrarrojo termal (TIR). Lo cual permite determinar la presencia de ensambles de alteración asociados a alteración argílica, alteración argílica avanzada y alteración propilítica.

3.2.5 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Primera etapa: Etapa de gabinete, se recopilará información bibliográfica de estudios anteriores, planificación y realización del cronograma de actividades.

Segunda etapa: Se realizará el análisis de componentes principales con el método Crosta en el rango SWIR de las imágenes ASTER en la zona de estudio para la determinación de las diversas alteraciones hidrotermales presentes.

Tercera etapa: Se realiza la toma de 10 muestras de campo para análisis al terraspec.

Cuarta etapa: En esta última etapa se analiza y compara los datos obtenidos mediante el Análisis de Componentes Principales con el método Crosta y los resultados de las muestras con análisis al Terraspec.

Para la investigación se han utilizado los siguientes instrumentos y equipos.

- Mapa Geológico del cuadrángulo de Santa Rosa (Hoja 18-g) al 50K.
- Software's: Envi 5.5, SNAP Desktop, ArcGIS 10.6, Global Mapper 20
- Instrumento de laboratorio: Espectrómetro ASD TerraSpec 4 Hi-Res.
- Equipo de campo, libreta, lupa, GPS, brújula. Rayador, imán.

3.2.6 ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS

Diversas técnicas de análisis y procesamiento pueden ser usadas para la interpretación de datos espectrales en imágenes ASTER y SENTINEL 2. En este estudio se utilizó el análisis de componentes principales y los cocientes de bandas que son parte de las más importantes técnicas usadas para la determinación de zonas de alteración.

Para la determinación de zonas de alteración se usó una imagen ASTER nivel L1T de fecha 12/04/2015 y cuatro imágenes SENTINEL 2 nivel 1C de las siguientes fechas 08/05/2020, 12/07/2020 y 21/10/2021

3.2.6.1 PROCESAMIENTO DE BANDAS ASTER

Calibración Radiométrica. Se realizó la calibración radiométrica de las bandas VNIR y SWIR, donde los niveles digitales (ND) son convertidos a valores de Radiancia (Figura. 16).

Apilamiento de Capas. Las bandas ASTER VNIR y SWIR, corregidas radiométricamente, fueron combinadas dentro de un solo archivo de imagen con una resolución espacial de 30m x 30m. Las bandas ASTER TIR, corregidas radiométricamente, fueron combinadas dentro de un solo archivo de imagen con una resolución espacial de 90m x 90m.

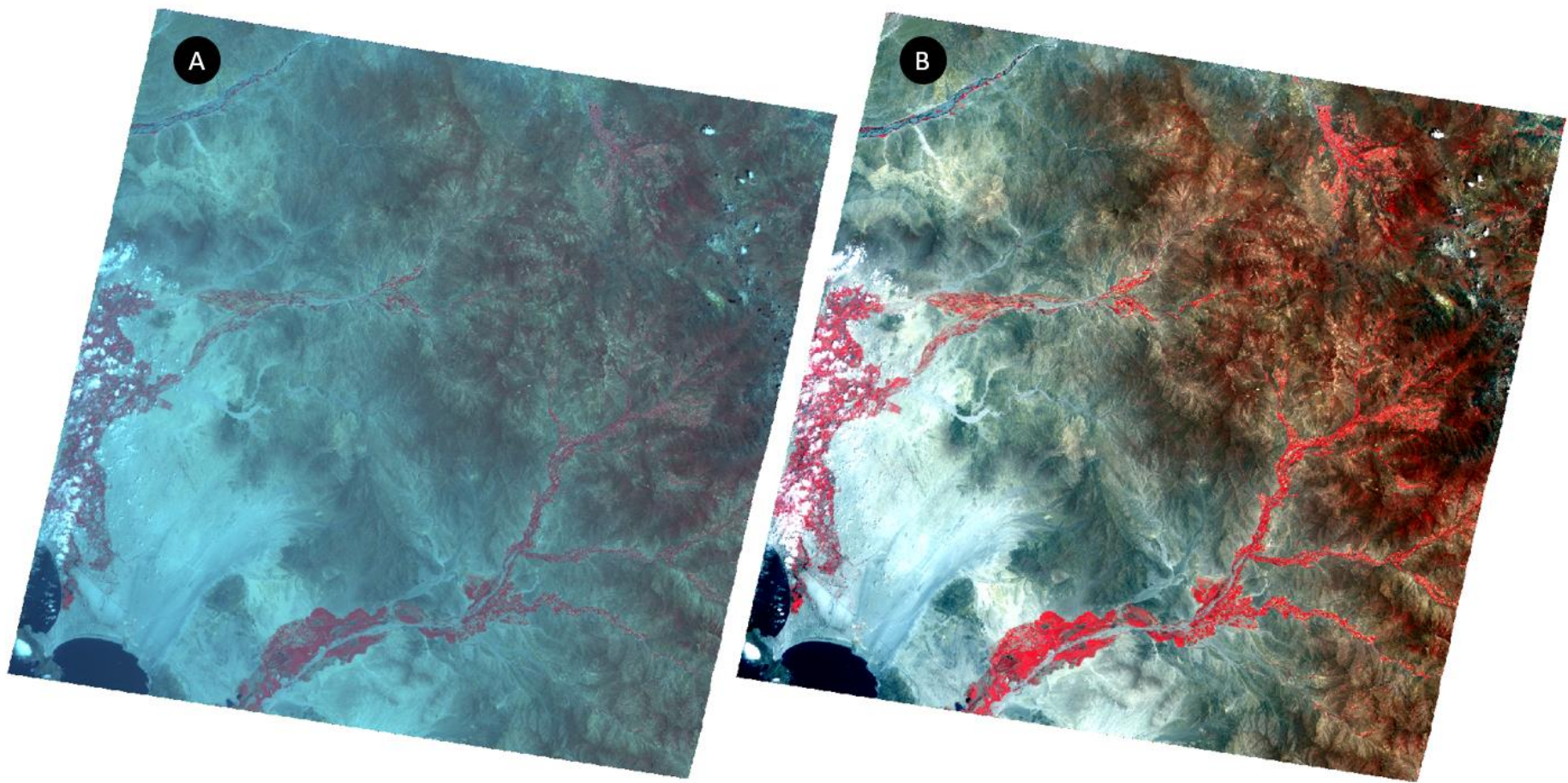


Figura 16. A) Imagen ASTER VNIR sin corrección radiométrica B) Imagen ASTER VNIR con corrección radiométrica.

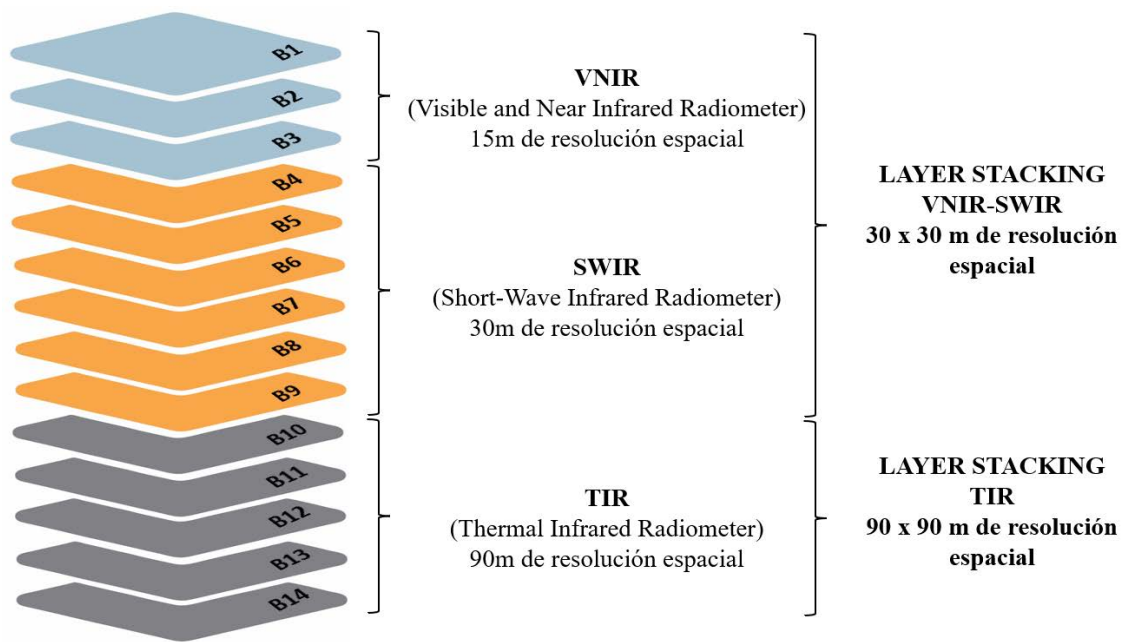


Figura 17. Apilamiento de Capas de imagen ASTER

Corrección Atmosférica. Los valores de radiancia de las imágenes ASTER son convertidos a reflectancia usando la herramienta FLASSH del Software ENVI.

Tabla 6. Estadística de bandas VNIR – SWIR imagen ASTER original

ASTER ORIGINAL (NIVELES DIGITALES)				
Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	0	255	92.036	73.615
Band 2	0	255	84.492	67.887
Band 3	0	244	57.032	43.687
Band 4	0	208	61.426	46.688
Band 5	0	218	57.039	43.565
Band 6	0	233	60.112	46.037
Band 7	0	254	56.820	43.610
Band 8	0	233	55.083	42.377
Band 9	0	222	48.698	37.406

Tabla 7. Estadística de bandas VNIR – SWIR imagen ASTER calibración radiométrica

ASTER - CALIBRACIÓN RADIOMÉTRICA (VALORE DE RADIANCIA)				
Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	0	17.170	6.178	4.947
Band 2	0	17.983	5.936	4.776
Band 3	0	20.947	4.860	3.727
Band 4	0	4.500	1.321	1.005
Band 5	0	1.510	0.392	0.300
Band 6	0	1.450	0.372	0.285
Band 7	0	1.510	0.335	0.258
Band 8	0	0.967	0.227	0.175
Band 9	0	0.703	0.153	0.118

Tabla 8. Estadística de bandas VNIR – SWIR imagen ASTER corrección atmosférica

ASTER - CORRECCIÓN ATMÓSFERICA (VALORES DE REFLECTANCIA)				
Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	0	0.356	0.096	0.086
Band 2	0	0.439	0.120	0.105
Band 3	0	0.699	0.147	0.120
Band 4	0	0.686	0.192	0.154
Band 5	0	0.617	0.153	0.123
Band 6	0	0.625	0.153	0.123
Band 7	0	0.748	0.158	0.128
Band 8	0	0.601	0.134	0.109
Band 9	0	0.656	0.136	0.110

Enmascaramiento de Nubes, Vegetación y Agua. Usando ratio de bandas se procedió al enmascaramiento de nubes, vegetación y agua lo que permite filtrar toda información innecesaria, para que posteriormente dichos pixeles no sean tomados en cuenta cuando se realiza el proceso de análisis espectral.

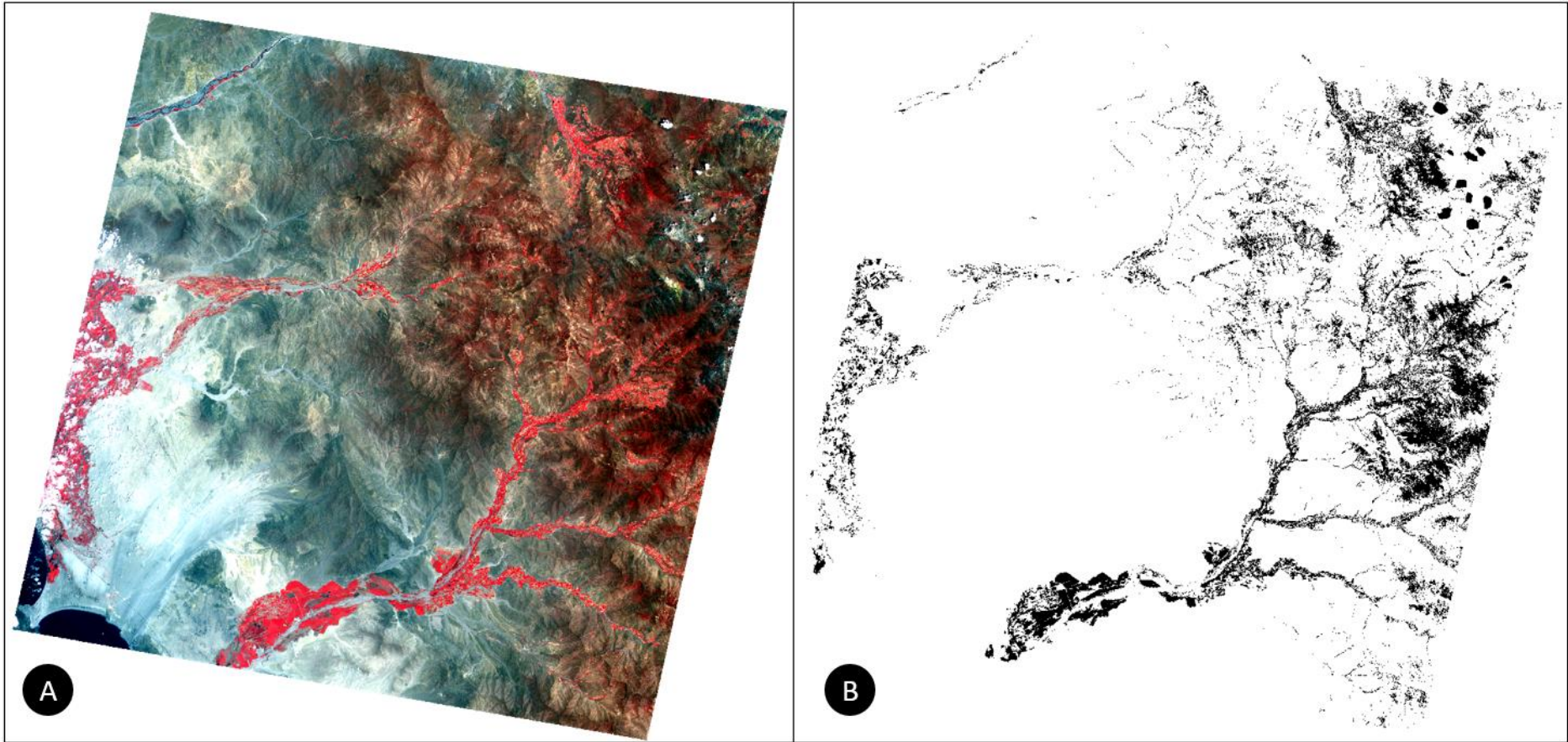


Figura 18. A) Combinación de bandas ASTER 3,2,1 resaltando en tonalidades rojas la presencia de vegetación. B) Enmascaramiento de vegetación en tonalidades grises.

Análisis de Componentes Principales. Se aplico la técnica estadística de análisis de componentes principales (ACP) también conocida como técnica Costra a las bandas ASTER VNIR SWIR, para la generación de planos de abundancia mineral con presencia de Alunita, Illita y Caolinita – Esméctita (Tabla 9).

Tabla 9. Bandas ASTER (VNIR - SWIR) usado para la generación de planos de abundancia mineral mediante PCA (Modificado de Crosta et al 2002)

	Minerales de Alteración		
	Alunita	Illita	Caolinita
	1	1	1
Bandas ASTER	3	3	4
	5	5	6
	7	6	7

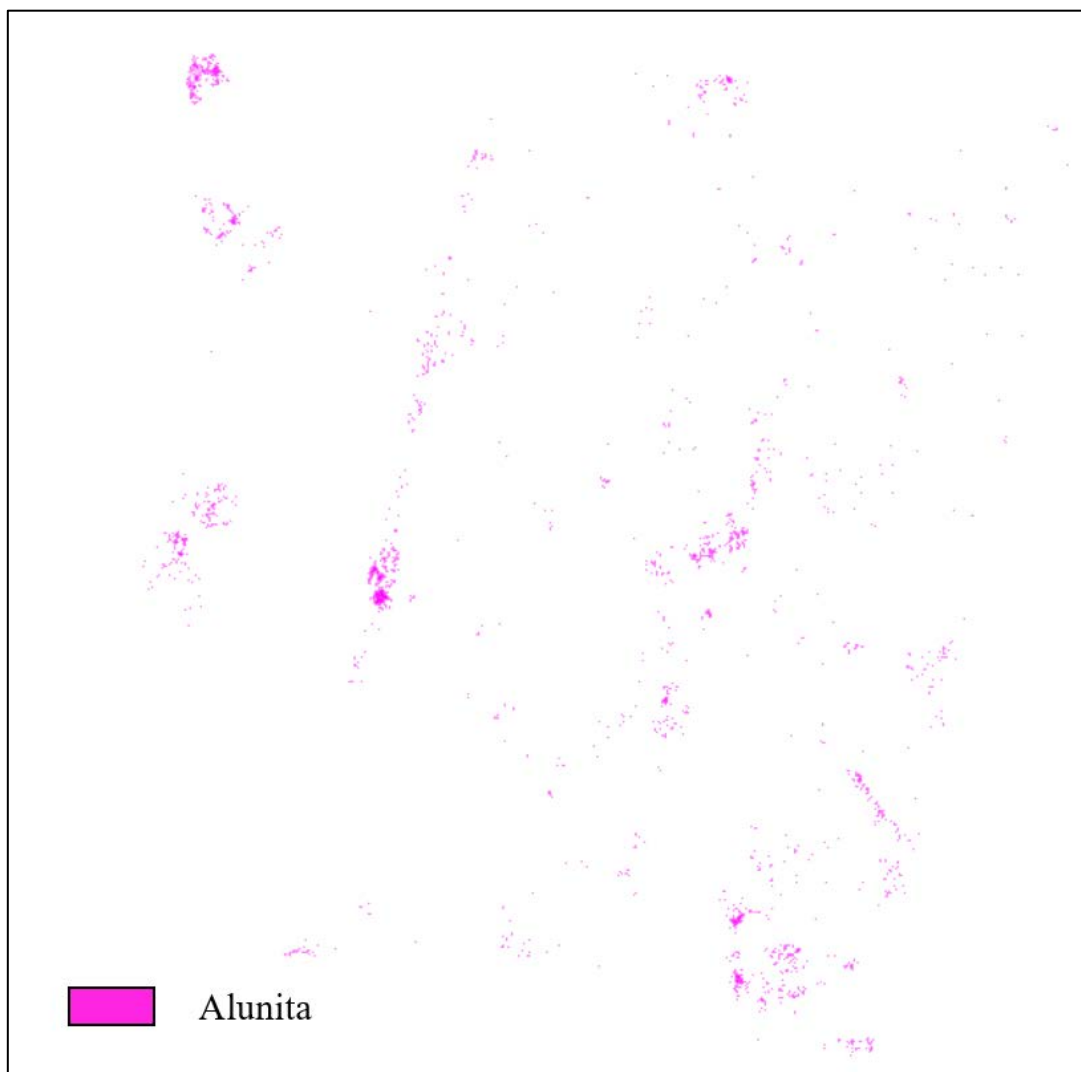


Figura 19. Plano de abundancia de mineral de Alunita en magenta.

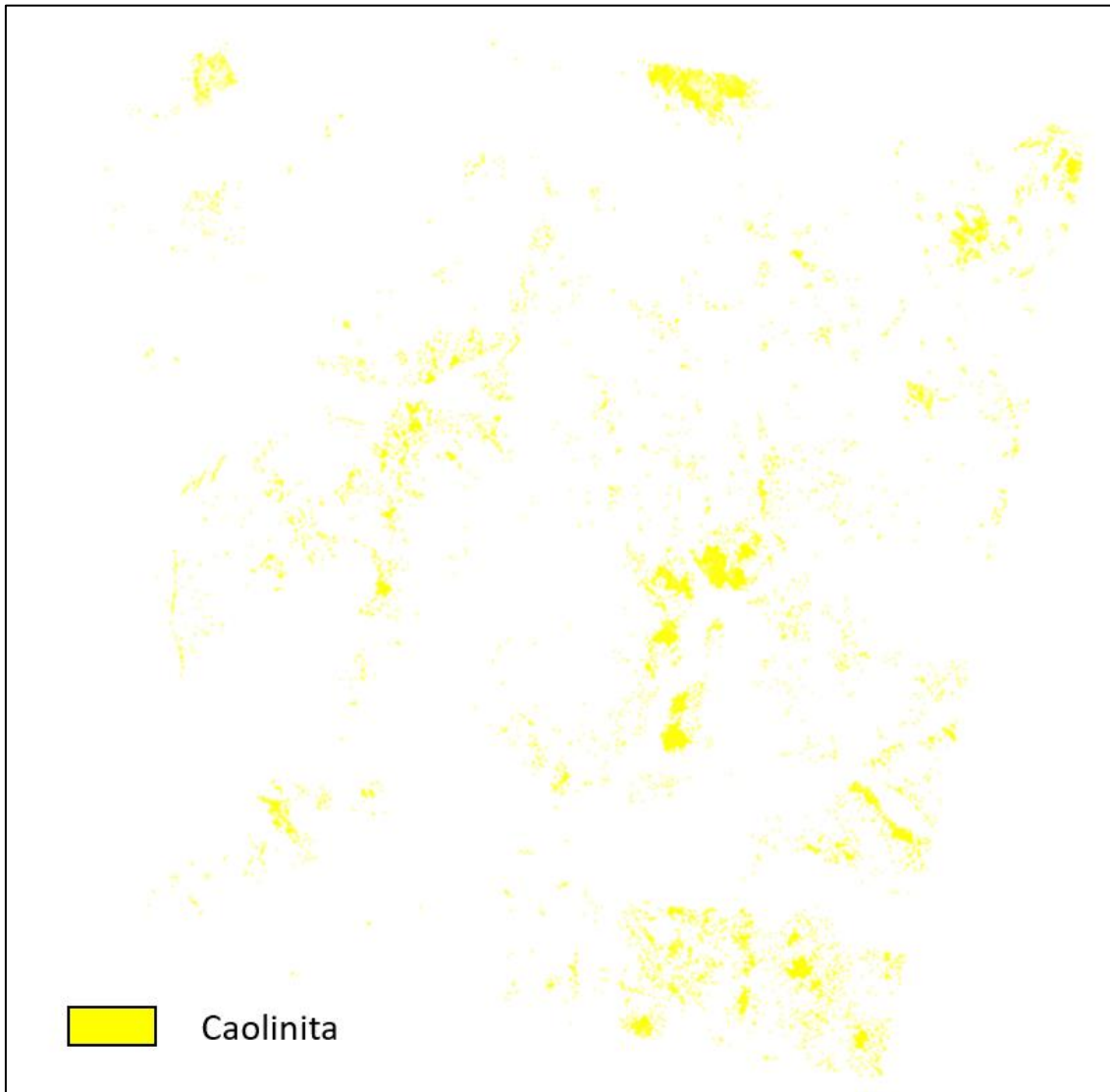


Figura 20. Plano de abundancia de mineral de Caolinita en amarillo.

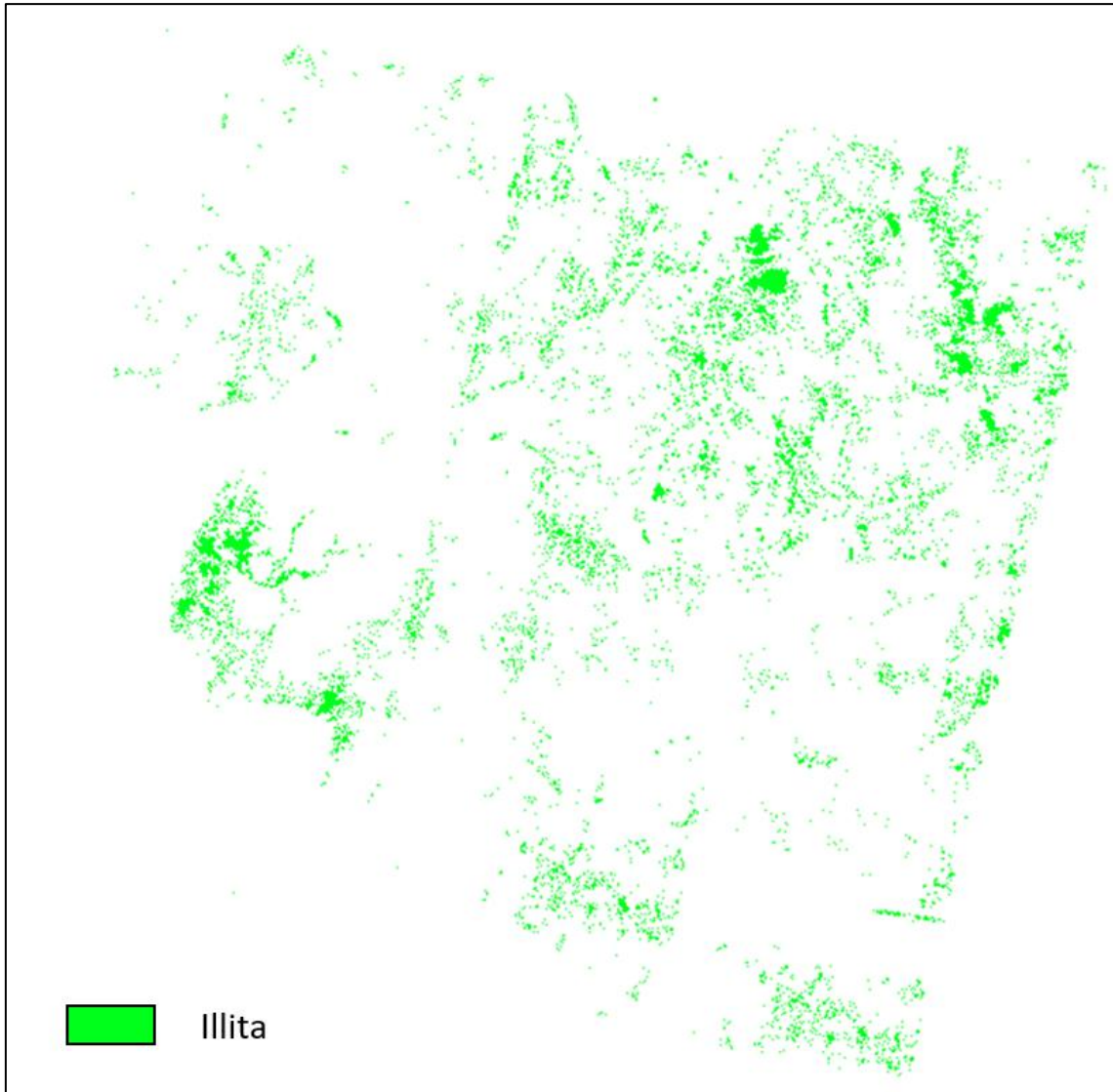


Figura 21. Plano de abundancia de mineral de Illita en verde.

Cocientes de Bandas. Se aplicó la técnica de cociente de bandas a las bandas ASTER TIR, para la generación de planos de abundancia mineral con presencia de Sílice. Previamente las bandas fueron corregidas para valores de emitancia aplicando la herramienta de *Emissivity Normalization* del software ENVI.

Tabla 10. Ratio de Bandas para Sílice y SiO₂ (Modificado de Kalinowski & Oliver et al 2004)

	Ratio	Referencia
Sílice	11/10	CSIRO
	11/12	CSIRO
	13/10	CSIRO
SiO ₂	13/12	Palomera
	12/13	Nimoyima

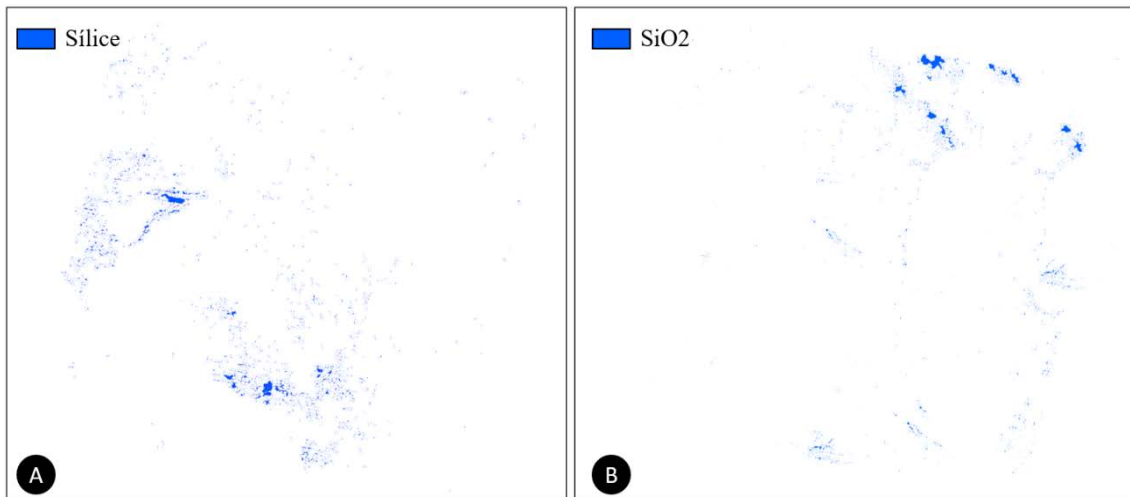


Figura 22. Plano de abundancia de mineral en tonalidades blancas A) Sílice B) SiO₂. Generados usando Cociente de bandas de las imágenes ASTER.

3.2.6.2 PROCESAMIENTO DE BANDAS SENTINEL 2 VNIR Y SWIR

Calibración y Corrección atmosférica. Para la calibración y corrección atmosférica se aplicó el método *Dark Object Subtraction* usando el plugin *Semi-Automatic Classification* del software QGIS. La sustracción de objetos oscuros es un método de corrección atmosférica empírico y simple aplicado a imágenes satelitales, donde se asume que la reflectancia de los objetos oscuros incluye un componente sustancial de la dispersión atmosférica. La sustracción de objetos oscuros busca en cada banda el valor de píxel más oscuro. La dispersión se elimina restando este valor de cada píxel de la banda (Chávez 1988)

Apilamiento de Capas. Las bandas visibles e infrarrojo cercano (NIR), fueron combinadas dentro de un solo archivo de imagen con una resolución espacial de 10m x 10m.

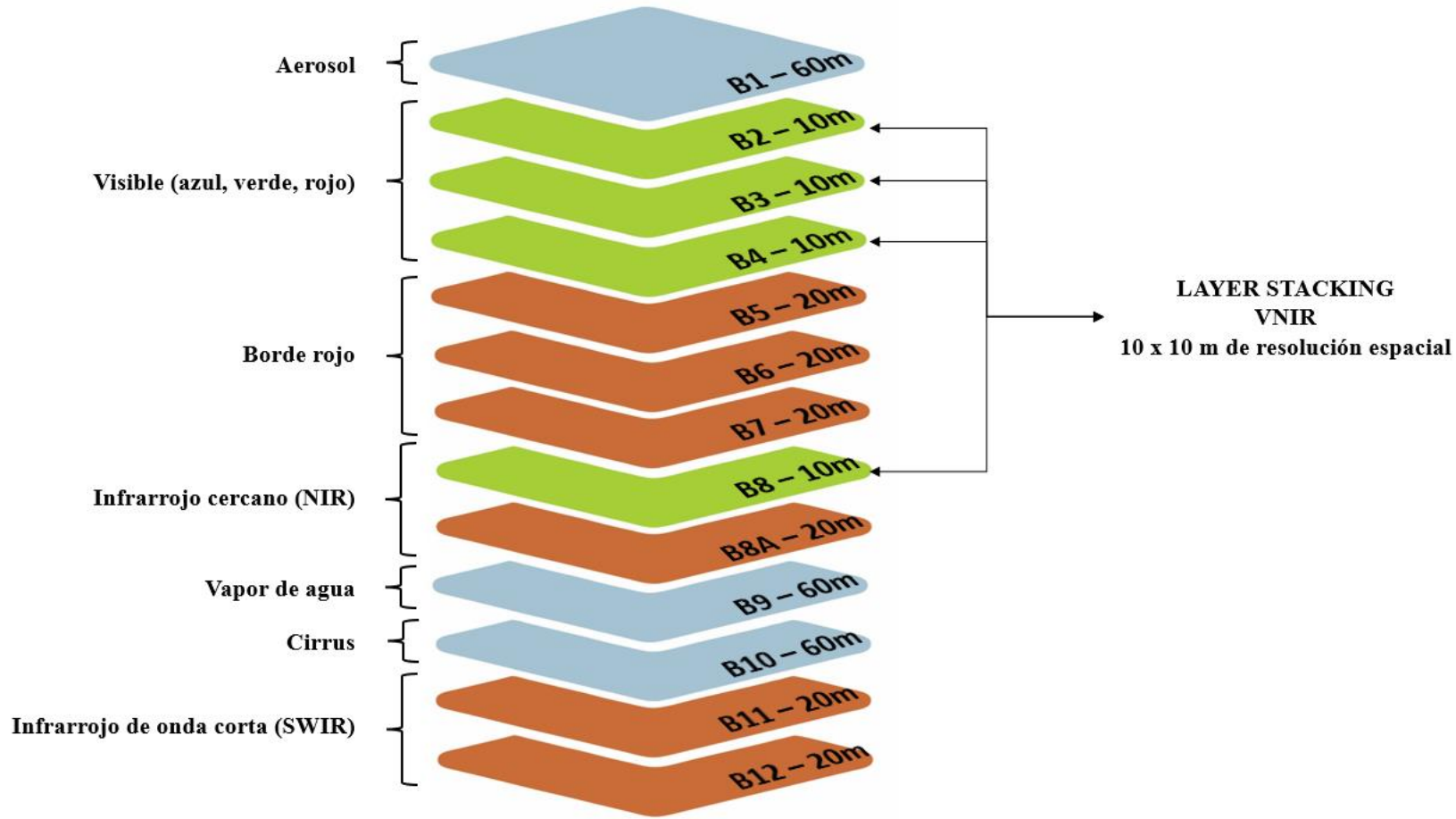


Figura 23. Apilamiento de capas de la imagen SENTINEL 2, se generó una solo imagen apilada de 10m de resolución usando las bandas 2,3,4 y 8

Enmascaramiento de Nubes, Vegetación y Agua. Usando cocientes de bandas se procedió al enmascaramiento de nubes, vegetación y agua.

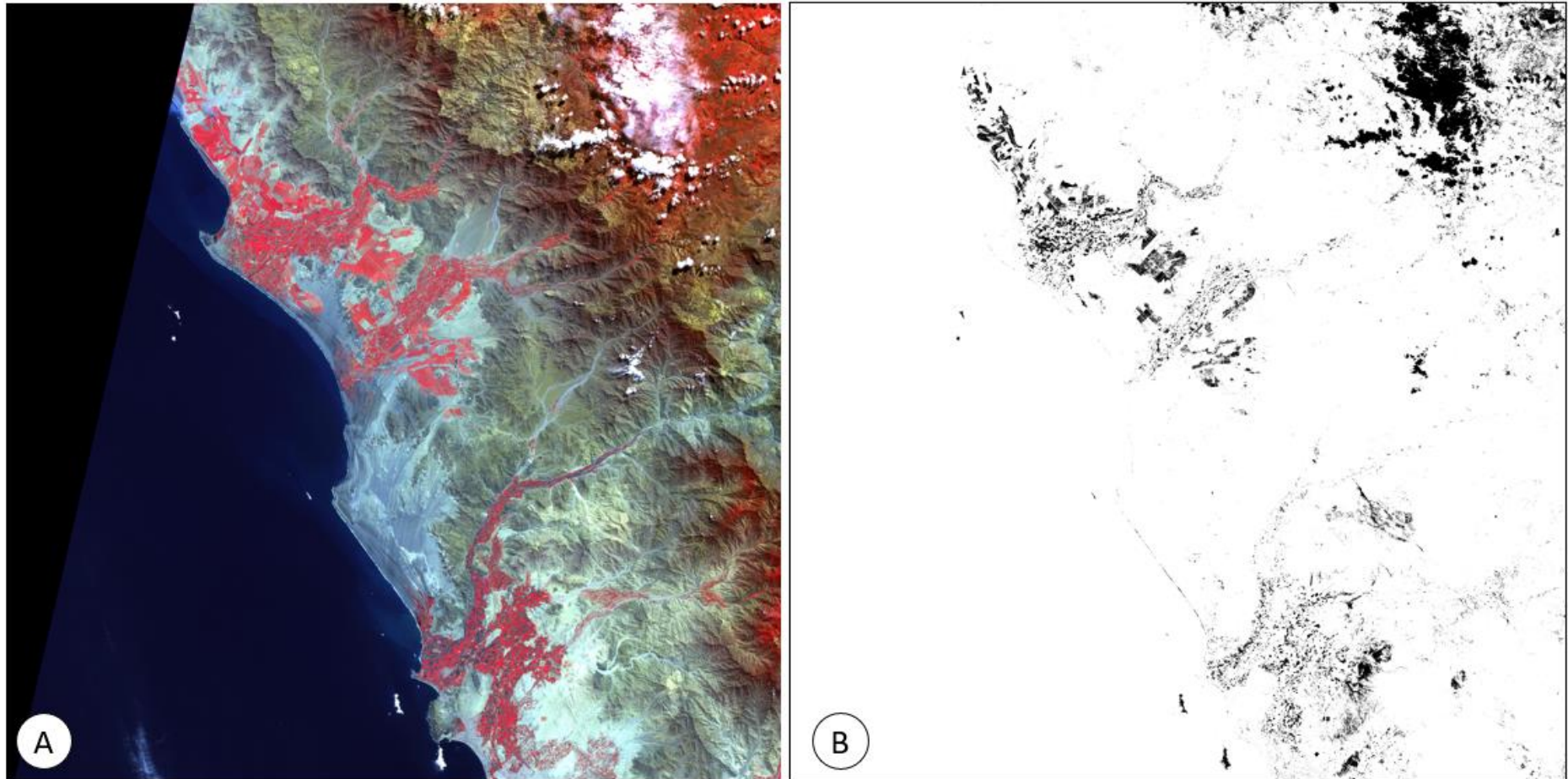


Figura 24. A) Combinación de bandas 8,4,2 de imagen SENTINEL 2 resaltando la vegetación en tonalidades rojas B) Enmascaramiento de nubes, vegetación y agua en tonalidades negras.

Análisis de Componentes Principales. Se aplicó la técnica de análisis de componentes principales (ACP) a las bandas B2, B3, B4 y B8 de la imagen SENTINEL 2. para la generación de planos de abundancia mineral con presencia de óxidos de hierro.

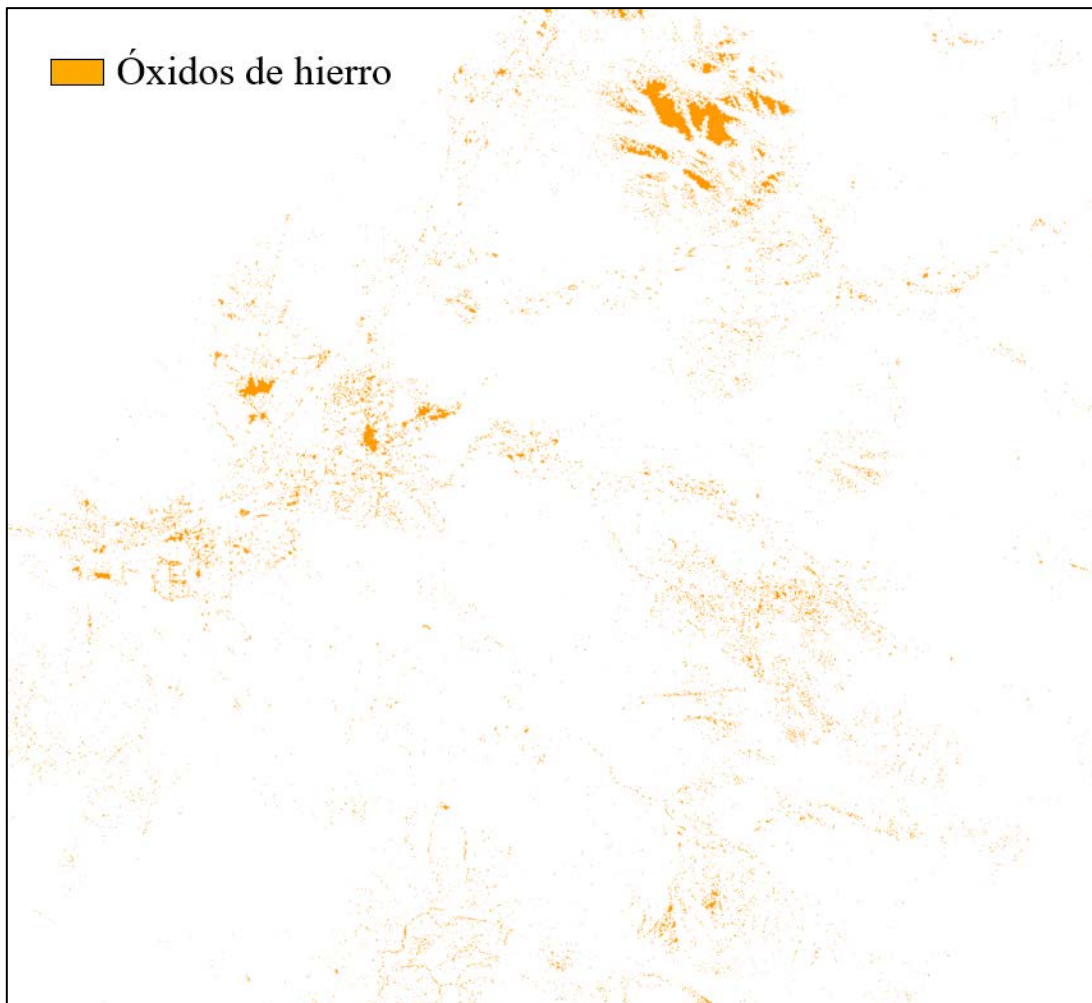


Figura 25. Plano de abundancia de mineral de Óxidos de Hierro en naranja. Generados usando Análisis de Componentes Principales (ACP) de las imágenes SENTINEL 2.

3.3 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

3.3.1 VARIABLES DEPENDIENTES

Alteración hidrotermal.

3.3.2 VARIABLES INDEPENDIENTES

Radiancia, Reflectancia y Corrección atmosférica.

3.4 MARCO GEOLÓGICO

Las unidades geológicas sedimentarias presentes en la zona, son una secuencia volcánico – sedimentaria pertenecientes al Grupo Casma y una secuencia de limolitas, calizas y lutitas pertenecientes a la Formación Santa-Carhuaz.

Aflorando de manera discordante a las formaciones del cretáceo, tenemos una importante presencia de rocas volcánicas conformadas principalmente por lavas y tobas de composición andesítica pertenecientes al Grupo Calipuy. Las rocas intrusivas presentes en la zona están principalmente compuestas por granodioritas a manera de extensos plutones, además de granitos y diques andesíticos en menor medida.

El contexto estructural esta básicamente controlado por el sistema de fallas Pallasca – Cordillera blanca de dirección NO-SE coincidiendo con el rumbo general de los andes, la evidencia geológico-estructural, en la zona de estudio, es compleja debido a que las formaciones cretácicas presentan fuertes plegamientos y fallamientos producto de la orogénesis andina de fines del cretáceo y al emplazamiento posterior del batolito de la costa (Navarro 2010).

3.4.1 ESTRATIGRAFÍA

La estratigrafía correspondiente a la base del volcanismo cenozoico, en la zona de estudio, ha sido dividida en dos dominios estratigráficos 1) Dominio estratigráfico Occidental y 2) Dominio estratigráfico Oriental (Figura 16). Las formaciones presentes en la zona de estudio están conformadas por el Grupo Casma, la Formación Chimú, Formación Santa y Formación Carhuaz (Navarro 2010).

3.4.1.1 GRUPO CASMA

Fue descrita inicialmente por Trottereau & Ortiz (1963) en los alrededores de Casma como Formación Casma. Posteriormente, Cossío (1964) reconoce esta litología al suroeste del cuadrángulo de Santiago de Chuco. Por otro lado, Myers (1980) en las hojas de Huarmey y Huayllapampa describe formaciones volcánico-sedimentarias similares a las

descritas por Trottereau & Ortiz (1963), y Cossío (1964), por lo cual lo eleva a la categoría de grupo. Con sus formaciones: Cochapunta, Punta Gramadal, La Zorra, Breas, Lupín y Pararín, las cuales, en conjunto, alcanzan un espesor aproximado de 6000 m. (Navarro, Rivera y Monge 2010). La litología corresponde a una secuencia volcano-sedimentaria consistente en derrames lávicos y depósitos de flujos piroclásticos andesíticos intercalados con lutitas marrones, areniscas blancas y ocasionalmente calizas recristalizadas.

En la Zona de Estudio se distinguen depósitos de flujos de lava andesítica con espesores de 10 a 20 m, intercaladas con rocas volcanoclásticas de tonalidades verdosa, rojiza y grisácea, conformando un espesor de 200 m las cuales son intruidas por granodioritas pertenecientes al Batolito de la Costa.

3.4.1.2 GRUPO GOYLLARIZQUISGA

En la zona de estudio se exponen afloramientos sedimentarios pertenecientes a las Formaciones Chimú y la formación Santa – Carhuaz del grupo Goyllarizquisga.

FORMACIÓN CHIMÚ

Fueron descritas inicialmente por Stappenbeck (1929), bajo la denominación de cuarcitas Wealdiano. Posteriormente, Benavides (1956) la designa como Formación Chimú. Las rocas que caracterizan esta formación son areniscas cuarzosas principalmente de grano fino, de color gris claro a blanquecinas, con tonalidades marrón rojizas debido a la meteorización. Generalmente están dispuestas en capas gruesas y resistentes. En algunos sectores, en la parte inferior se distinguen niveles de limoarcillitas y limolitas grises las cuales a veces están intercaladas con mantos de carbón (Navarro, Rivera y Monge 2010).

FORMACIÓN SANTA – CARHUAZ

Originalmente esta secuencia fue estudiada por Stappenbeck (1929) con la denominación de “Lutitas Pallares” posteriormente Benavides (1956) en su trabajo “Cretaceous System

in Northern Perú” dividió las “lutitas Pallares” en dos unidades con el rango de formación, denominando Santa a la unidad inferior y Carhuaz a la unidad superior. Formación Santa. está constituida por limolitas gris amarillentas a oscuras intercaladas con lutitas arenosas friables de color gris en la base y por calizas negras, fosilíferas estratificadas en capas delgadas. Formación Carhuaz. Consiste en una secuencia de lutitas claras, marrones, gris oscuras finamente estratificadas e intercaladas con capas delgadas de calizas fosilíferas (Cossio 1964).

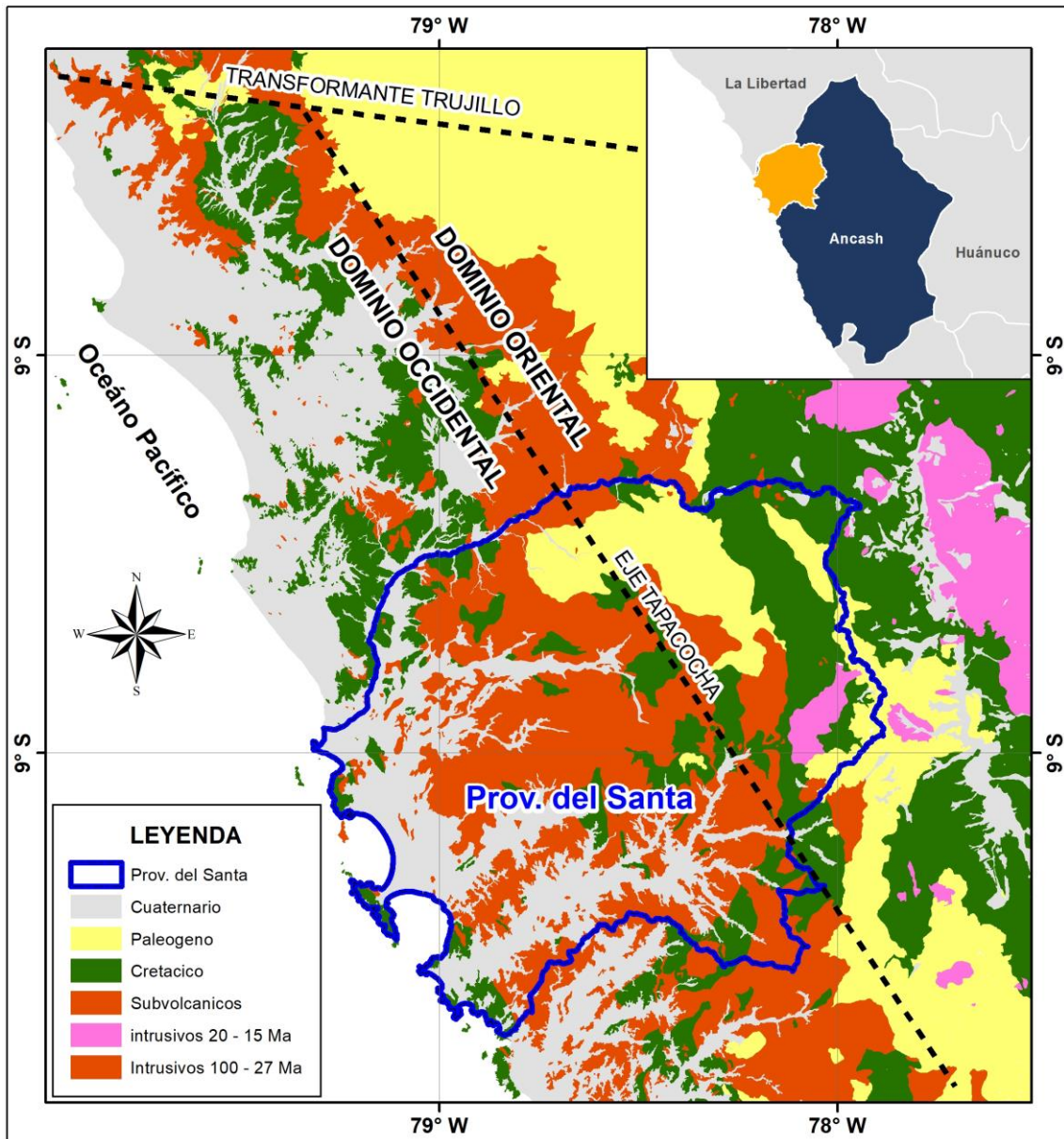


Figura 26. Mapa geológico regional y dominios estratigráficos (Modificado de Navarro, Rivera y Monge 2010)

3.4.2 GRUPO CALIPUY

La estratigrafía volcánica de la zona de estudio está compuesta principalmente por la presencia del Centro volcánico Macón conformado por depósitos volcanoclasticos y flujos de lavas andesíticas y la Secuencia volcánica Matala caracterizado por una secuencia de flujos de lavas y algunos depósitos piroclásticos, ambos pertenecientes a los volcánicos del Grupo Calipuy (Navarro, Rivera y Monge 2010).

3.4.2.1 CENTRO VOLCÁNICO MACÓN

Ubicado a 10 km al oeste del distrito de Macate, corresponde a un centro volcánico erosionado con evidencias de haber sufrido un colapso gravitacional en su sector este. Sus depósitos han sido agrupados en cuatro eventos eruptivos. El primer evento eruptivo (Po-ma/1) está conformado por depósitos volcanoclásticos de coloración gris violácea, en capas de 0,20 a 0,30 m de espesor. Sobreyacen depósitos de flujos de lava andesíticas, color gris verdoso, de textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa y cristales de piroxeno. Cubiertos por depósitos de flujos piroclásticos de cenizas, de color gris claro, con cristales de plagioclasa, anfíbol y biotita. Con un espesor aproximado de 400 m (Navarro, Rivera y Monge 2010).

El segundo evento eruptivo (Po-ma/2) está conformado por depósitos de flujos de lava andesítica, de color gris verdosa, y en capas tabulares, con textura porfídica, fenocristales de plagioclasa y cristales de piroxeno; Sobreyace una intercalación de depósitos de flujos piroclásticos de ceniza, de coloraciones grises, con cristales de plagioclasa, cuarzo y biotita; además de fragmentos líticos y lapilli acrecional; cubiertos por depósitos de flujos piroclásticos de pómez y cenizas, color gris blanquecino, con cristales de plagioclasa, cuarzo y anfíbol, pómez densas y porfiríticas con similar mineralogía y fragmentos líticos lávicos y de textura porfídica. La parte superior está conformada por depósitos de flujos piroclásticos de pómez y cenizas grises, soldados, con pequeños fiammes que muestran una textura eutaxítica, con cristales de plagioclasa, cuarzo y anfíbol, y pómez densas con similar mineralogía y abundante contenido de fragmentos líticos lávicos. La secuencia conforma un espesor promedio de 650 m (Navarro, Rivera y Monge 2010).

Conformando el tercer evento eruptivo (Po-ma/3) se tienen varios niveles de flujos de lava andesítica, de coloración gris azulina, de textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa y cristales de piroxeno. Con un espesor aproximado de 200 m. El último evento eruptivo (Po-ma/4) corresponde al emplazamiento de avalanchas de escombros ligados al colapso gravitacional del sector este del centro volcánico. Este colapso está atestiguado por un escarpe vertical y subanular identificado en los cerros Macón. Los depósitos de avalanchas de escombros rellenan el actual valle de Macate-Shacsha. Además, los depósitos lacustrinos y terrazas aluviales colgadas reconocidas en los sectores de los valles del Santa y Tablachaca, depositadas probablemente en pequeñas lagunas generadas por el represamiento de los paleoríos homónimos, atestiguarían el colapso del sector este del centro volcánico (Navarro, Rivera y Monge 2010).

3.4.2.2 SECUENCIA VOLCÁNICA MATA LA

Se caracteriza por depósitos de flujos de lavas y algunos depósitos de flujos piroclásticos, los cuales se encuentran muy alterados (silicificación y argilización). La base está conformada por abundantes depósitos de flujos de lava andesíticos, gris verdosos, textura porfírica, con fenocristales de plagioclasa y cristales de piroxeno. Cada flujo tiene un espesor aproximado de 50 m y una inclinación de 20° al SO. Sobreyacen otros depósitos de flujos de lava, gris azulinos, con textura porfídica, fenocristales de plagioclasa y cristales de piroxeno. Estos flujos están dispuestos en capas tabulares de 15 a 20 m, conformando un espesor de 100 m, así como otros depósitos de flujos de lava muy alterados, en los cuales se reconocen sólo algunos moldes de cristales de plagioclasas, mientras que en algunas capas la alteración es pervasiva. En conjunto, parece que estos depósitos rellenan una paleosuperficie erosiva labrada tanto sobre las rocas del Batolito de la Costa y de Formación Tablachaca, conformando un espesor total de 600 m (Navarro, Rivera y Monge 2010).

3.4.3 ROCAS INTRUSIVAS

Las rocas intrusivas corresponden a tonalitas, sienogranitos y granodioritas pertenecientes a dos eventos magmáticos presentes en la zona de estudio. El primero, ocurrido entre 100

y ~60 Ma, está asignado al Batolito de la Costa (Pitcher, 1985; Cobbing, 2000). El segundo, principalmente stocks de una edad del Eoceno al Mioceno, ocurrido a partir de 55 a 50 Ma (Vidal, 1980; Cobbing, 2000).

3.4.3.1 BATOLITO DE LA COSTA

Las rocas intrusivas del Batolito de la Costa corresponden a tonalitas, sienogranitos y granodioritas emplazadas entre 100 y ~60 Ma, es decir, durante un periodo entre el Cretáceo superior al Paleoceno. En la zona de estudio estas rocas intruyen secuencias sedimentarias cretáceas del Grupo Casma. Los magmas del Batolito de la Costa provinieron probablemente del manto (Atherton & Sanderson, 1985).

3.4.3.2 INTRUSIVOS EOCENO-MIOCENOS

En la zona de estudio se distinguen afloramientos de un cuerpo de granodiorita que reporta una edad de 28,9 Ma; asimismo, en el caserío de Chachas un nuevo cuerpo de granodiorita ha reportado una edad de $38,7 \pm 1$ Ma.

El estudio petrográfico de algunas muestras evidencia una textura granular, con minerales menores a 3 mm, entre ellos los que más predominan son las plagioclasas y algunas zonas presentan inclusiones de óxidos, vítreas y de biotita. De esta manera, se distinguen tres tipos petrográficos: granitos, granodioritas y dioritas.

3.4.4 CONTEXTO ESTRUCTURAL

En la zona de estudio el contexto estructural es complejo, debido a que las formaciones Cretácicas están fuertemente plegadas y falladas. Estas deformaciones se deben a la orogénesis andina de fines del cretáceo y a los fenómenos subsiguientes al emplazamiento del batolito de la costa y al movimiento epirogénico que afecto en general a los andes (Navarro, Rivera y Monge 2010).

Las estructuras presentan una orientación NO-SE coincidiendo con el rumbo general de los andes. Los pliegues son amplios y de flancos suaves. Las fallas son de dos tipos: a)

Fallas inversas originadas probablemente durante el plegamiento de los sedimentos; b)
Fallas de gravedad, posteriores a la compresión a las cuales cortan con ángulos de 45°
(Cossio 1964).

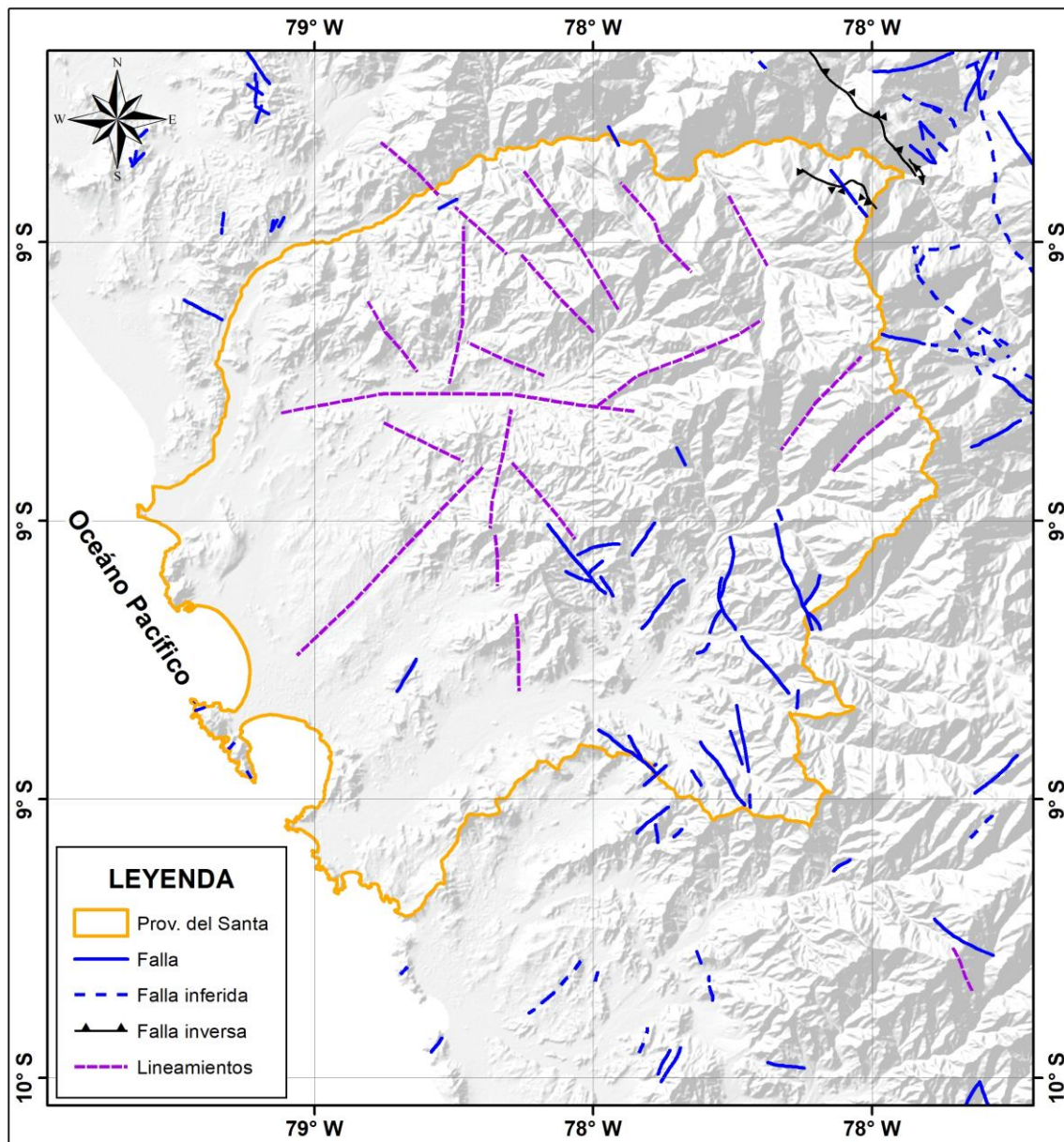


Figura 27. Contexto Estructural. (Modificado de Navarro, Rivera y Monge 2010)

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El proceso de identificación de las anomalías espectrales fue aplicado a tres subgrupos de cuatro bandas ASTER y un subgrupo de cuatro bandas SENTINEL 2. Cada subgrupo de bandas fue seleccionado de acuerdo a la posición de las características espectrales del mineral a identificar dentro del espectro VNIR y SWIR (Tabla 7).

Después de aplicar Análisis de Componentes Principales (ACP), se examina la matriz de vectores propios (*eigenvector*) para cada subgrupo de bandas donde se identifica cual componente principal (PC) contiene la información del mineral objetivo. Los componentes principales que contienen la información espectral del mineral objetivo muestran altos valores de vectores propios (*eigenvector*) en las mismas bandas ASTER que son usadas para la determinación espectral del mineral objetivo, pero con signo opuesto (Loughlin 1991).

La aplicación del método de Cociente de Bandas fue aplicada a las bandas termales (TIR) de la imagen ASTER tomando en cuenta la clasificación propuesta por Kalinowski & Oliver et al 2004 (Tabla 8).

4.1.1 DISCRIMINACIÓN DE MINERALES DE ALTERACIÓN ARGÍLICA AVANZADA

Para la discriminación de zonas con presencia de alteración argílica avanzada (Figura 27) se usó la técnica de Análisis de Componentes Principales para el subgrupo de bandas ASTER 1, 3, 5 y 7 (Tabla. 9) la cual permite discriminar la presencia de alunita (Crosta 2002).

Tabla 11. Estadísticas de vectores propios para las bandas ASTER 1, 3, 5 y 7. El CP4 muestra altos valores de vectores propios entre las bandas 5 y 7 (Crosta 2002).

	CP1	CP2	CP3	CP4
Band 1	0.341	0.504	0.551	0.571
Band 3	0.908	0.033	-0.336	-0.248
Band 5	-0.230	0.861	-0.266	-0.367
Band 7	-0.078	0.053	-0.717	0.691

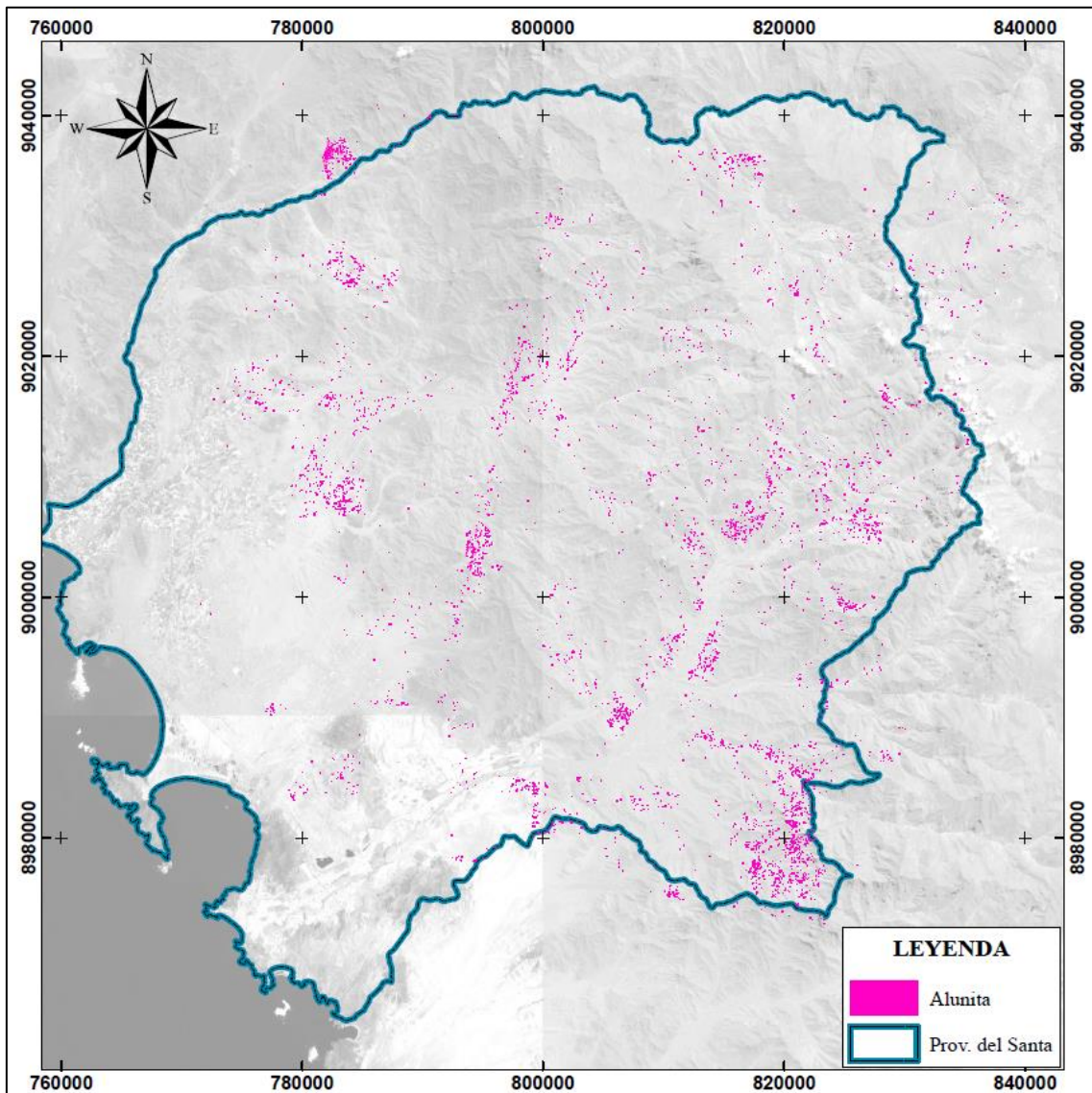


Figura 28. Plano de abundancia mineral de alunita (magenta)

4.1.2 DISCRIMINACIÓN DE MINERALES DE ALTERACIÓN ARGÍLICA

Para la discriminación de zonas con presencia de alteración argílica (Figura 28) se usó la técnica de Análisis de Componentes Principales para el subgrupo de bandas ASTER 1, 4, 6 y 7 (Tabla. 7) la cual permite discriminar la presencia de caolinita (Crosta 2002).

Tabla 12. Estadísticas de vectores propios para las bandas ASTER 1, 4, 6 y 7. El CP4 muestra altos valores de vectores propios entre las bandas 4 y 6 (Crosta 2002).

	CP1	CP2	CP3	CP4
Band 1	0.303	0.624	0.501	0.518
Band 4	0.884	-0.450	-0.076	0.098
Band 6	-0.348	-0.626	0.398	0.573
Band 7	-0.070	0.127	-0.765	0.628

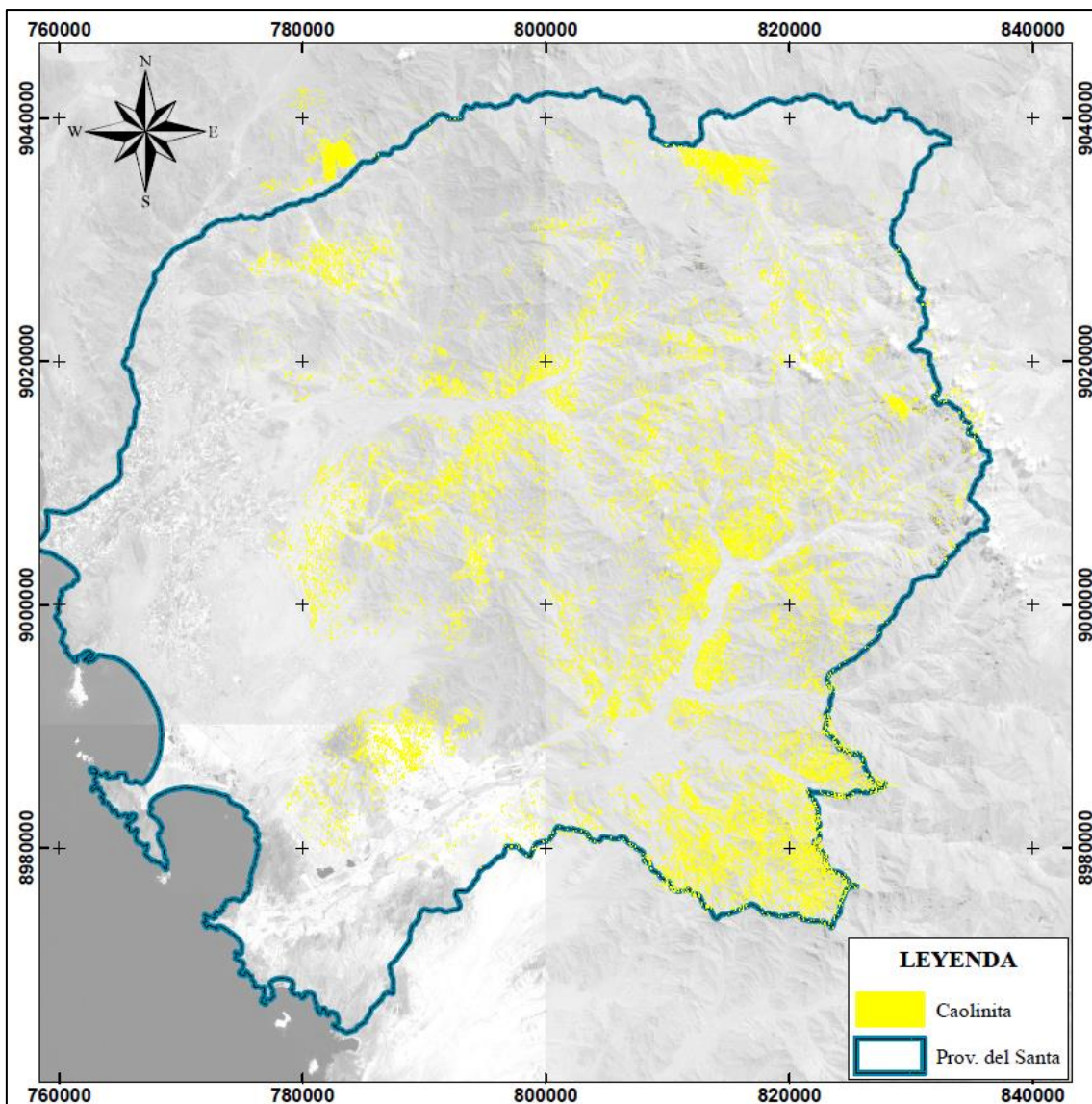


Figura 29. Plano de abundancia mineral de caolinita (amarillo)

4.1.3 DISCRIMINACIÓN DE MINERALES DE ALTERACIÓN PROPILÍTICA

Para la discriminación de zonas con presencia de alteración propilítica (Figura 29) se usó la técnica de Análisis de Componentes Principales para el subgrupo de bandas ASTER 1, 3, 5 y 6 (Tabla. 7) la cual permite discriminar la presencia de Illita (Crosta 2002).

Tabla 13. Estadísticas de vectores propios para las bandas ASTER 1, 3, 5 y 6. El CP4 muestra altos valores de vectores propios entre las bandas 3 y 6 (Crosta 2002).

	CP1	CP2	CP3	CP4
Band 1	0.343	0.510	0.557	0.558
Band 3	0.889	0.088	-0.265	-0.362
Band 5	0.294	-0.855	0.326	0.275
Band 6	0.072	-0.025	-0.716	0.694

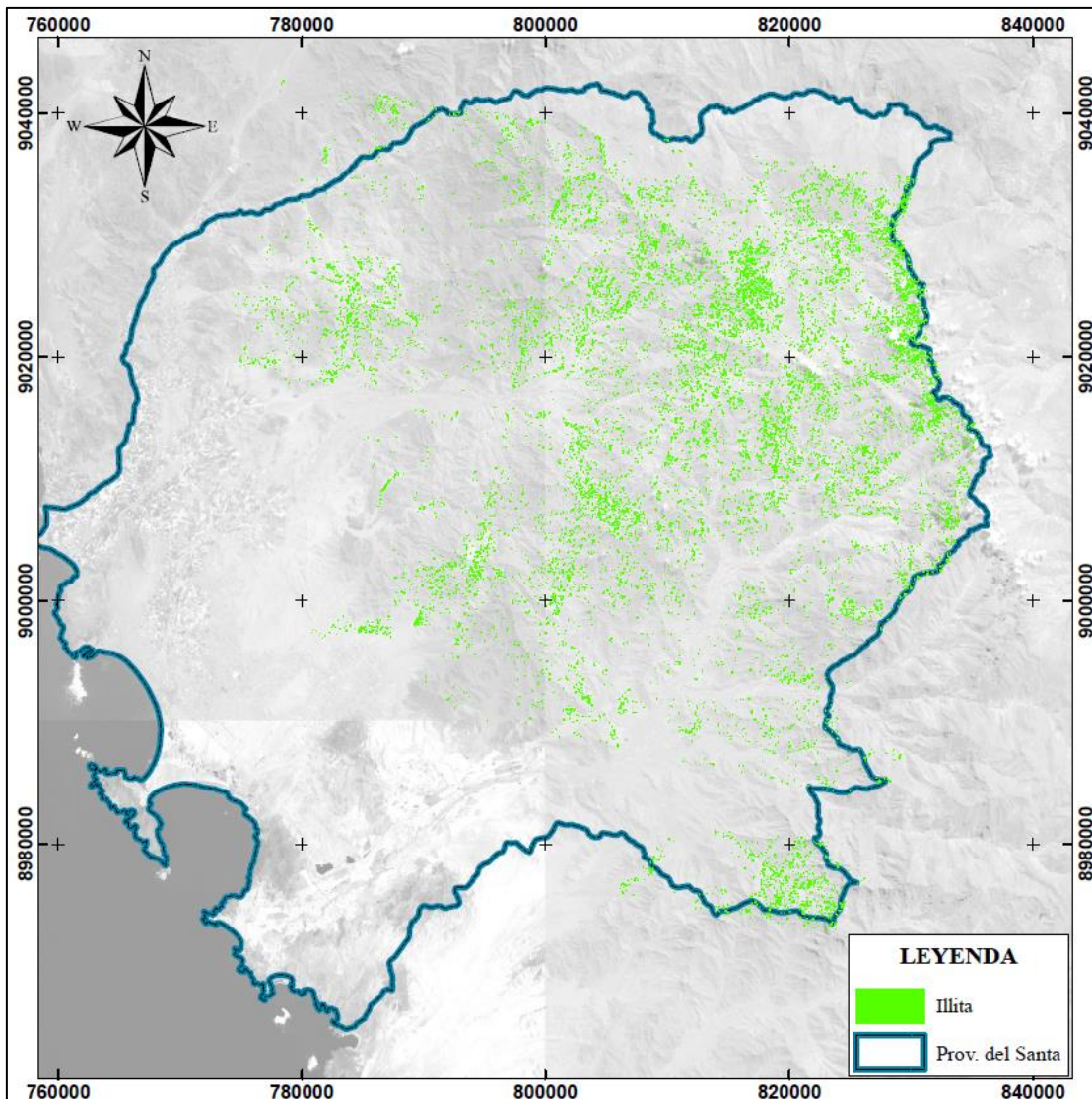


Figura 30. Plano de abundancia mineral de Illita (verde)

4.1.4 DISCRIMINACIÓN DE SÍLICE

Para la discriminación de zonas con presencia de sílice (Figura 30) se usó la técnica de cociente de bandas entre las bandas ASTER 10, 11 y 12 (Tabla. 8) la cual permite discriminar la presencia de sílice (Kalinowski & Oliver et al 2004).

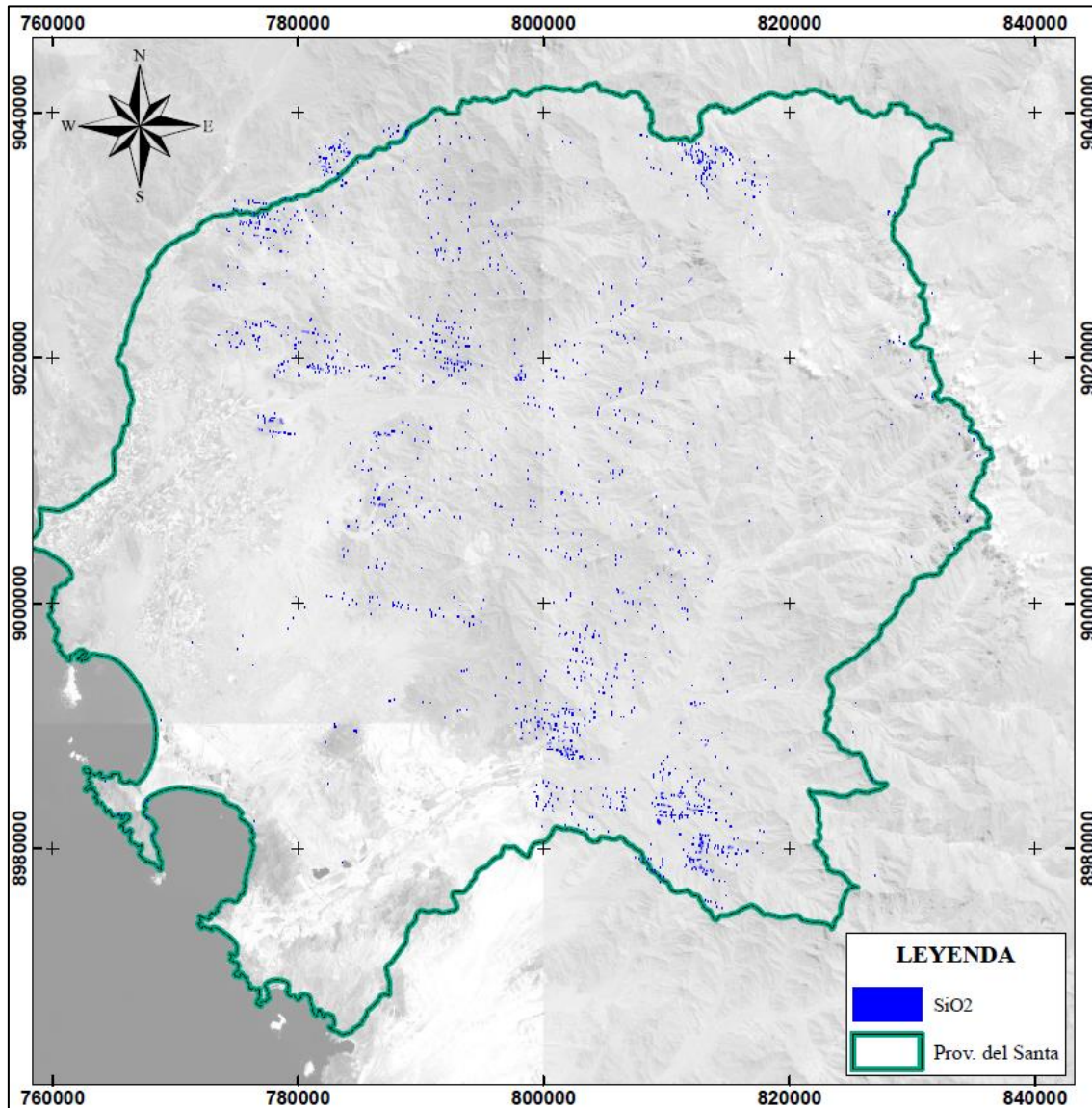


Figura 31. Plano de abundancia de SiO_2 (azul)

4.1.5 DISCRIMINACIÓN DE OXIDOS DE HIERRO

Para la discriminación de zonas con presencia de óxidos de hierro (Figura 31) se usó la técnica de Análisis de Componentes Principales para el subgrupo de bandas SENTINEL 2, 3, 4 y 8 la cual permite discriminar la presencia de óxidos de hierro (Vargas 2015).

Tabla 14. Estadísticas de vectores propios de la imagen SENTINEL 2 para las bandas 2, 3, 4 y 8. El CP4 muestra altos valores de vectores propios entre las bandas (Vargas 2015).

	CP1	CP2	CP3	CP4
Band 2	0.443	0.656	0.716	0.742
Band 3	0.518	0.043	-0.436	-0.322
Band 4	-0.299	0.320	-0.345	-0.477
Band 8	-0.102	0.069	-0.931	0.899

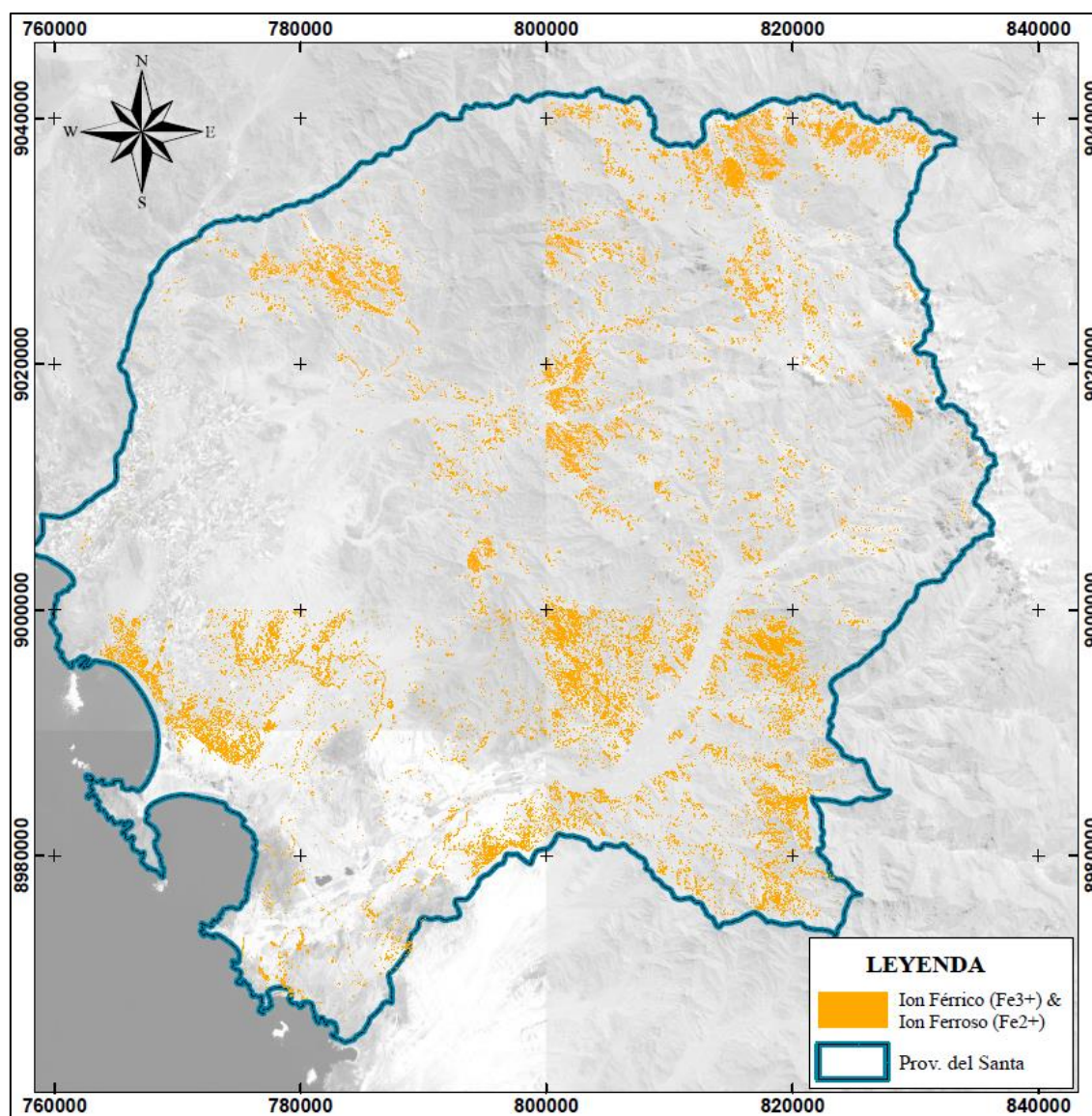


Figura 32. Plano de abundancia de Goethita (ion férrico Fe³⁺) y hematita (ion ferroso Fe²⁺) (naranja)

4.1.6 IDENTIFICACIÓN DE ANOMALÍAS

Los resultados obtenidos producto del análisis de las imágenes ASTER y SENTINEL 2 permitió identificar tres principales anomalías con presencia de minerales de alteración: Anomalia Pampa Blanca, Anomalia Quebrada Grande y Anomalia Cerro Colorado.

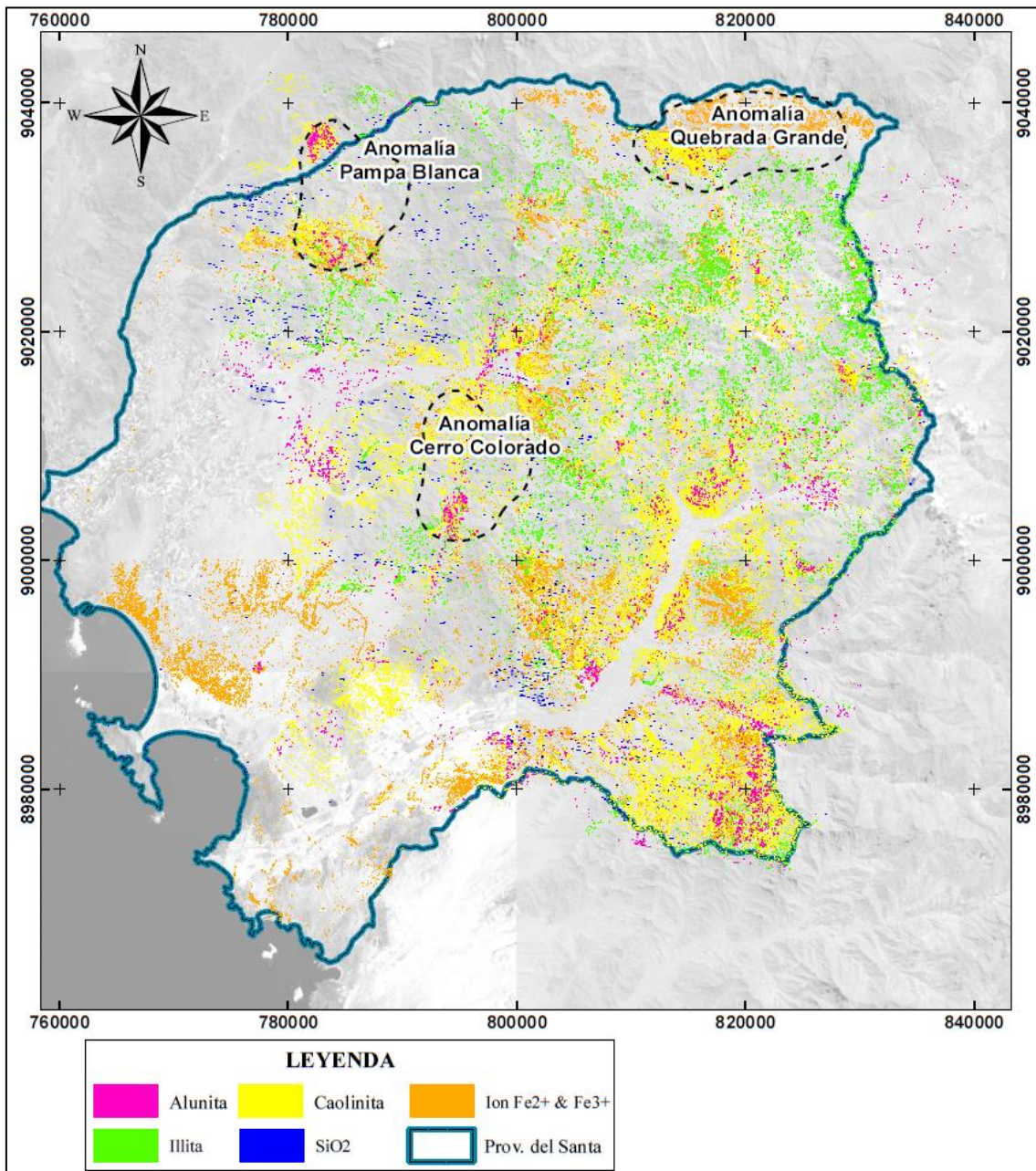


Figura 33. Mapa temático mostrando los productos resultantes del análisis de imágenes ASTER y SENTINEL 2 junto a las principales anomalías identificadas.

La anomalía Pampa Blanca ubicada a 45 km al NNE de la ciudad de Chimbote, se caracteriza por la presencia de intrusiones granodioríticas pertenecientes al Batolito de la Costa. La anomalía Quebrada Grande ubicada a 65 km al NE de la ciudad de Chimbote, se caracteriza por la presencia de secuencias sedimentarias del grupo Goyllarizquisga en contacto con flujos volcánicos del grupo Calipuy. La anomalía Cerro Colorado ubicada a 30km al E de la ciudad de Chimbote, se caracteriza por la presencia de capas volcano sedimentarios del grupo Casma cortadas por intrusiones granodioríticas.

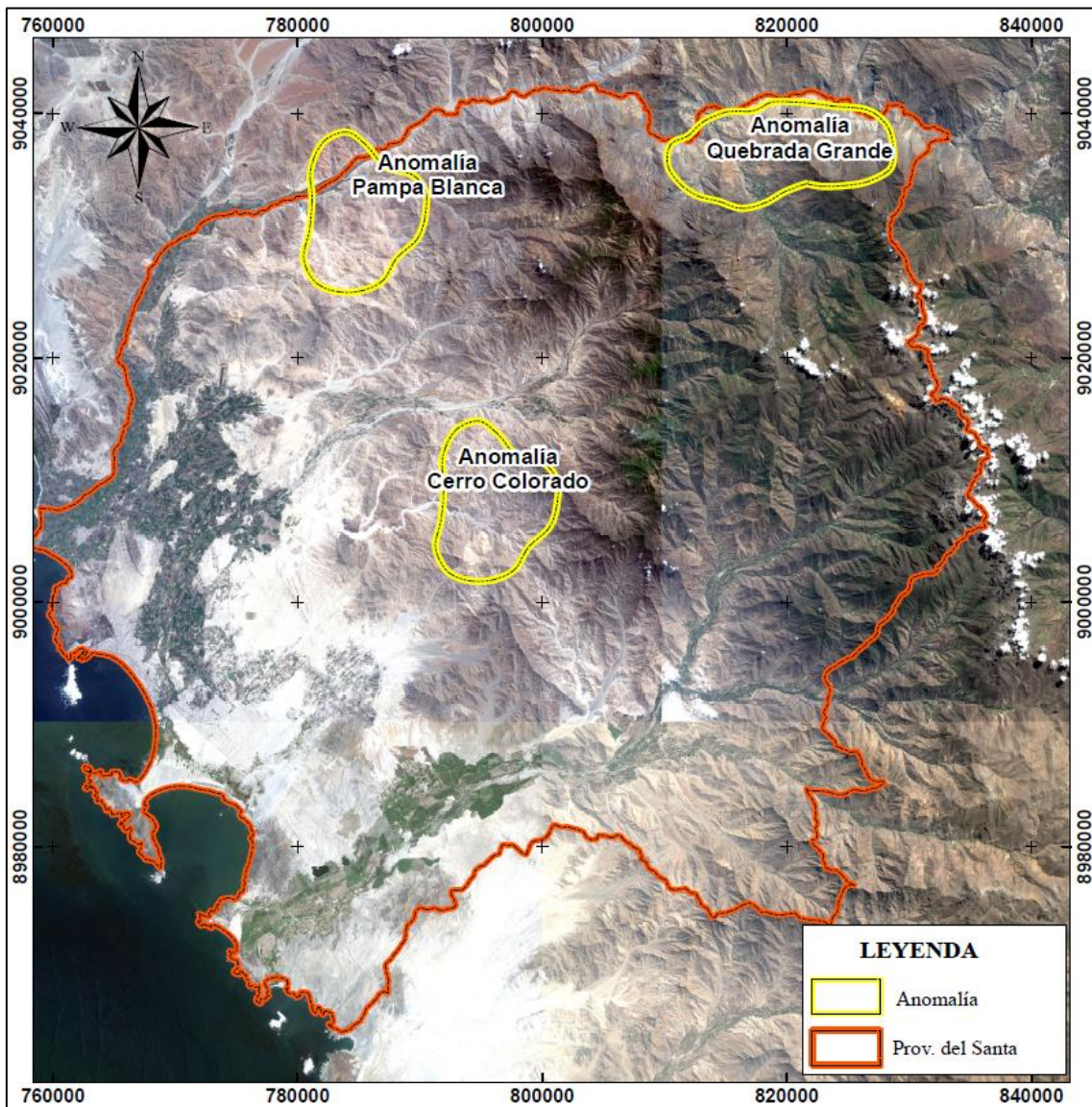


Figura 34. Targets de exploración identificados a partir de los planos de abundancia mineral obtenidos mediante el análisis de componentes principales y cociente de bandas aplicados a las imágenes ASTER y SENTINEL 2.

4.2 ANOMALÍA PAMPA BLANCA

La anomalía Pampa Blanca está ubicada en el margen derecho del río Santa aproximadamente a 45 Km al NNE de la ciudad de Chimbote, se accede por la carretera Chimbote – Pallasca la cual se encuentra asfaltada y en buenas condiciones.

Geológicamente se encuentra sobre pulsos de granito y tonalita perteneciente al Batolito de la Costa los cuales están en contacto con niveles de lavas de composición andesítica perteneciente al grupo Casma.

Estructuralmente se encuentra controlada por la presencia de fallas de dirección NW-SE las cuales controlan el emplazamiento de diques de composición aplítica.

Los planos de abundancia mineral obtenidos a partir del análisis de componentes principales y cociente de bandas de las imágenes ASTER y SENTINEL 2, indican una importante presencia de aluníta, caolinita y sílice a manera de halos de alteración.

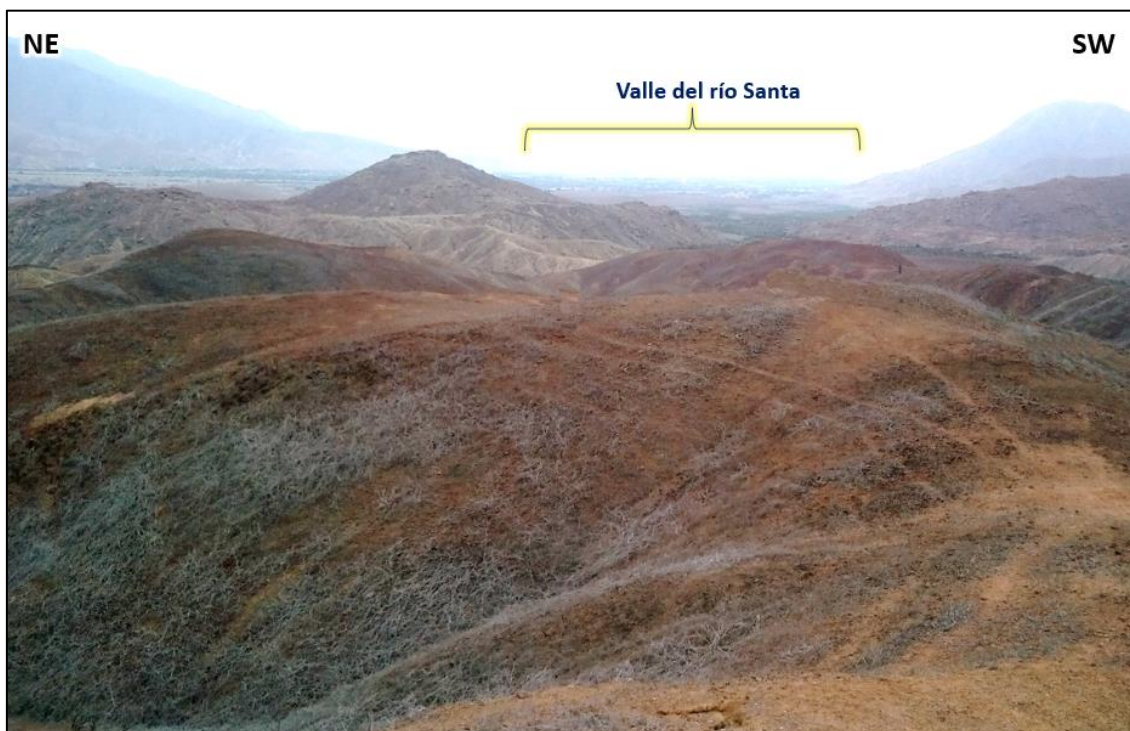


Figura 35. Anomalía Pampa Blanca mirando hacia el NO, nótese la abundante presencia de OxFe . En el fondo se observa parte del valle del río Santa.

4.2.1 ANÁLISIS ESPECTRAL

El procedimiento de análisis espectral permite identificar falsos positivos y consiste en realizar una comparativa entre las firmas espectrales de la imagen ASTER con la firma espectral de la librería proporcionada por la USGS adaptado a la resolución espectral de las bandas ASTER.

Para el sector de la anomalía Pampa Blanca se realizó dos lecturas de firmas espectrales las cuales fueron comparadas con las firmas de la biblioteca de la USGS.

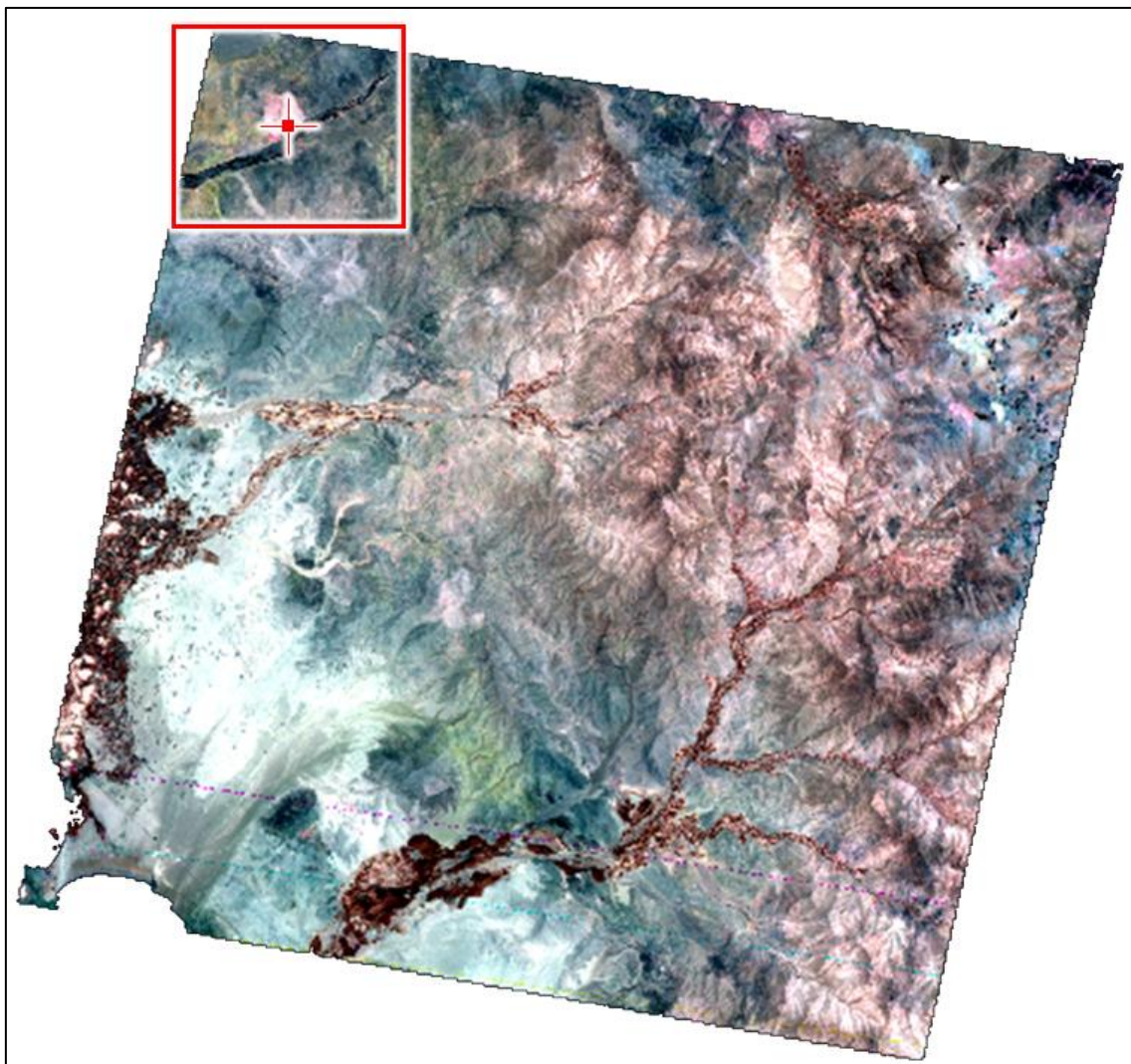


Figura 36. Ubicación de la toma de lecturas de firmas espectrales en la Anomalía Pampa Blanca. Se realizaron dos lecturas de firmas espectrales con el software ENVI (Figura 36 y Figura 37).

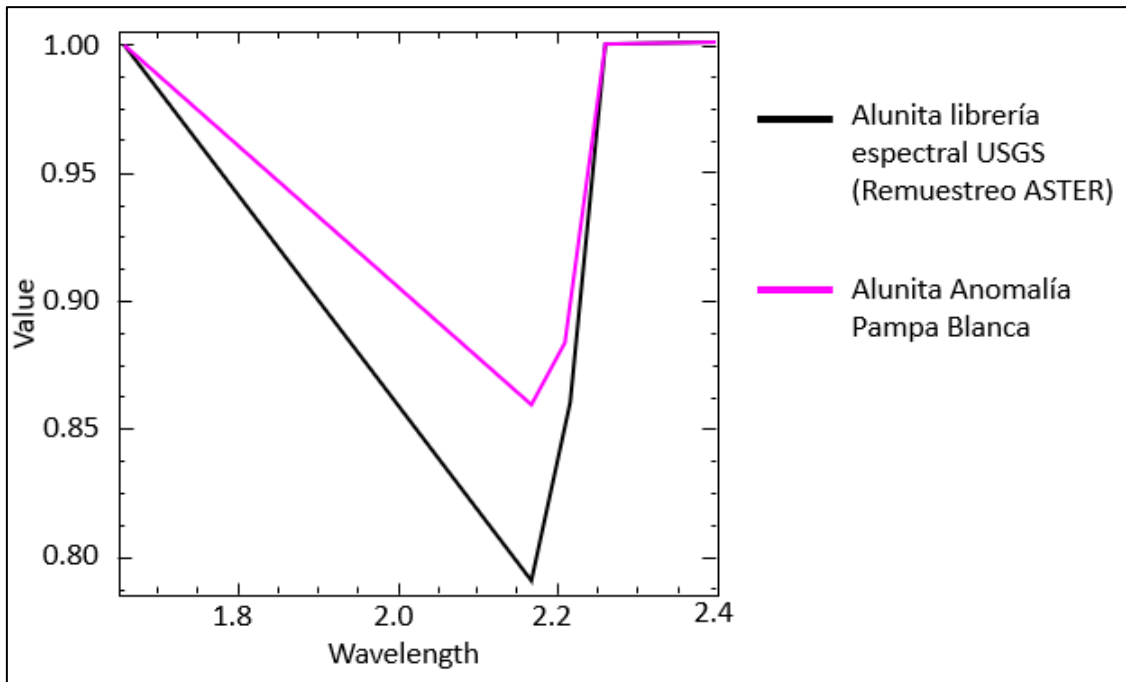


Figura 37. Análisis espectral anomalía Pampa Blanca: en negro firma espectral de la alunita proporcionada por la USGS adaptados a la resolución espectral de las bandas ASTER, en magenta firma espectral de alunita identificada en la imagen ASTER.

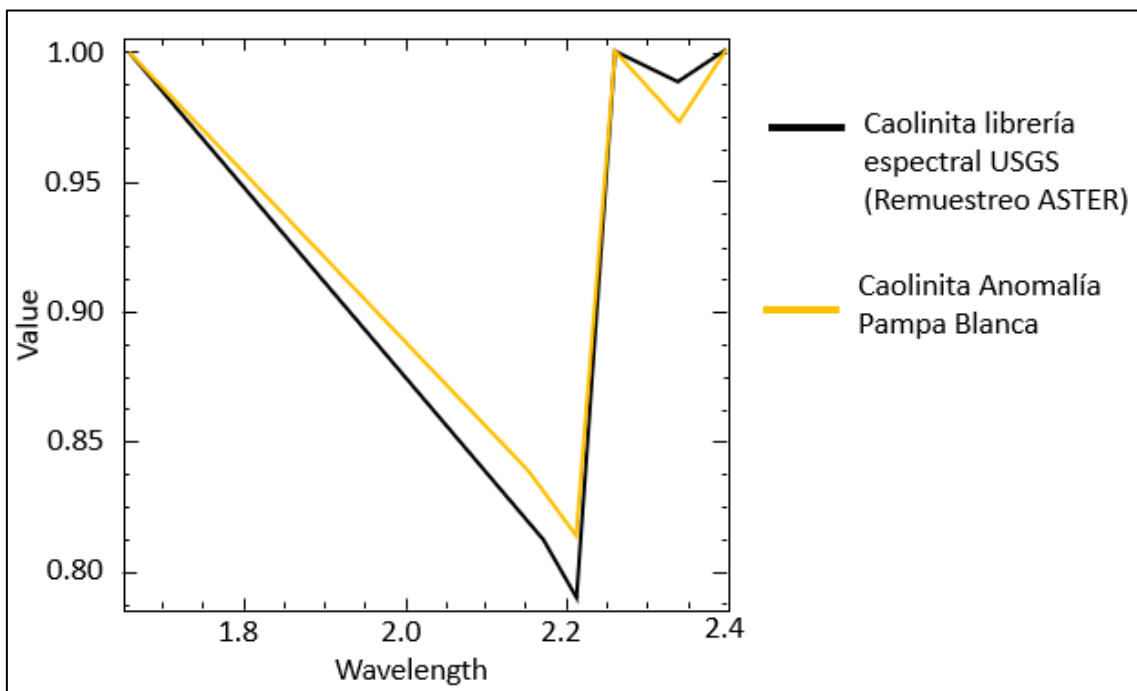


Figura 38. Análisis espectral anomalía Pampa Blanca: en negro firma espectral de la caolinita proporcionada por la USGS adaptados a la resolución espectral de las bandas ASTER, en amarillo firma espectral de caolinita identificada en la imagen ASTER.

4.2.2 RECONOCIMIENTO DE CAMPO

Se realizó el reconocimiento de campo con la finalidad de verificar las características geológicas del sector, así como la obtención de muestras de mano para realizar el análisis espectral usando el espectrómetro de minerales ASD TerraSpec 4 Hi-Res ver figura 40.



Figura 39. Diques cortando secuencias de lavas andesíticas de la Formación Casma.

4.2.3 ANÁLISIS DE MUESTRA DE MANO

La muestra de mano del sector “Pampa Blanca” se trata de una roca intrusiva fuertemente argilizada con abundante presencia de jarosita.

Se pueden observar acumulaciones de arcillas las cuales fueron sometidas a un análisis al terraspec para la identificación de los minerales de alteración presente.

Se tomaron dos lecturas al terraspec, obteniéndose la presencia de alunita y caolinita principalmente (Figura 40)

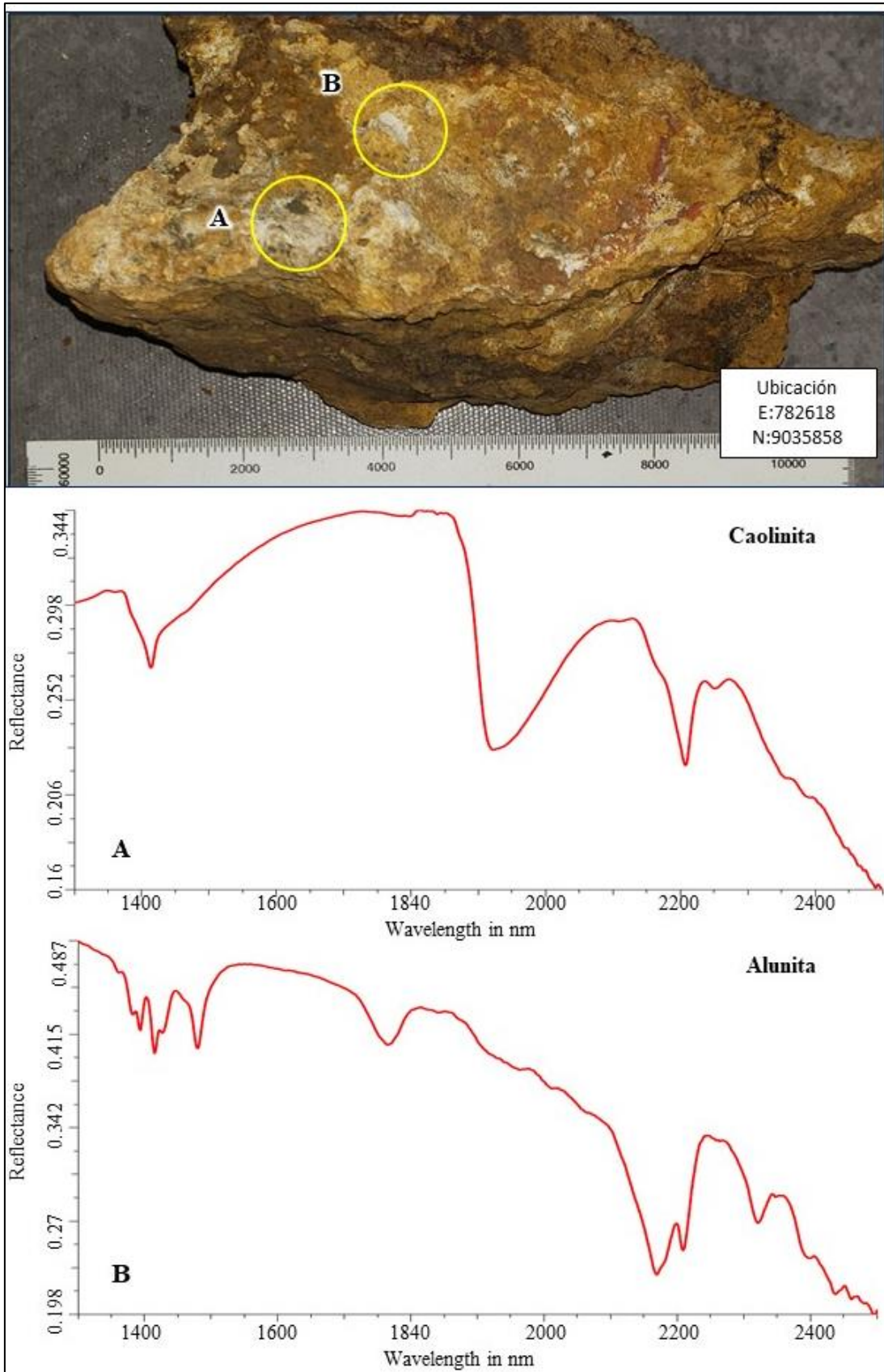


Figura 40. Muestra de mano del sector Anomalía Pampa Blanca, en círculos amarillos los sectores donde se tomó las lecturas al Terraspec. A) Lectura al Terraspec muestra una importante presencia de alunita, B) Lectura al Terraspec presenta una importante presencia de caolinita. Ambos sectores contienen jarosita.

4.3 ANOMALÍA CERRO COLORADO

La anomalía Cerro Colorado está ubicada aproximadamente a 45 Km al NNE de la ciudad de Chimbote, se accede por la carretera Las Cruces – Lacramarca la cual se encuentra parcialmente asfaltada y en buenas condiciones.

Geológicamente se encuentra sobre pulsos de granodiorita ligeramente silicificados perteneciente al Batolito de la Costa. Estructuralmente se encuentra controlada por la presencia de fallas de dirección NW-SE las cuales controlan el emplazamiento de pequeñas vetas de cuarzo de dirección E-W con presencia esporádica de patinas de silicatos de cobre.

Los planos de abundancia mineral obtenidos a partir del análisis de componentes principales y cociente de bandas de las imágenes ASTER y Sentinel 2, indican una importante presencia de caolinita e illita.

4.3.1 ANÁLISIS ESPECTRAL

El procedimiento de análisis espectral consiste en realizar una comparativa entre las firmas espectrales de la imagen ASTER con la firma espectral de la librería proporcionada por la USGS adaptados a la resolución espectral de las bandas ASTER.

Para el sector de la anomalía Cerro Colorado se realizó dos lecturas de firmas espectrales las cuales fueron comparadas con las firmas de la biblioteca de la USGS

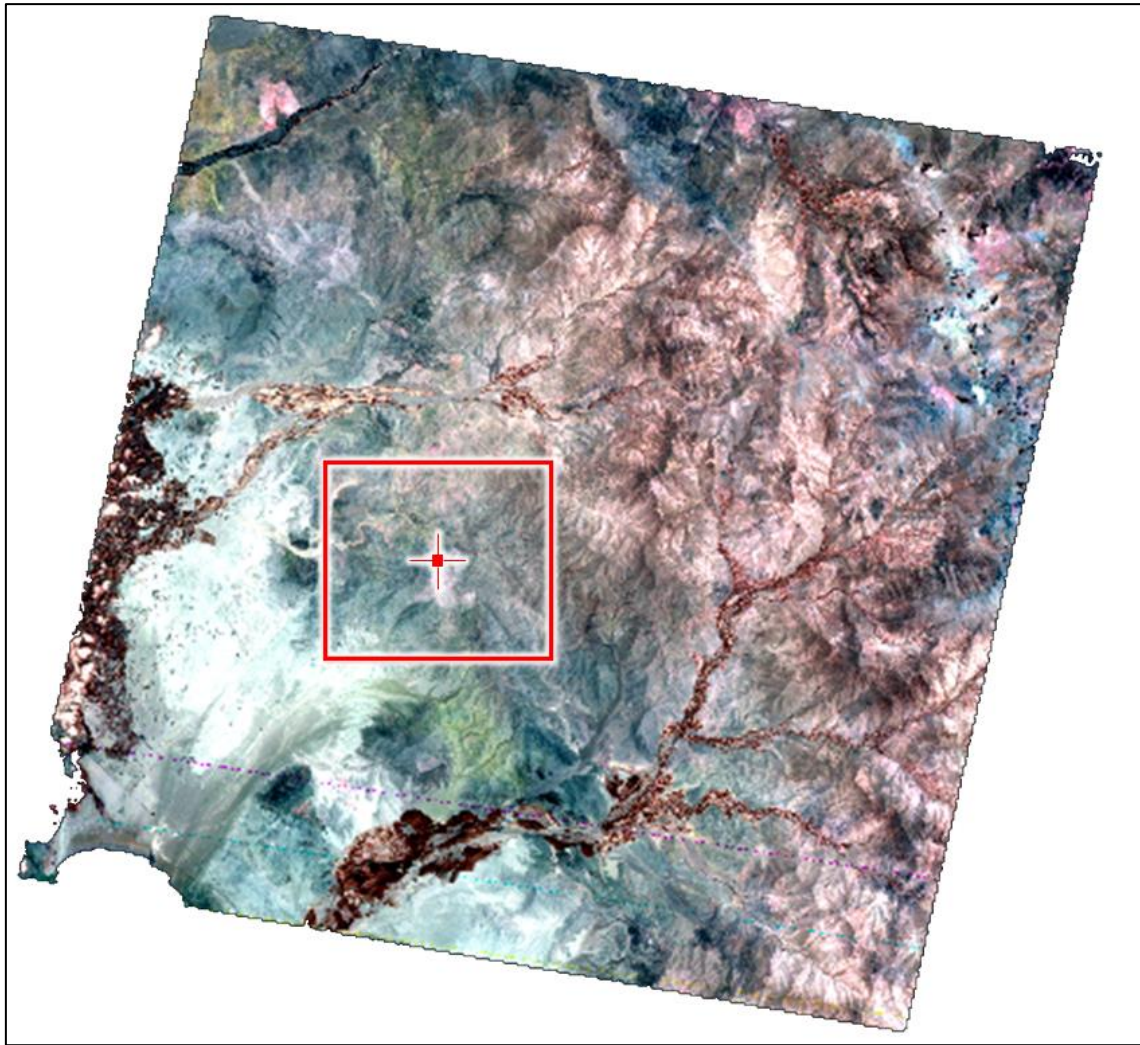


Figura 41. Anomalía Cerro Colorado, se realizaron dos lecturas de firmas espectrales

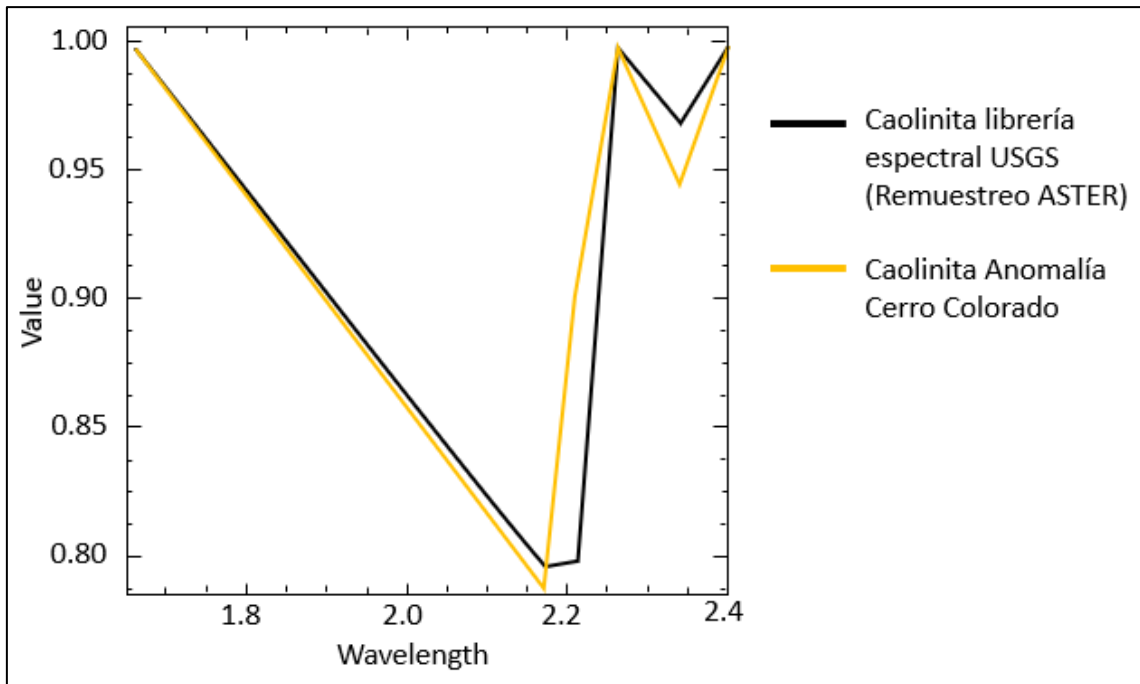


Figura 42. Análisis espectral: en negro firma espectral de la caolinita proporcionada por la USGS adaptados a la resolución espectral de las bandas ASTER, en amarillo firma espectral de Caolinita identificada en el sector “Cerro Colorado”.

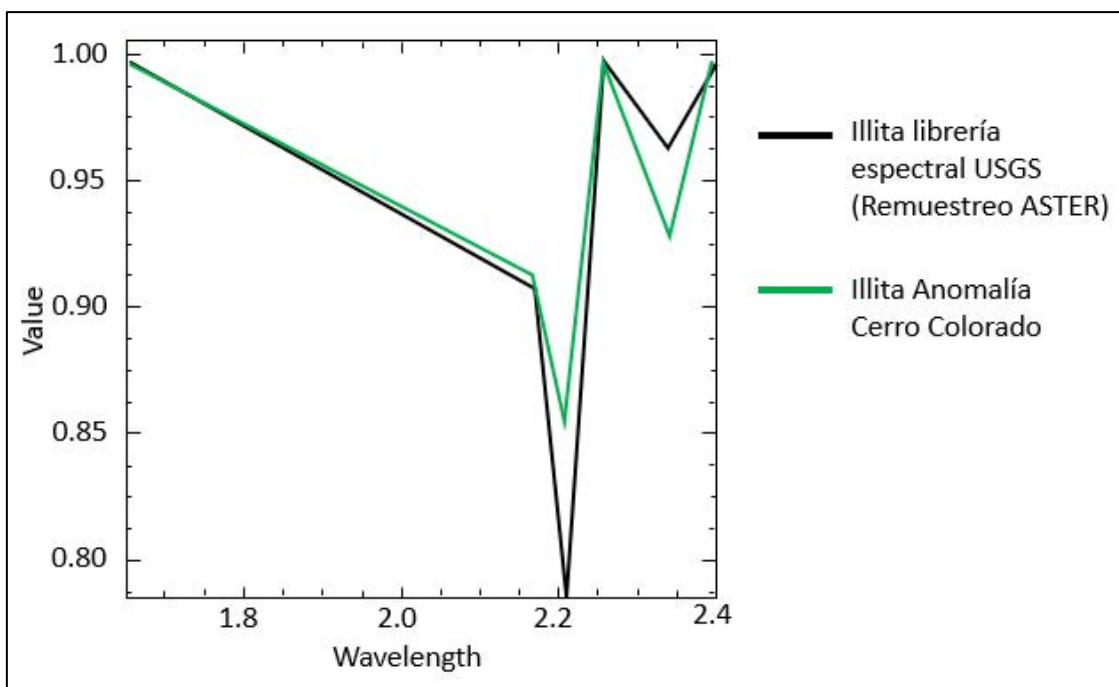


Figura 43. Análisis espectral: en negro firma espectral de la illita proporcionada por la USGS adaptados a la resolución espectral de las bandas ASTER, en verde firma espectral de illita identificada en el sector “Cerro Colorado”.

4.3.2 RECONOCIMIENTO DE CAMPO

Se realizó el reconocimiento de campo con la finalidad de verificar las características geológicas del sector, así como la obtención de muestras de mano para realizar el análisis espectral usando el espectrómetro de minerales ASD TerraSpec 4 Hi-Res.

Durante el reconocimiento se pudo identificar la presencia de capas delgadas de lavas andesitas ligeramente alteradas con presencia de puntos de clorita y parches de caolinita.



Figura 44. Vista panorámica del sector Cerro Colorada.

4.3.3 ANÁLISIS DE MUESTRA DE MANO

La muestra de mano del sector “Cerro Colorado” consiste en una lava andesítica moderadamente alterada con parches de arcillas y puntos de clorita ver figura 45.

Se tomaron dos lecturas al terraspec, obteniéndose la presencia de clorita y caolinita principalmente (Figura 45)

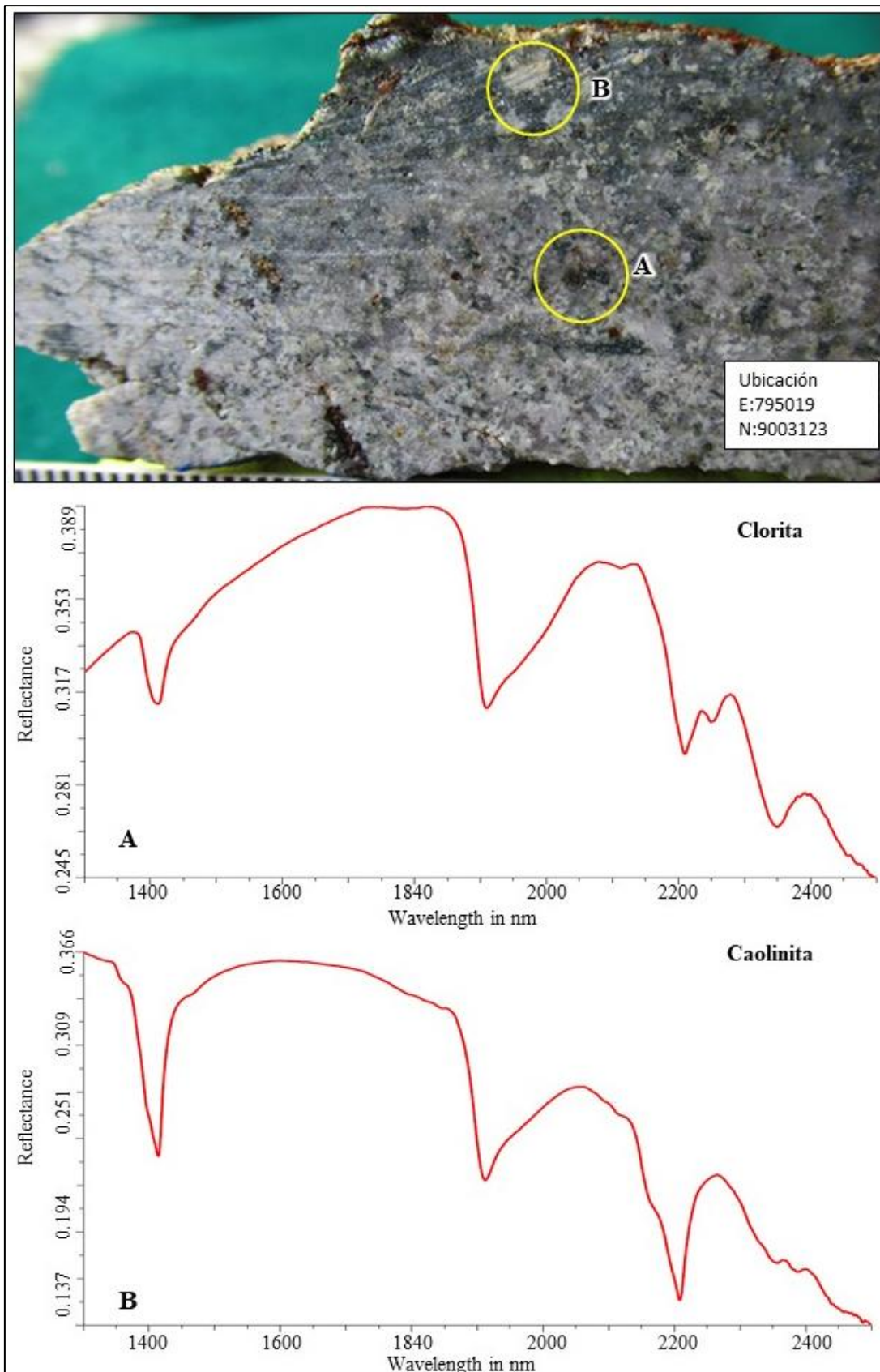


Figura 45. Muestra de mano del sector Anomalía Cerro Colorado, en círculos amarillos los sectores donde se tomó las lecturas al terraspec. Círculo de la izquierda muestra un espectro coincidente con la presencia de clorita, círculo de la derecha presenta una importante presencia de caolinita.

4.4 ANOMALÍA QUEBRADA GRANDE

La anomalía Quebrada Grande está ubicada aproximadamente a 65 Km al NE de la ciudad de Chimbote al margen derecho del río Santa a la altura del kilómetro 90 de la carretera Chimbote – Pallasca.

Geológicamente se observan capas de areniscas intercaladas con débiles capas de limolitas pertenecientes al grupo Goyllarisquizga del cretácico inferior, las mismas que se encuentran en contacto con los depósitos volcánicos del grupo Calipuy compuestos por avalanchas de escombros y capas de flujos piroclásticos.

Las secuencias sedimentarias se encuentran cortadas por pulsos de intrusivos de composición granodiorítica pertenecientes, posiblemente, al batolito de la costa.

Los planos de abundancia mineral obtenidos a partir del análisis de componentes principales y cociente de bandas, indican una importante presencia de alunita y caolinita.

4.4.1 ANÁLISIS ESPECTRAL

El procedimiento de análisis espectral consiste en realizar una comparativa entre las firmas espectrales de la imagen ASTER con la firma espectral de la librería proporcionada por la USGS adaptados a la resolución espectral de las bandas ASTER.

Para el sector de la anomalía Quebrada Grande se realizó dos lecturas de firmas espectrales las cuales fueron comparadas con las firmas de la biblioteca de la USGS.

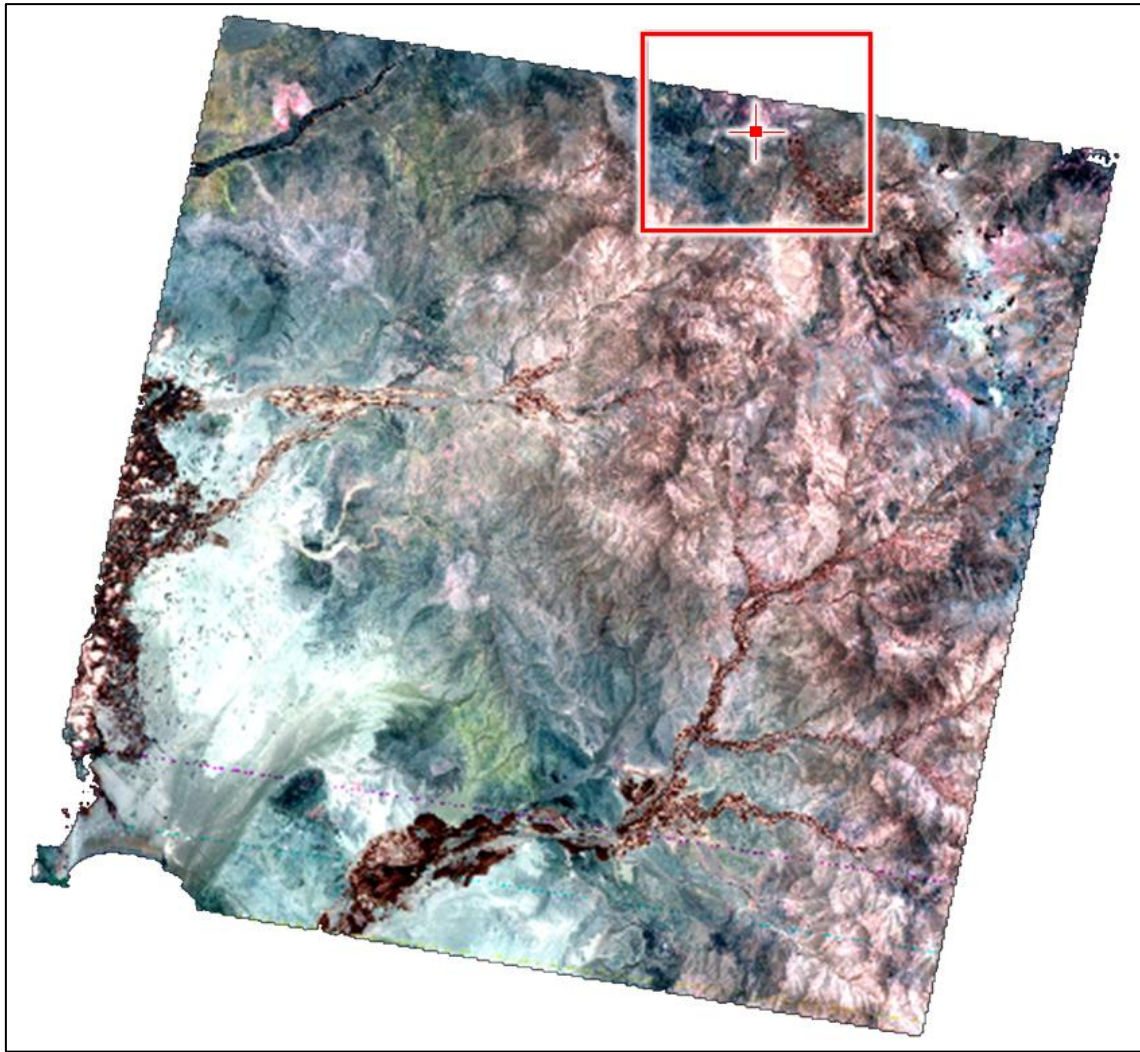


Figura 46. Anomalía Quebrada Grande, se realizaron dos lecturas de firmas espectrales

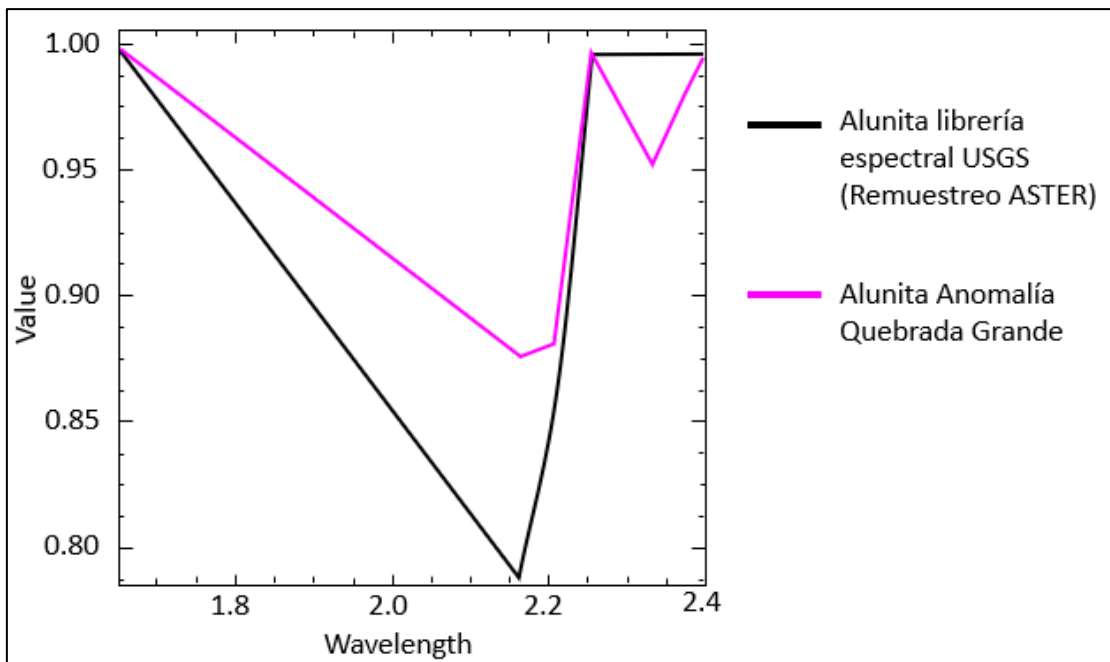


Figura 47. Análisis espectral: en negro firma espectral de la Alunita proporcionada por la USGS adaptados a la resolución espectral de las bandas ASTER. en magenta firma espectral de Alunita identificada en el sector “Quebrada Grande”.

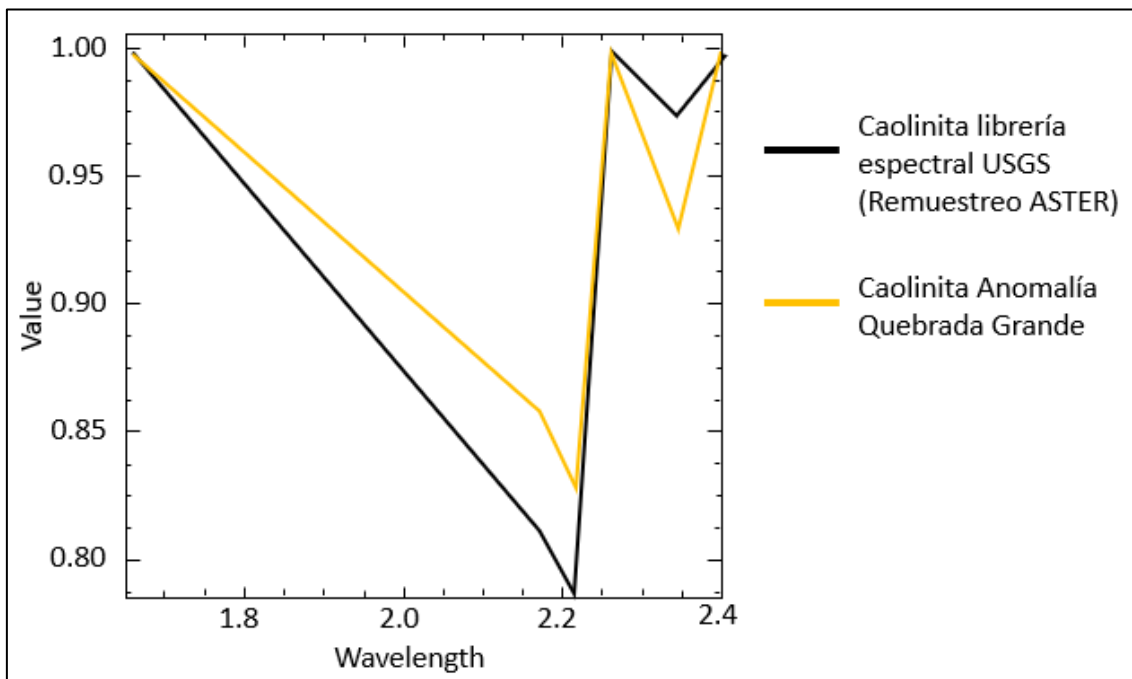


Figura 48. Análisis espectral: en negro firma espectral de la Caolinita proporcionada por la USGS adaptados a la resolución espectral de las bandas ASTER, en amarillo firma espectral de Caolinita identificada en el sector “Quebrada Grande”.

4.4.2 RECONOCIMIENTO DE CAMPO

Se realizó el reconocimiento de campo con la finalidad de verificar las características geológicas del sector, así como la obtención de muestras de mano para realizar el análisis espectral usando el espectrómetro de minerales ASD TerraSpec 4 Hi-Res. Durante el reconocimiento se pudo identificar la presencia de capas delgadas de lavas andesitas ligeramente alteradas con presencia de puntos de clorita y parches de caolinita.



Figura 49. Vista panorámica del sector Quebrada Grande, se observa la presencia de diques aplíticos de dirección sur este.

4.4.3 ANÁLISIS DE MUESTRA DE MANO

La muestra de mano del sector “Quebrada Grande” consiste en una toba perteneciente al Grupo Calipuy la cual se encuentra fuertemente argilizada ver figura 50.

Se tomaron dos lecturas al terraspec, obteniéndose la presencia de clorita y caolinita principalmente (Figura 50)

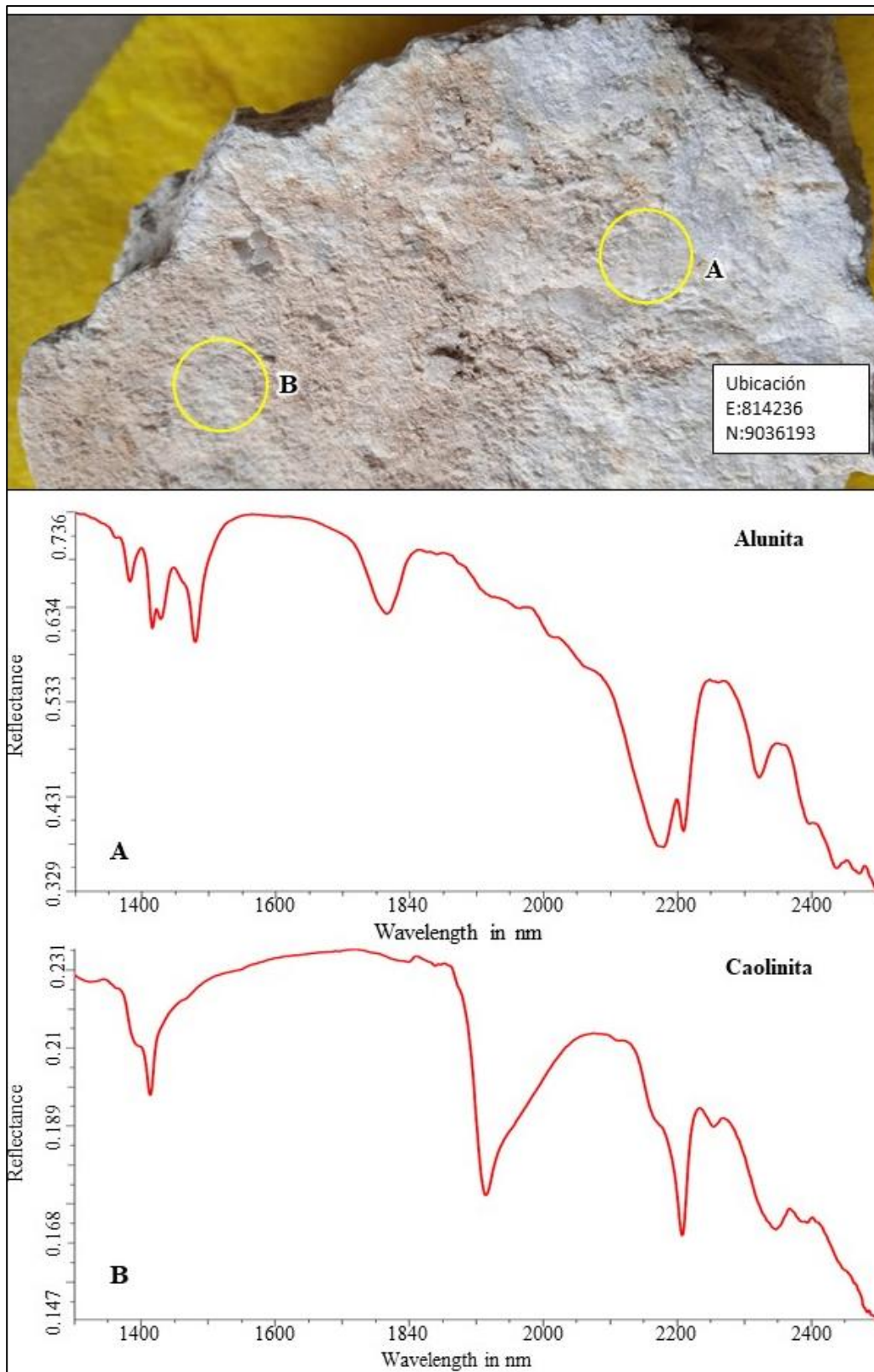


Figura 50. Muestra de mano del sector Quebrada Grande, en círculos amarillos los sectores donde se tomó las lecturas al terraspec. Círculo de la izquierda muestra un espectro coincidente con la presencia de alunita, círculo de la derecha muestra un espectro coincidente con la presencia de Caolinita.

4.5 CONTRASTACIÓN DE LA HIPOTESIS

Con los resultados obtenidos producto del análisis de las imágenes ASTER y SENTINEL 2 con el método de análisis de componentes principales (ACP) y cociente de bandas se procedió a la corroboración de resultados en dos fases.

Primera fase: tomando en cuenta la firma espectral obtenida del procesamiento de imágenes con la herramienta de *spectral analysis* proporcionada por el software ENVI; el cual permite realizar comparación en las firmas espectrales identificados en una imagen multiespectral con las firmas espectrales definidas por la USGS las cuales fueron adaptados a la resolución espectral de las bandas ASTER. Esto permitió identificar que los mapas de abundancia mineral obtenidos con los métodos de análisis de componentes principales (ACP) y ratio de bandas son congruentes con el análisis de firma espectral obtenido con el procedimiento de *spectral analysis*. Como se puede observar en el apartado de Análisis Espectral realizado en las anomalías Pampa Blanca, Cerro Colorado y Quebrada Grande.

Segunda Fase. Los resultados obtenidos a partir del análisis de imágenes ASTER permitieron identificar minerales de alteración como alunita, caolinita e illita, configurando zonas de alteración argílica avanzada, argílica y propilítica respectivamente; además de identificar la presencia de sílice y óxidos de hierro.

Estos resultados fueron comparados con las firmas espectrales obtenidas, producto del análisis al terraspec, al cual fueron sometidas las muestras de mano colectadas en la etapa de reconocimiento de campo.

Esto permitió corroborar los diversos minerales de alteración identificados durante el procedimiento de análisis de imágenes espectrales usando el método de análisis de componentes principales (ACP) y cociente de bandas.

Por ello se confirma que las imágenes ASTER y SENTINEL 2 permiten caracterizar alteraciones hidrotermales con interés prospectivo, debido a que pueden identificar zonas con alteración argílica, argílica avanzada, propilítica, silicificación y zonas con presencia de óxidos de hierro.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- El uso de imágenes satelitales constituye una herramienta útil, de fácil acceso y bajo costo que permite tener de primera mano una vista generalizada de la presencia de minerales con importancia económica o minerales de alteración en áreas donde el lecho rocoso está expuesto.
- El uso de imágenes ASTER constituye una importante herramienta en la caracterización de zonas con alteración hidrotermal permitiendo identificar zonas con alteración argílica, argílica avanzada y propilítica.
- El análisis de imágenes SENTINEL 2 usando el método de análisis de componentes principales (ACP), faculta la identificación de zonas con $OxFe$.
- El uso de imágenes satelitales con diferentes resoluciones espaciales y espectrales permite obtener mejores resultados, los cuales fueron corroborados con los resultados obtenidos del análisis al terraspec al que fueron expuestas las muestras de mano y del procedimiento de *spectral analysis* al que fueron sometidos los sectores de interés.
- Los resultados obtenidos demuestran que el método de análisis de componentes principales permite extraer información mineralógica detallada a partir de las imágenes multiespectrales tales como las imágenes ASTER y las imágenes SENTINEL 2.
- A partir del análisis de imágenes espectrales usando los métodos de análisis de componentes principales (ACP) y cociente de bandas se pudo generar planos de abundancia mineral ampliamente usados en la exploración de yacimientos minerales.

- Por la experiencia del investigador, los resultados obtenidos tienen una confiabilidad de un 50% en la identificación de alteración argílica, argílica avanzada y propilítica.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda a futuros investigadores tener en consideración que el análisis de imágenes espectrales constituye una herramienta de análisis indirecto por lo cual no está exenta de incurrir en la identificación de falsos positivos.
- Esta metodología de análisis también puede ser adaptada a otros sensores remotos multiespectrales o hiperespectrales, tales como las imágenes Hyperion y Aviris.
- Al momento de realizar un análisis de imágenes espectrales tomar en consideración las fechas de toma de imagen, ya que la abundante presencia de vegetación puede provocar una mala interpretación, siendo las mejores fechas de toma de imagen las fechas de verano debido a la disminución de la cantidad de vegetación, permitiendo que el suelo desnudo esté expuesto.
- El uso de imágenes satelitales de menor resolución espacial mejora considerablemente la identificación de alteraciones hidrotermales.
- El análisis de imágenes satelitales son una herramienta indirecta en la toma de información y no reemplaza en absoluto al trabajo de campo del geólogo de exploración.

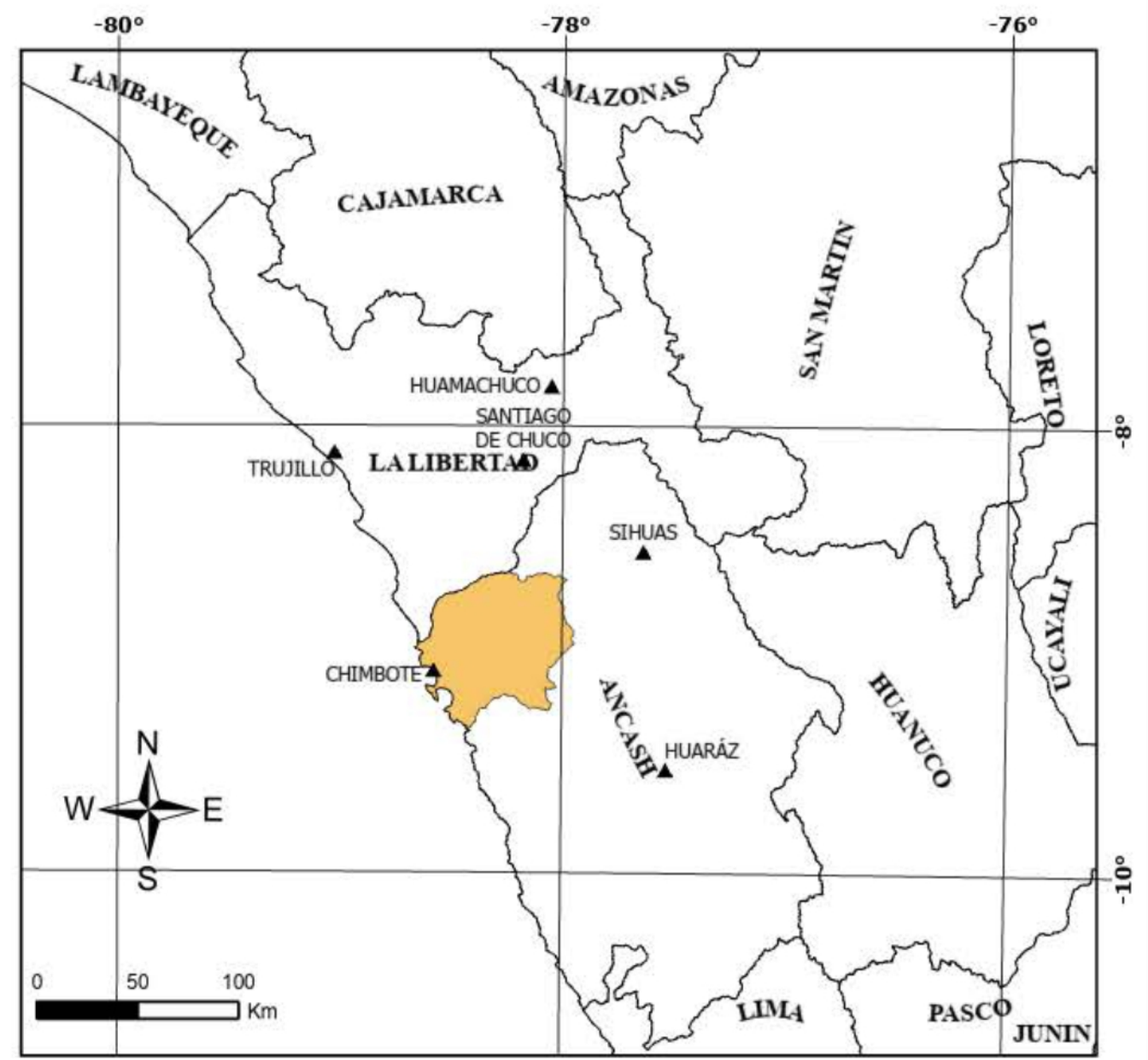
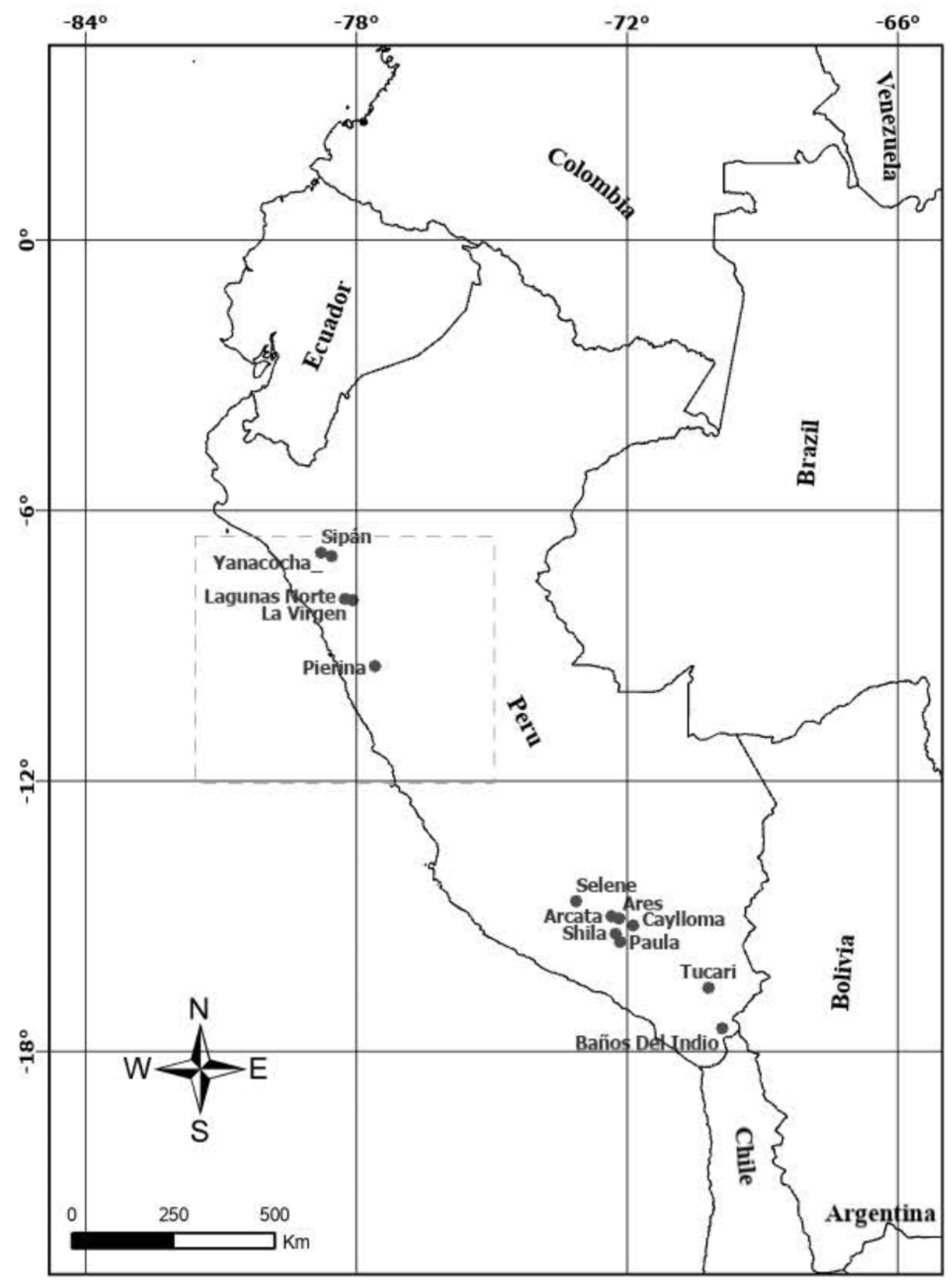
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abrams, M., Hook, S. & Ramachandran, B. 2002. ASTER user handbook (Ver. 2). Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, NASA, USA.
- Arbelo, M., Évora, J. y Labrador, M. 2012. SATELMAC, Satélites de Teledetección para la Gestión del Territorio.
- Carrino, T. (2015) Geology and Hydrothermal Alteration of the Chapi Chiara Prospect and Nearby Targets, Southern Peru, Using ASTER Data and Reflectance Spectroscopy.
- Chang, Z. & Yang, Z. 2012. Economic Geology, v. 107. Evaluation of Inter-Instrument Variations Among Short Wavelength Infrared (SWIR) Devices.
- Chavez, J. 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data.
- Chuvioco, E. 1996. Fundamentos de Teledetección espacial 3era edición.
- Chuvioco, E. 2008. Teledetección Ambiental La observación de la Tierra desde el espacio.
- Corbett, G. 2017. Epithermal Au-Ag and porphyry Cu-Au exploration – short course manual: unpublished, Sept 2017 edition, www.corbettgeology.com.
- Cossio, A. 1964. INGEMMET Geología de los Cuadrángulos de Santiago de Chuco y Santa Rosa.
- Crosta, A. 2002. Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component análisis.
- Crosta, A., Souza, C., Azevedo, F. y Brodie, C. 2002. Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component análisis.
- Díaz, F. 2018. Prospección de aguas subterráneas usando imágenes landsat 8 y áster GDEM mediante el método de árbol de decisiones en el cuadrángulo 15 G - San Marcos.
- Gamboa, L. 2015. Caracterización mineralógica de la alteración en las calizas de la microcuenca del Río Tres Ríos en el distrito de Cajamarca.
- Ranjbar, H. 2011. Application of spectral analysis in mapping hydrothermal alteration of the Northwestern Part of the Kerman Cenozoic Magmatic Arc, Iran, Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran.
- Kalinowski, A. & Oliver, S. 2004. Remote Sensing Applications Geoscience Australia ASTER Mineral Index Processing Manual
- Navarro, P., Rivera, M. y Monge, R. 2010. INGEMMET Geología y Metalogenia del Grupo Calipuy (Volcanismo Cenozoico) Segmento Santiago de Chuco, Norte del Perú.

- NRCAN, 2016. Canada Centre for Remote Sensing, Fundamentals of Remote Sensing
- Rockwell, B. 2009. USGS. Comparison of ASTER- and AVIRIS-Derived Mineral and Vegetation Maps of the White Horse Replacement Alunite Deposit and Surrounding Area, Marysvale Volcanic Field, Utah.
- Rockwell, B. & Hofstra, A. 2012. Mapping Argillic and Advanced Argillic Alteration in Volcanic Rocks, Quartzites, and Quartz Arenites in the Western Richfield 1° x 2° Quadrangle, Southwestern Utah, Using ASTER Satellite Data.
- Roonwal, G. 2018. Mineral Exploration: Practical Application.
- Salazar, R. 2016. Análisis del impacto geo ambiental de pasivos ambientales aplicando sensoramiento remoto y firmas espectrales utilizando envi, provincia de Hualgayoc, Cajamarca, 2016.
- Smith, R. 2012. MicroImágenes, Inc, Remote Sensing of Environment.
- Van Der Meer, F., Van Der Werff, H., Van Ruitenbeek, F., Bakker, W., Noomen, M., Carranza, E., De Smeth, J. & Woldai, T. 2012. Multi-and hyperspectral geologic remote sensing: A review.
- Vargas, C. 2015. Caracterización Espectral de tipos de Alunita y Silice en Depósitos Epitermales de Alta Sulfuración utilizando imágenes ASTER.

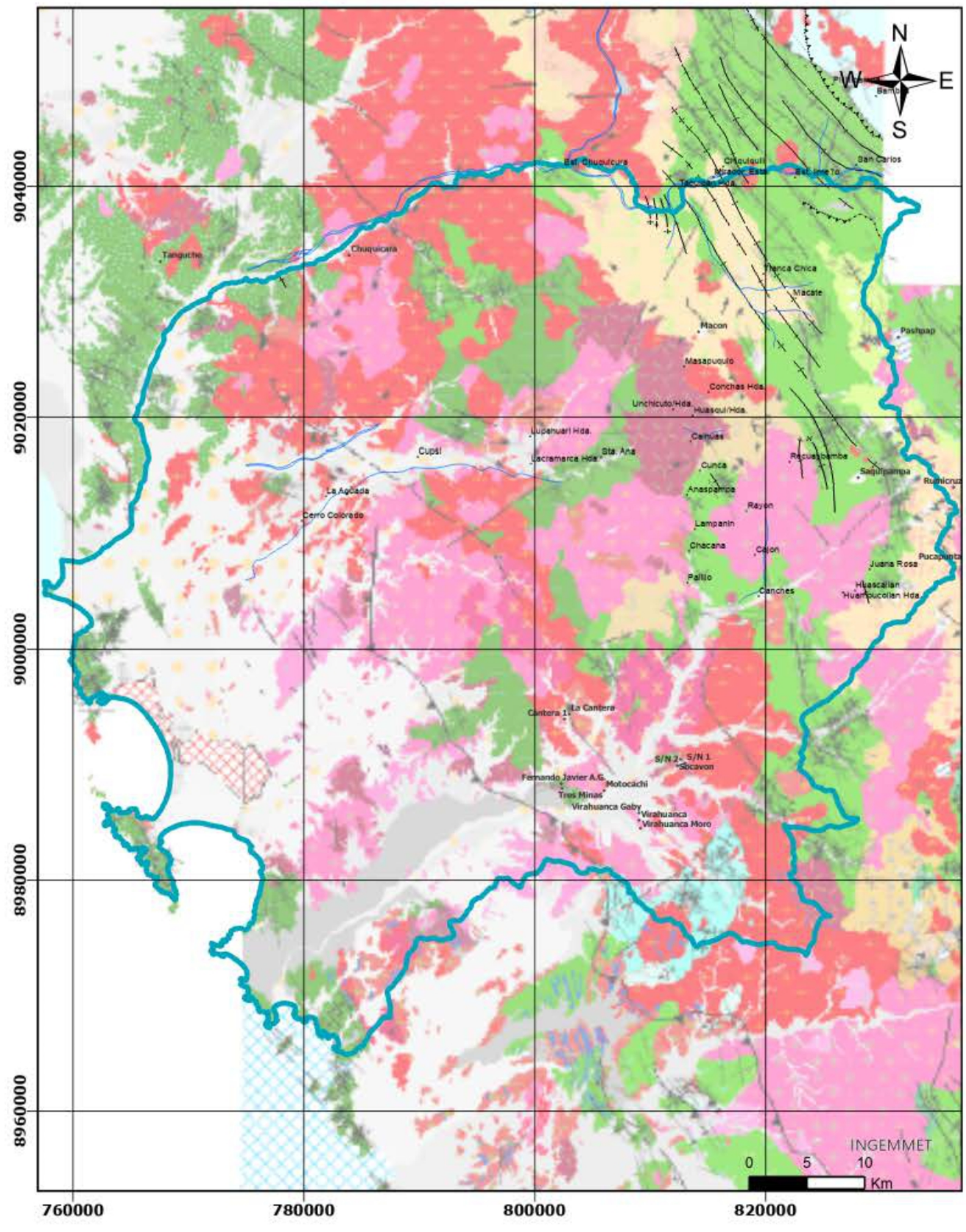
ANEXOS

1. Plano 01. Ubicación
2. Plano 02. Geológico y dominios estratigráficos
3. Plano 03. Abundancia mineral de alunita (Alteración Argílica Avanzada)
4. Plano 04. Abundancia mineral de caolinita (Alteración Argílica)
5. Plano 05. Abundancia mineral de illita (Alteración Propilítica)
6. Plano 06. Abundancia mineral de óxido de silicio (SiO₂)
7. Plano 07. Abundancia mineral de ion Férrico & ion Ferroso (Goethita Fe³⁺ y Hematita Fe²⁺)
8. Plano 08. Abundancia de alteraciones hidrotermales
9. Plano 09. Ubicación muestras de Terraspec



Leyenda

- ▲ Ciudad
- Depósitos
- Carretera
- Área de estudio
- ~ Límite departamental

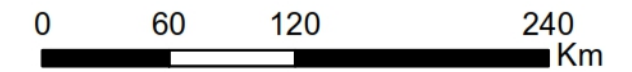
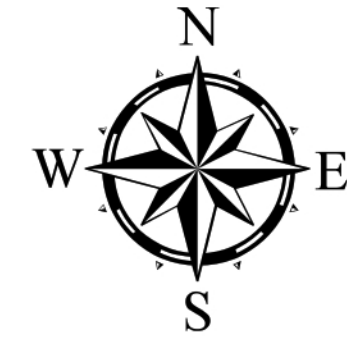
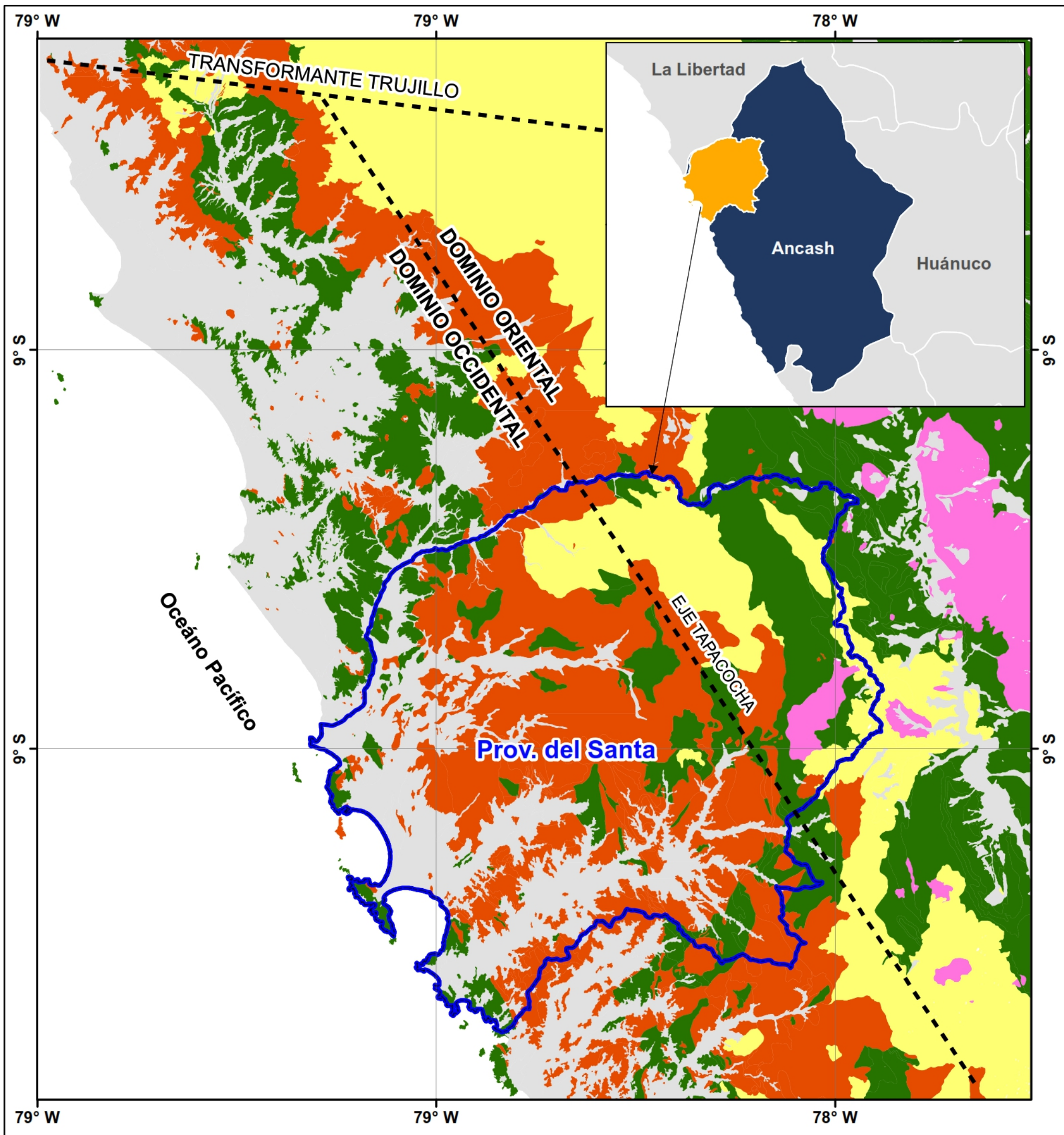


Leyenda

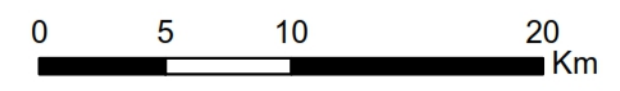
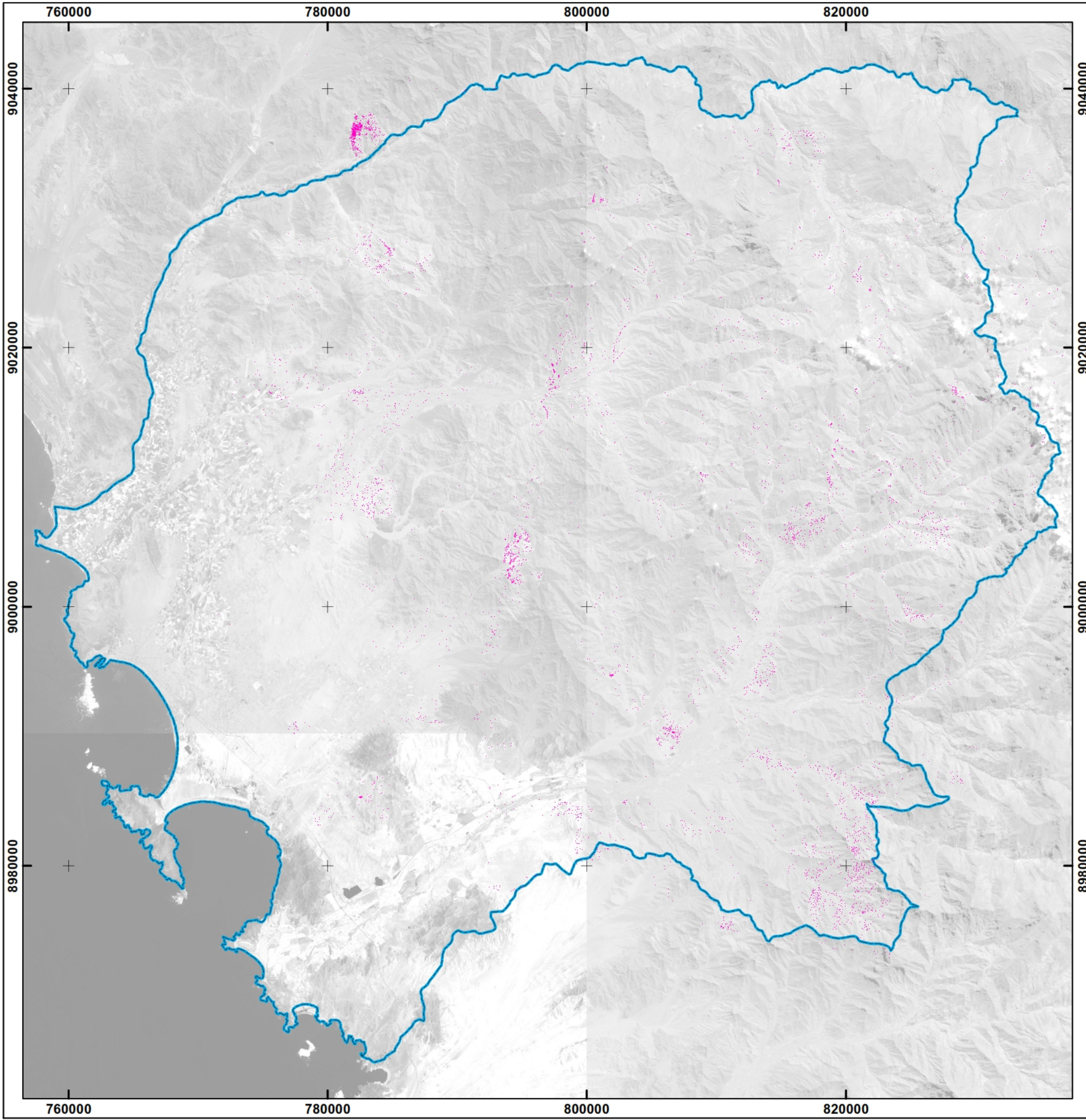
- Volc. Macón
- Volc. Matala
- Fm. Santa-Carhuaz
- Fm. Chimu
- Fm. Chicama
- Fm. Casma
- ⊕ Eje anticlinal
- ⊕ Eje sinclinal
- ⚡ Falla inversa
- Gpo. Calipuy
- Granito/Tonalita
- Granodiorita
- Falla
- Red hidrica

Batolito de la Costa

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		
TESIS: CARACTERIZACIÓN DE ALTERACIONES HIDROTÉRMICAS MEDIANTE IMÁGENES ASTER Y SENTINEL 2, EN LA PROVINCIA DEL SANTA DEPARTAMENTO DE ANCASH		
PLANO DE UBICACIÓN		
TESISTA: Bach. CÉSAR RAPHAEL CABELLOS RONCAL		
FUENTE: INGEMMET	ESCALA: GRÁFICA	PLANO: P-01
FECHA: AÑO 2022	DATOS GEOGRÁFICOS: UTM, WGS84 - Zona 17 SUR	



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		
TESIS: CARACTERIZACIÓN DE ALTERACIONES HIDROTHERMALES MEDIANTE IMÁGENES ASTER Y SENTINEL 2, EN LA PROVINCIA DEL SANTA DEPARTAMENTO DE ANCASH		
PLANO GEOLÓGICO Y DOMINIOS ESTRATIGRÁFICOS (Modificado de Navarro, Rivera y Monge 2010)		
TESISTA: Bach. CÉSAR RAPHAEL CABELLOS RONCAL		
TIPO DE IMAGEN: -	ESCALA: Gráfica	PLANO: P-02
FECHA: AÑO 2022	DATUM: UTM, WGS84 - Zona 17 SUR	




LEYENDA

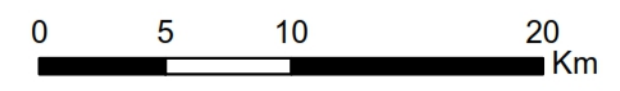
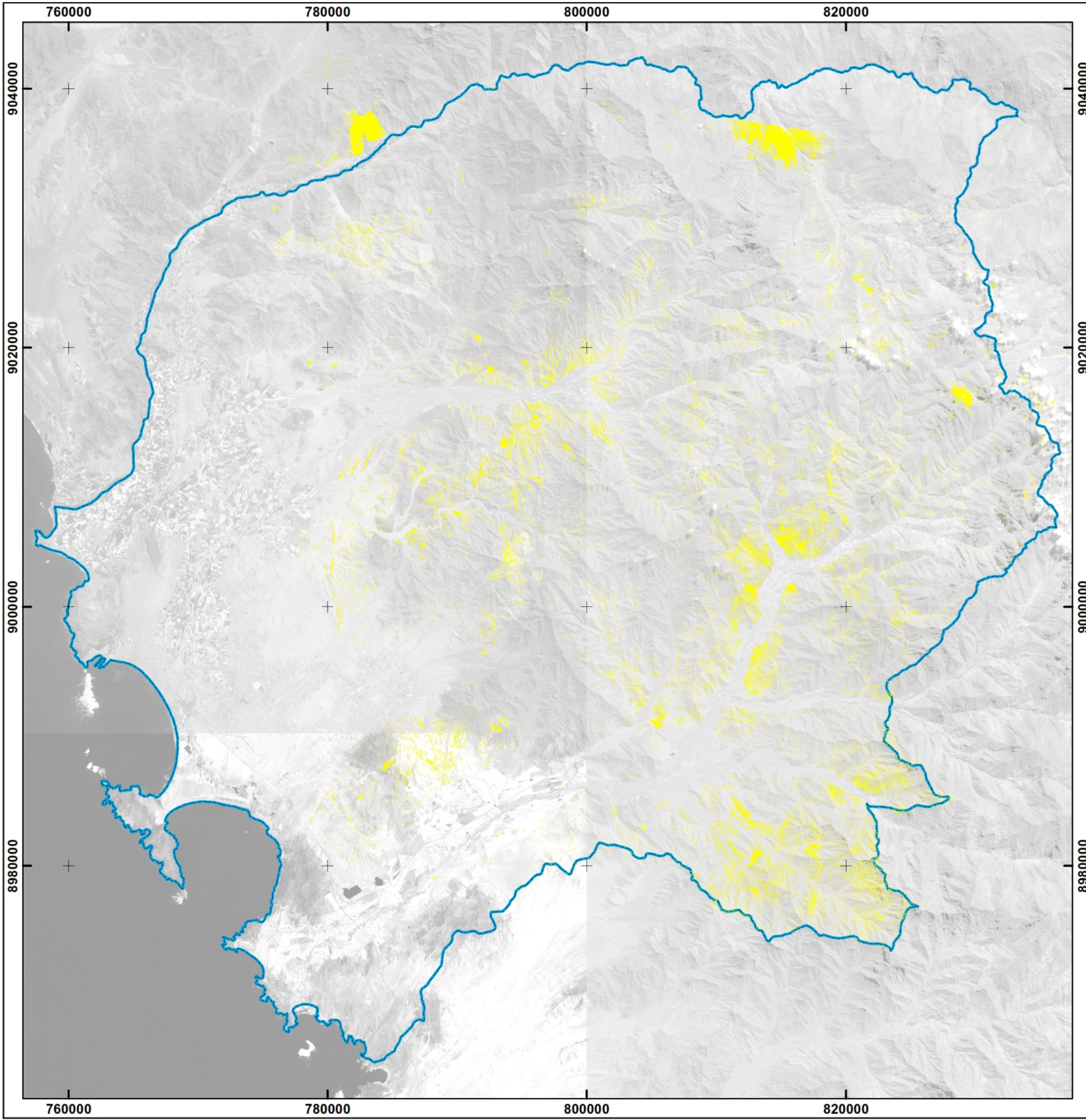
Alunita
(Alteración Argílica Avanzada)

Área de Estudio

MÉTODO
Análisis de Componentes Principales de imagen
ASTER bandas 1, 3, 5 y 7

COMPONENTE USADO
CP4

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		
TESIS: CARACTERIZACIÓN DE ALTERACIONES HIDROTERMALES MEDIANTE IMÁGENES ASTER Y SENTINEL 2, EN LA PROVINCIA DEL SANTA DEPARTAMENTO DE ANCASH		
PLANO DE ABUNDANCIA MINERAL DE ALUNITA (ALTERACIÓN ARGÍLICA AVANZADA)		
TESISTA: Bach. CÉSAR RAPHAEL CABELLOS RONCAL		
TIPO DE IMAGEN: ASTER	ESCALA: 1:300 000	PLANO: P-03
FECHA: AÑO 2022	DATUM: UTM, WGS84 - Zona 17 SUR	




LEYENDA

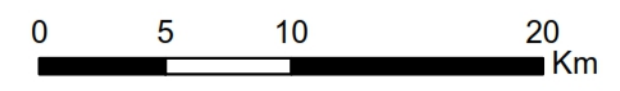
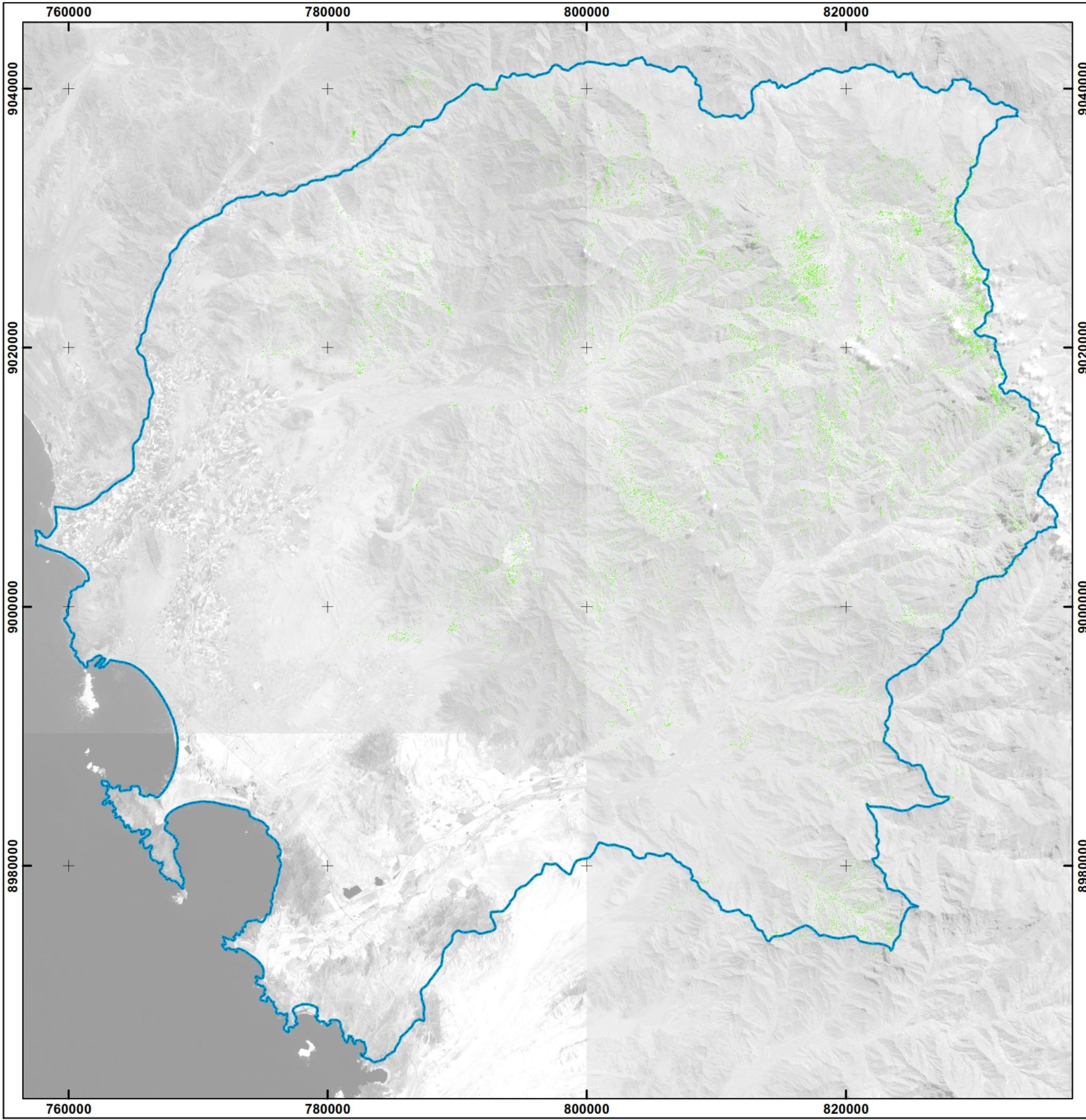
Caolinita
(Alteración Argílica)

Área de Estudio

MÉTODO
Análisis de Componentes Principales de imagen
ASTER bandas 1, 4, 6 y 7

COMPONENTE USADO
CP3

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		
TESIS: CARACTERIZACIÓN DE ALTERACIONES HIDROTERMALES MEDIANTE IMÁGENES ASTER Y SENTINEL 2, EN LA PROVINCIA DEL SANTA DEPARTAMENTO DE ANCASH		
PLANO DE ABUNDANCIA MINERAL DE CAOLINITA (ALTERACIÓN ARGÍLICA)		
TESISTA: Bach. CÉSAR RAPHAEL CABELLOS RONCAL		
TIPO DE IMAGEN: ASTER	ESCALA: 1:300 000	PLANO: P-04
FECHA: AÑO 2022	DATUM: UTM, WGS84 - Zona 17 SUR	



LEYENDA

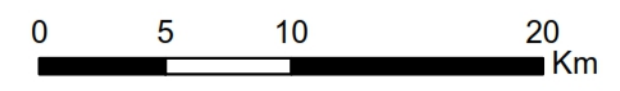
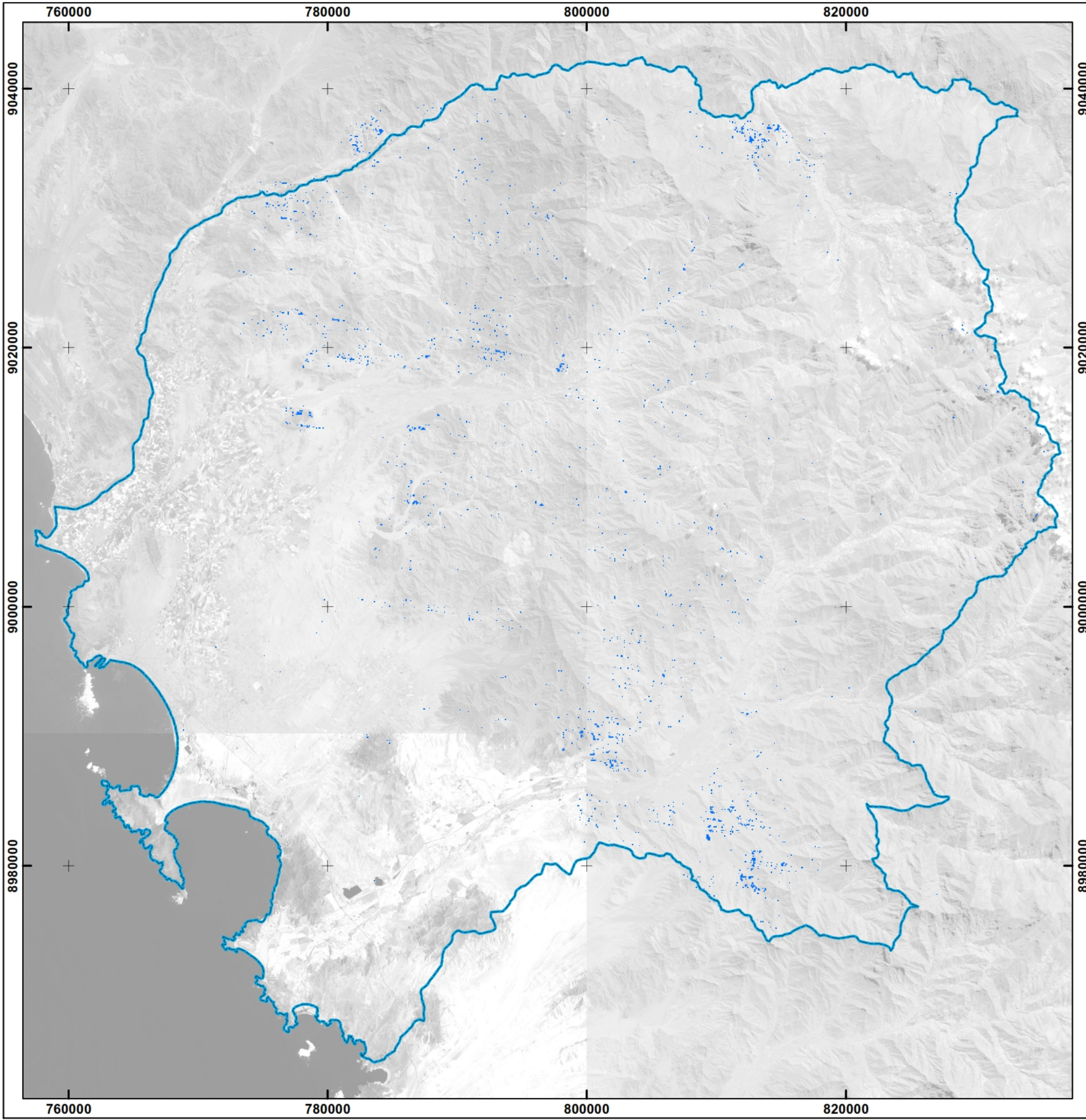
Illita
(Alteración Propilítica)

Área de Estudio

MÉTODO
Análisis de Componentes Principales de imagen
ASTER bandas 1, 3, 5 y 6

COMPONENTE USADO
CP3

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		
TESIS: CARACTERIZACIÓN DE ALTERACIONES HIDROTERMALES MEDIANTE IMÁGENES ASTER Y SENTINEL 2, EN LA PROVINCIA DEL SANTA DEPARTAMENTO DE ANCASH		
PLANO DE ABUNDANCIA MINERAL DE ILLITA (ALTERACIÓN PROPILÍTICA)		
TESISTA: Bach. CÉSAR RAPHAEL CABELLOS RONCAL		
TIPO DE IMAGEN: ASTER	ESCALA: 1:300 000	PLANO: P-05
FECHA: AÑO 2021	DATUM: UTM, WGS84 - Zona 17 SUR	




LEYENDA

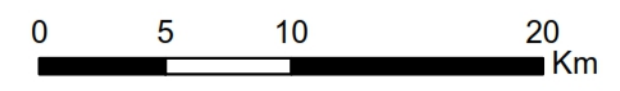
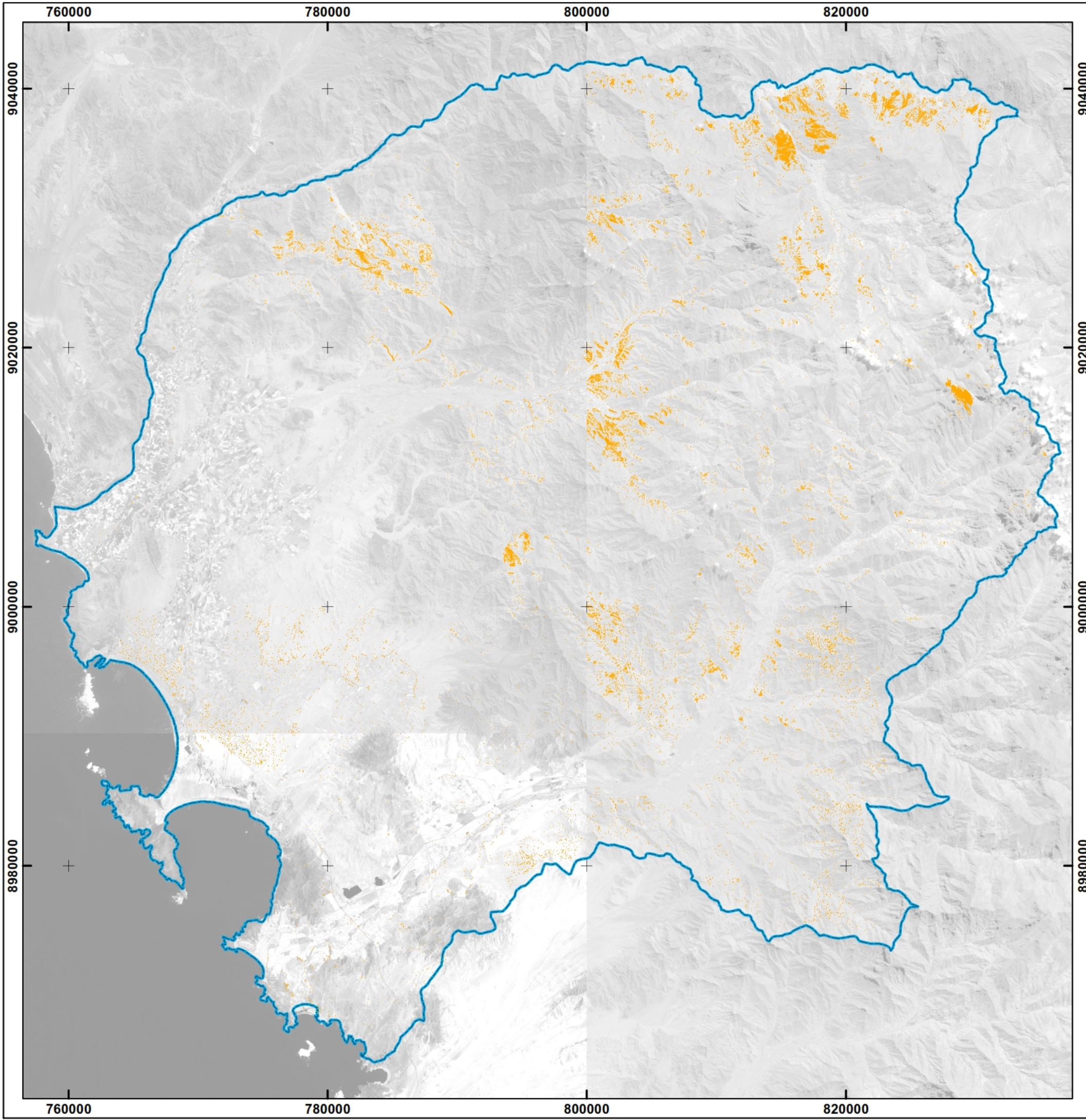
Óxido de silicio (SiO₂)

Área de Estudio

MÉTODO
Cociente de Bandas de imagen ASTER
bandas 10, 11 y 12

COCIENTE USADO
B11/B10 y B11/B12

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA
TESIS: CARACTERIZACIÓN DE ALTERACIONES HIDROTHERMALES MEDIANTE IMÁGENES ASTER Y SENTINEL 2, EN LA PROVINCIA DEL SANTA DEPARTAMENTO DE ANCASH	
PLANO DE ABUNDANCIA MINERAL DE ÓXIDO DE SILICIO (SiO₂)	
TESISTA: Bach. CÉSAR RAPHAEL CABELLOS RONCAL	
TIPO DE IMAGEN: ASTER	ESCALA: 1:300 000
FECHA: AÑO 2022	DATUM: UTM, WGS84 - Zona 17 SUR
PLANO: P-06	



LEYENDA

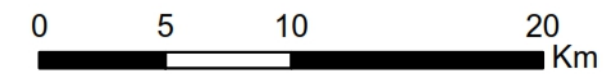
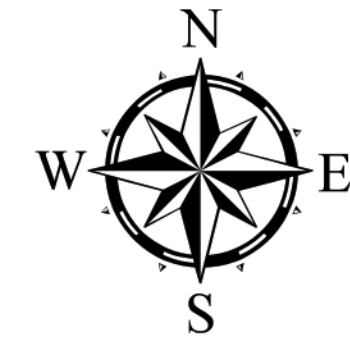
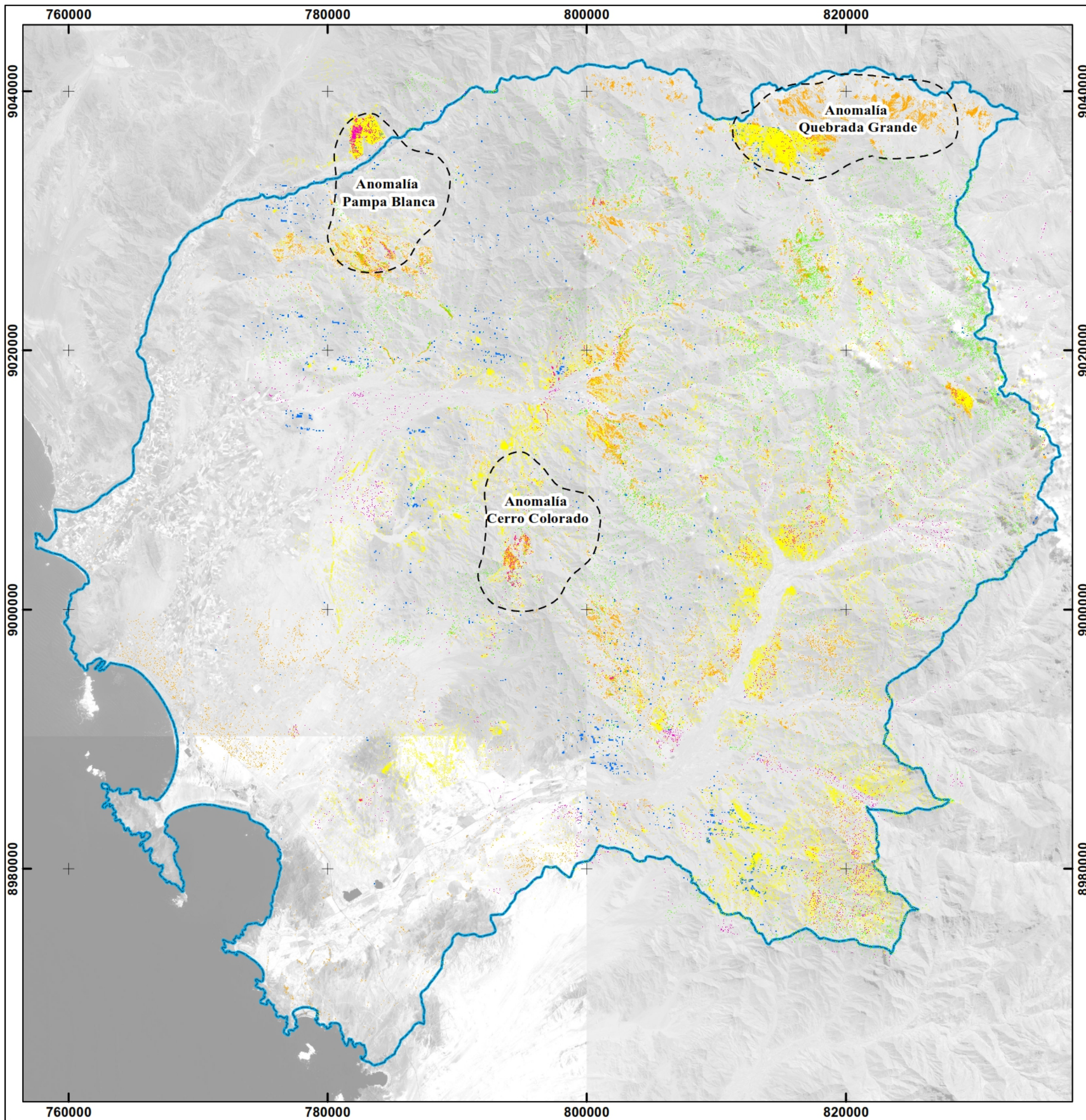
Ion Férrico (Fe³⁺) & Ion Ferroso (Fe²⁺)

Área de Estudio

MÉTODO
Análisis de Componentes Principales de imagen SENTINEL 2 bandas 2, 3, 4 y 8

COMPONENTE USADO
CP4

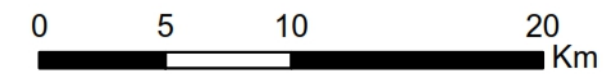
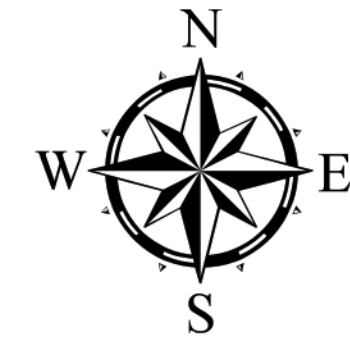
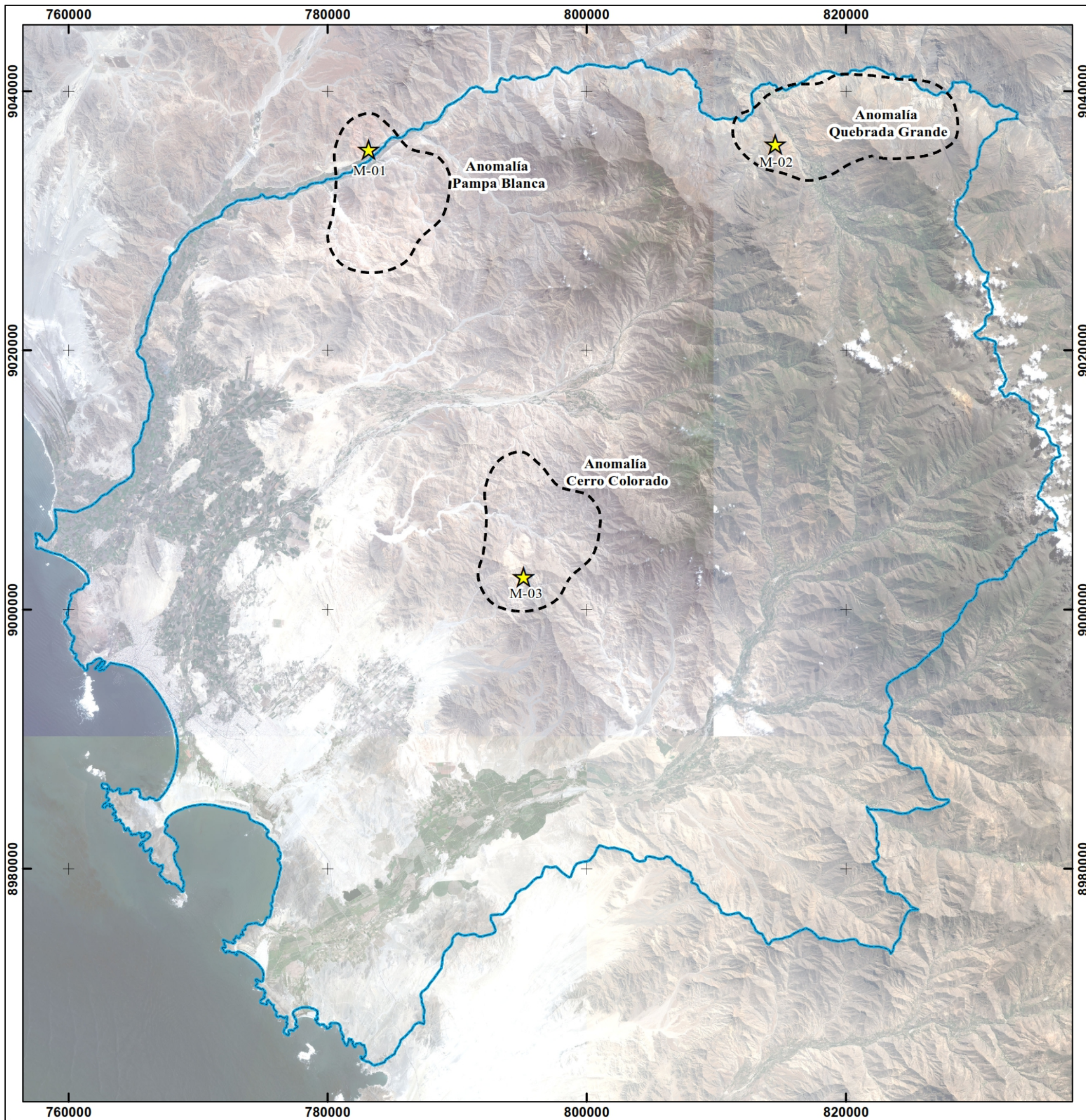
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		
TESIS: CARACTERIZACIÓN DE ALTERACIONES HIDROTERMALES MEDIANTE IMÁGENES ASTER Y SENTINEL 2, EN LA PROVINCIA DEL SANTA DEPARTAMENTO DE ANCASH		
PLANO DE ABUNDANCIA MINERAL DE ION FÉRRICO & ION FERROSO (Goethita Fe ³⁺ y Hematita Fe ²⁺)		
TESISTA: Bach. CÉSAR RAPHAEL CABELLOS RONCAL		
TIPO DE IMAGEN: SENTINEL 2	ESCALA: 1:300 000	PLANO: P-07
FECHA: AÑO 2022	DATUM: UTM, WGS84 - Zona 17 SUR	




LEYENDA

	Óxido de silicio - SiO ₂ (2%)
	Alteración Argílica Avanzada (3%)
	Alteración Argílica (10%)
	Alteración Propílitica (13%)
	Óxidos de Hierro (10%)
	Anomalia

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		
TESIS: CARACTERIZACIÓN DE ALTERACIONES HIDROTHERMALES MEDIANTE IMÁGENES ASTER Y SENTINEL 2, EN LA PROVINCIA DEL SANTA DEPARTAMENTO DE ANCASH		
PLANO DE ABUNDANCIA DE ALTERACIONES HIDROTHERMALES		
TESISTA: Bach. CÉSAR RAPHAEL CABELLOS RONCAL		
TIPO DE IMAGEN: SENTINEL 2	ESCALA: 1:300 000	PLANO: P-08
FECHA: AÑO 2022	DATUM: UTM, WGS84 - Zona 17 SUR	



LEYENDA

-  Muestras de mano (Terraspec)
-  Anomalia
-  Área de Estudio

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		
TESIS: CARACTERIZACIÓN DE ALTERACIONES HIDROTHERMALES MEDIANTE IMÁGENES ASTER Y SENTINEL 2, EN LA PROVINCIA DEL SANTA DEPARTAMENTO DE ANCASH		
UBICACIÓN MUESTRAS DE TERRASPEC		
TESISTA: Bach. CÉSAR RAPHAEL CABELLOS RONCAL		
TIPO DE IMAGEN: SENTINEL 2	ESCALA: 1:300 000	PLANO: P-09
FECHA: AÑO 2022	DATUM: UTM, WGS84 - Zona 17 SUR	