



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería de Minas

“DETECCIÓN DE ÁREAS PARA PROSPECCIÓN MINERA METÁLICA MEDIANTE EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES ASTER EN PLAN PORCONCILLO, CAJAMARCA 2019”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autores:

Ayde Milagros Hoyos Valencia
Jonathan Ramiro Bazan Valverde

Asesor:

Ing. Víctor Eduardo Alvarez León

Cajamarca - Perú

2019

DEDICATORIA

Dedico la presente tesis a Dios por guiar mis pasos, a mis padres por enseñarme a seguir mis sueños, por su sabiduría y sus consejos, por haberme dado la oportunidad de formarme en esta prestigiosa Universidad; a mi familia por haber sido mi apoyo a lo largo de mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida; a mi Director de Escuela, el Ing. Alex Marinovic quien me guio a lograr mis metas y fue de inspiración a ser cada día mejor y a mis maestros quienes sin su ayuda nunca hubiera podido hacer esta tesis, por haber confiado en mi y darnos el apoyo que hemos necesitado.

Hoyos Valencia, Ayde

Dedico la presente tesis a Dios, al patrón Dulce Nombre de Jesús por darme salud y bendición, a mis padres que con sacrificio y trabajo me guiaron en este proceso de aprendizaje, siendo los principales motores para lograr mis objetivos y metas, gracias a ellos he logrado llegar hasta aquí y convertirme en la persona que soy, es un orgullo y privilegio ser su hijo, son los mejores padres, a mi hermana por su apoyo incondicional, a mis maestros que con su apoyo y enseñanza de calidad dejaron en mí las bases para ser un buen profesional.

Bazan Valverde, Jonathan

AGRADECIMIENTO

Dedico este trabajo de tesis a Dios por su amor y bondad que no tienen fin y guiarnos.

Agradecemos a nuestros padres por su apoyo y confianza. Gracias por ayudarnos a cumplir nuestros objetivos como personas y estudiantes, por estar siempre presentes y acompañándonos.

Agradecemos de manera especial al Ing. Víctor Eduardo Álvarez León por ser nuestro asesor quien nos ha guiado con su paciencia y su rectitud como docente.

Tabla de contenidos

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTO.....	3
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
RESÚMEN.....	9
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	10
1.1. Realidad problemática	10
1.2. Formulación del problema	15
1.3. Objetivos	15
1.4. Antecedentes.....	16
1.5. Hipótesis	17
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA.....	18
2.1. Tipo de investigación.....	18
2.2. Población y muestra.....	18
2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos.....	18
2.4. Procedimiento	18
CAPÍTULO III: RESULTADOS.....	25
3.1 Discriminación de zonas de vegetación y roca en la zona de estudio	27
3.2 Detección de zonas de alteraciones hidrotermales y zonas de oxidación	30
3.3 Analisis de las firmas espectrales de los minerales para los endmember.	33
3.4 Mapa espectral para las especies minerales de la zona por el método MTMF	36
3.5 Comparación y correspondencia de las firmas espectrales con la librería de la USGS	37
3.6 Analisis y validación en campo de los resultados del analisis espectral de los datos Aster	39
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	53
4.1. Discusión	53
4.2. Conclusiones.....	55
4.3. Recomendaciones	57
REFERENCIAS	58
ANEXOS	60
Anexo 1: Ruta de muestreo zona Plan Porconillo, Cajamarca	60
Anexo 2: Anotando las coordenadas iniciales en la zona de Huambocancha Alta – Sector Penciloma.....	61
Anexo 3: Muestreando en el Volcánico San Pablo - Alteracion Argilica/Filica con venillas de Biotita.....	62
Anexo 4: Recolección de datos en campo.....	63
Anexo 5: Muestra recolectada de una brecha de origen hidrotermal	64
Anexo 6: Parte de la brecha de origen hidrotermal	64

Anexo 7: Conglomerado volcánico / cenizas	65
Anexo 8: Recolecta de datos de puntos GPS	66
Anexo 9: Venillas de biotita (Alteración argilica avanzada).....	67
Anexo 10: Desarrollo de alteración argilica intermedia sobre lavas andesíticas	67
Anexo 11: Desarrollo de alteración argilica intermedia.....	68
Anexo 12: Zona cuarzo alunita	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Plano geológico de la zona de estudio.....	26
Figura 2: Imagen de la zona de estudio que muestra en tonos claros las cubiertas vegetales de la zona de estudio.....	27
Figura 3: Mascara de vegetación de la zona de estudio que muestra en color negro las zonas con mayor cobertura vegetal.....	28
Figura 4: Imagen ASTER en la combinación 461 en RGB con aplicación de la máscara de vegetación donde solo se muestran las coberturas de suelos y rocas.....	29
Figura 5: Imagen de la zona de estudio en la combinación de bandas 461 en RGB, donde se muestran en color magenta zonas con alteración argílica en los volcánicos y en color amarillo zonas de oxidación por intemperismo en las areniscas de la formación Farrat.....	30
Figura 6: Cociente de bandas 3/1, 4/6, 7/5 en RGB, mostrando la alteración argílica en tonalidades verdes y zonas oxidadas en color rojizo amarillento.....	31
Figura 7: Cociente de bandas 4/5, 4/6, 4/7 en RGB, mostrando la alteración hidrotermal argílica en color blanco mayoritariamente en el volcánico San Pablo por presencia del enlace Al – OH.....	32
Figura 8: Firmas espectrales de minerales puros para los endmember que contienen el enlace Al – OH	33
Figura 9: Firmas espectrales ASTER SWIR de minerales puros para los endmember que contienen el enlace Al – OH	35
Figura 10: Mapeo espectral para las especies minerales alunita, caolinita/esmectita y alunita por el método MTMF.....	36
Figura 11: Comparación y correspondencia de las firmas espectrales de la clase alunita en color rojo con la firma espectral de la librería USGS. Gráfico del espectro de la imagen ASTER de la clase alunita, en abscisas la longitud de onda y en ordenadas reflectancia. Se observa una fuerte absorción de 2.1670 μm , típico de la alunita.....	37
Figura 12: Comparación y correspondencia de las firmas espectrales de la clase caolinita/esmectita en color rojo con la firma espectral de la librería USGS. Gráfico del espectro de la imagen ASTER de la clase caolinita, en abscisas la longitud de onda y en ordenadas reflectancia. Se observa una fuerte absorción de 2.2090 μm , típico de las arcillas del grupo de la caolinita.....	38

Figura 13: Comparación y correspondencia de las firmas espectrales de la clase montmorillonita en color rojo con la firma espectral de la librería USGS. Gráfico del espectro de la imagen ASTER de la clase caolinita, en abscisas la longitud de onda y en ordenadas reflectancia. Se observa una fuerte absorción de 2.2090 μm , típico de las arcillas del grupo de la montmorillonita.....	39
Figura 14: Desarrollo de alteración argílica moderada sobre lavas andesíticas, presencia de caolinita con coloraciones gris blanquecinas.....	40
Figura 15: Desarrollo de alteración argílica moderada - intermedia sobre lavas anaranjadas, desarrollo de venillas de biotita secundaria.....	41
Figura 16: Desarrollo de alteración argílica avanzada sobre probables flujos piroclásticos y tufos volcánicos, presencia de ensamble cuarzo/alunita.....	42
Figura 17: Desarrollo de alteración argílica intermedia sobre lavas andesíticas, presencia de montmorillonita con coloración anaranjadas y caolinita gris blanquecina, desarrollo de venillas de biotita secundaria.....	43
Figura 18: Desarrollo de alteración argílica intermedia sobre lavas andesíticas, presencia de montmorillonita con coloración anaranjadas, desarrollo de venillas de cuarzo oxidado.....	44
Figura 19: Desarrollo de alteración argílica avanzada sobre probables flujos piroclásticos y tufos volcánicos, presencia de ensamble cuarzo/alunita con bastantes óxidos de hierro.....	45
Figura 20: Desarrollo de alteración argílica intermedia sobre flujos piroclásticos, presencia de montmorillonita con coloración anaranjada.....	46
Figura 21: Crecimiento de cristales de anhidrita.....	47
Figura 22: Desarrollo de alteración argílica intermedia, presencia de caolinita y pirita diseminada.....	48
Figura 23: M1 y M2, muestreo rock chip sistemático en trincheras debido a la naturaleza masiva de la alteración argílica intermedia con el ensamble mineralógico caolinita/montmorillonita con pirita diseminada.....	49
Figura 24: M3 y M5, muestreo tipo rock chip sistemático en trincheras debido a la naturaleza masiva de la alteración argílica avanzada con el ensamble mineralógico cuarzo/alunita.....	50
Figura 25: M4 y M5, muestreo tipo chip chanel aleatorio en trincheras, perpendicular a las estructuras probablemente mineralizadas como son las venillas de cuarzo oxidado.....	51

Figura 26: M6 y M7, muestreo rock chip sistemático en trincheras debido a la naturaleza masiva de la alteración argílica intermedia con el ensamble mineralógico caolinita/montmorillonita con pirita diseminada.....52

RESUMEN

El presente estudio tiene por objetivo detectar zonas de interés para prospección minera metálica en la zona de Plan Porconillo, Cajamarca, para lo cual se descargaron las imágenes Aster de la zona de Plan Porconillo, para luego realizar las correcciones radiométricas, atmosféricas, de vegetación. Se sectorizaron las zonas de alteración hidrotermal y se hizo una comparación de las firmas espectrales con la biblioteca espectral de la USGS.

Los datos ASTER permitieron discriminar asociaciones minerales de alteración hidrotermal como son cuarzo/alunita, caolinita/montmorillonita, además no se logró identificar concentraciones anómalas de óxidos de hierro. El mapeo por el método MTMF nos permitió identificar y cartografiar minerales de alteración hidrotermal para poder identificarlos en campo. Se puede observar en campo áreas con alteración argílica intermedia (caolinita/montmorillonita) con ocurrencia de sulfuros metálicos como la pirita, además se encuentra bastante venilleo de cuarzo oxidado y biotita secundaria.

La zona estudiada corresponde a áreas concesionadas por minerales metálicos, esto se puede corroborar con los datos del software GEOCADMIN. Los sulfuros diseminados como la pirita están relacionadas a la ocurrencia de caolinita, mientras que las venillas de cuarzo oxidado están relacionados a los ensambles montmorillonita/esmectita.

No se han encontrado evidencias superficiales de sulfuros en los ensambles cuarzo/alunita, pero sin embargo estos ensambles presentan bastante oxidación. Por último, se determinó la zona más susceptible de prospección minera metálica.

Palabras clave: Teledetección, imágenes ASTER, prospección.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

En la actualidad hay escasos proyectos mineros donde se utilice la teledetección como herramienta de búsqueda de nuevos prospectos mineros.

La búsqueda de nuevos prospectos mineros es una tarea que requiere mucha planificación, recursos humanos, equipos, materiales y sobre todo tiempo, lo cual significa inversión de dinero. Por tal motivo se requiere desarrollar e implementar nuevos métodos y técnicas de cateo y prospección para optimizar costos, tiempo y precisión en la búsqueda de nuevos yacimientos que permitan obtener resultados de manera objetiva y simplificada reduciendo así estas problemáticas.

Por tal motivo se requiere desarrollar e implementar nuevos métodos y técnicas de cateo y prospección para optimizar costos, tiempo y precisión en la búsqueda de nuevos yacimientos que permitan obtener resultados de manera objetiva y simplificada reduciendo así estas problemáticas. Así mismo este trabajo busca generar nuevos conocimientos sobre esta técnica, además de aportar el procedimiento para la búsqueda de nuevos prospectos mineros. Esta investigación permitirá el desarrollo y la aplicación de la teledetección con las imágenes ASTER en Plan Porconcillo -Cajamarca.

Con la obtención de estas imágenes, se puede conocer el tipo de litología, mineralogía, estructuras y con esta información poder saber en qué tipo de yacimiento nos encontramos y así poder realizar una exploración en campo mucho más rápida y rentable. El presente estudio podrá ser utilizado por otras unidades mineras metálicas para que puedan optimizar su exploración.

Las imágenes multiespectrales del satélite ASTER se han usado con éxito para detectar alteración hidrotermal, instrumento al que se adicionaron seis bandas en la región del infrarrojo del espectro electromagnético donde muchos minerales de arcilla tienen su espectro de absorción de diagnóstico y se ha usado en varios estudios mineralógicos y litológicos (Rowan et al., 2003; Rowan et al., 2003; Ninomiya et al., 2002; Ninomiya, 2004) con los resultados buenos.

El instrumento consta de tres subsistemas independientes con un total de 14 bandas. El subsistema VNIR obtiene imágenes ópticas (0.52-0.86 μm) con una resolución espacial de 15 m. y el subsistema SWIR (1.65-2.4 μm).

La teledetección se define como la recolección de información sobre la superficie terrestre o la atmósfera a partir de la captación de la radiación electromagnética emitida por estas. La teledetección ha experimentado gran desarrollo durante los últimos años y en la actualidad tiene gran cantidad de aplicaciones, obteniendo imágenes desde aviones o satélites. (Gutiérrez Claverol, 1993).

Las imágenes Aster son utilizadas en algunas unidades mineras, como es el caso de la mina Quellaveco en la ciudad de Moquegua al Sur de Perú, en donde su estudio de teledetección a través de imágenes Aster muestra como resultados del mapeo de minerales la concentración de Illita, smectita – illita. También se mostraron firmas espectrales de smectita y moscovita. (Arenas Corujo, 2016).

Díaz Díaz, (2012) en su estudio llamado “Análisis de los sistemas Landsat ETM+ y Terra Aster como método de prospección de yacimientos epitermales. El caso de

depósito aurífero de Rodalquilar, Almería, España”. Utilizó diferentes técnicas de teledetección remota para analizar imágenes de Terra ASTER en el complejo de caldera de Rodalquilar, Almería, España. El análisis de estas imágenes muestra diversas áreas de intensa alteración. La resolución espectral más alta dentro de la región infrarroja de onda corta (SWIR) de la imagen ASTER permite una mayor diferenciación de las zonas de alteración casi concéntricas dominadas por diferentes asociaciones minerales.

Marchionni & Schalamuk, (2010) en su estudio llamado “Aplicación de la teledetección espacial óptica y de radar para el análisis geológico y la detección de áreas mineralizadas en el sector central del Macizo del Deseado, Provincia de Santa Cruz”. En el sector austral de Argentina, encontraron numerosos depósitos epitermales de metales preciosos (Au - Ag) que han sido reconocidos en esta comarca, vinculados espacial y temporalmente al volcanismo jurásico del Grupo Bahía Laura. En las investigaciones que lleva adelante el Instituto de Recursos Minerales (INREMI), orientadas a la localización de este tipo de depósitos, la tecnología satelital, incorporada como una herramienta de prospección, ha facilitado la identificación de varios sectores con evidencias de alteración hidrotermal y mineralizaciones asociadas.

La teledetección tiene como sinónimos a percepción remota y a sensoramiento remoto. Sensoramiento remoto es la ciencia y el arte de obtener información acerca de un objeto, área o fenómeno, a través del análisis de datos adquiridos por un dispositivo que no está en contacto con el objeto, área o fenómeno de interés. (Lillesand & Kieffer, 1994)

La evaluación de las distintas fuentes de información utilizadas nos ha permitido examinar los alcances y limitaciones de la incorporación de esta herramienta durante las etapas tradicionales de cartografía geológica y prospección minera, dando lugar al diseño de un diagrama metodológico de trabajo y a la definición de guías de prospección con base en la información satelital.

Azurra, Castro Godoy, Kaku, Kohno, & Marín. (2003) hicieron un estudio titulado “Procesamiento y productos aster del área de sierra de Famatina, provincia de la Rioja, república argentina”. Nos dicen que el sensor ASTER, transportado por el satélite Terra, tiene 14 bandas en 3 subsistemas de regiones: visible y cercano infrarrojo (VNIR), infrarrojo de onda corta (SWIR) e infrarrojo térmico (TIR). Debido a estas características principales, los datos ASTER son una herramienta de poder para aplicar en geología. El objetivo principal de este proyecto es el mapeo geológico a escala 1: 100.000 y el conocer el potencial minero. Se presentan los resultados de la primera etapa, incluido el procesamiento de datos satelitales y el análisis, así como la interpretación. Los datos del ASTER se procesaron para generar la elevación digital. Modelo (DEM), para orto rectificar las imágenes. Diferentes combinaciones de bandas VNIR, SWIR y TIR permiten identificar las unidades geológicas.

También se procesaron ratios de bandas para permitir las rocas y minerales hidrotermales. Además, se aplicó el mapeador de ángulo espectral (SAM) para clasificar diferentes alteraciones. Minerales en el campo, de minerales de alteración y rocas para la configuración de la base de datos espectrales del área. Como resultados se obtuvo que con la resolución multiespectral de los datos ASTER permite,

discriminar rocas ígneas principalmente en la región espectral del infrarrojo térmico (TIR) y minerales de alteración especialmente en la región del infrarrojo de onda corta (SWIR). En una segunda fase del presente proyecto se comprobó en el terreno geométrica y radiométrica de los datos.

Maggi, Bargiela, & Navone. (2009), en su estudio “Comparación de la aplicación de imágenes ASTER y Landsat 5 TM para el mapeo de carbonatos en la Quebrada de Humahuaca, provincia de Jujuy”. Este estudio se hizo en la zona de la cuenca del Río Grande, Jujuy, la cual se extiende a lo largo de la Quebrada de Humahuaca; es una depresión longitudinal como producto de una subsecuente erosión hídrica geológica (Paoli, 2003). Los carbonatos juegan un rol importantísimo en la mineralización del agua, es por esta razón que se pensó en la identificación y mapeo de las áreas de aporte de sedimentos ricos en este mineral. El objetivo de este trabajo fue identificar y comparar la utilidad de las imágenes ASTER para mapear las unidades cartográficas con materiales geológicos ricos en carbonatos que favorecen la mineralización del agua. Se aplicaron diversos procesamientos en los sets de bandas VNIRSWIR orientados a identificar las geo formas y las coberturas presentes, sobre imágenes satelitales ASTER: Combinaciones de bandas, Cocientes de bandas y Análisis de componentes principales. Posteriormente se intentó separar el carbonato en dos grupos: calizas y dolomitas. En la mayoría de estos procesamientos fue posible destacar la Formación Yacoraite. Los mejores resultados para el mapeo de carbonatos se obtuvieron con las imágenes ASTER. La aplicación de los índices de carbonatos y el análisis de componentes principales del set de bandas 4-6-8-9 SWIR de ASTER permitieron resaltar las áreas con contenido de este mineral.

1.2. Formulación del problema

¿Dónde están ubicadas, las áreas de interés para prospección minera metálica procesando imágenes satelitales ASTER, en el sector Plan Porconillo, Cajamarca?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Detectar áreas de interés minera metálica, a través del procesamiento de imágenes satelitales ASTER en el sector Plan Porconillo, Cajamarca.

1.3.2. Objetivos específicos

- Discriminar zonas de vegetación, suelos y roca en la zona de estudio.
- Detectar las zonas de alteraciones hidrotermales y zonas de oxidación por intemperismo presentes en la zona elaborando un mapa temático a partir del procesamiento de imágenes Aster.
- Analizar las firmas espectrales de los minerales para los endmember.
- Realizar el mapeo espectral para las especies minerales de la zona por el método MTMF.
- Realizar la comparación y correspondencia de las firmas espectrales con la librería de la USGS.
- Comparar y validar los resultados de la detección del análisis espectral de los datos Aster con el cartografiado en campo.

1.4. Antecedentes

- (Carrera y Terrones 2017) Usaron técnicas de prospección espectral para determinar zonas de alteración hidrotermal por medio del análisis y procesamiento de imágenes satelitales aster en el distrito de Llacanora,

Se trabajó con imágenes aster del 2017, imágenes tomadas en época de sequía para favorecer el trabajo, identificando así minerales como caolinita, alunita, jarosita, montmorillonita, se identificaron zonas estructurales favorables para la mineralización como es la falla Cajamarca, evidencia de ello es la alteración textural de las areniscas de la formación Farrat, así como la presencia de minerales de alteración hidrotermal, concluyendo que en el distrito de Llacanora fue posible la prospección de zonas de alteración hidrotermal.

- (Julcamoro y Julcamoro 2018) Se adquirieron imágenes satelitales ASTER y Landsat de la zona de Namora, Se determinaron zonas con interés prospectivo con presencia de minerales como: Calcita, Caosmectita, Corindón, Cuarzo, Diásporo, Epidota, Illita, Muscovita, Tremolita-Actinolita, turmalina, evidenciando la ocurrencia de alteraciones minerales tales como propilítica, potásica y argílica según la clasificación mineral de Leach, 1998. Concluyendo que es posible identificar áreas de interés prospectivo de yacimientos económicamente rentables, utilizando teledetección, mediante imágenes satelitales Áster y Landsat OLI – TIRS.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis general

Procesando imágenes satelitales ASTER, se detectarán áreas de interés minera metálica en el sector Plan Porconillo, Cajamarca.

1.5.2. Hipótesis específicas

Mediante el procesamiento de imágenes ASTER se podrán determinar las zonas con alteración hidrotermal y se elaborará un mapa temático.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

La investigación es del tipo no experimental – transversal - correlacional.

2.2. Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos)

Población: Todas las imágenes satelitales ASTER de Cajamarca.

Muestra: Imágenes satelitales ASTER del sector de Plan Porconillo.

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

Las técnicas utilizadas son la observación y el análisis espectral de las imágenes satelitales, el cual viene a ser la descomposición de dicha señal en sus diversas componentes dentro de un dominio frecuencial; a la vez es una técnica ampliamente utilizada para discriminar diferentes tipos de materiales y generar procesamiento de datos usando instrumentos como el software ArcGIS 10.4 y Envi 5.3, para la localización de posibles áreas de interés prospectivo.

2.4. Procedimiento

- **Adquisición de imágenes satelitales**

Las imágenes fueron adquiridas del servidor (<https://www.usgs.gov/>) imágenes del sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer).

- **Fusión de imágenes**

El usuario de datos de sensores remotos tiene acceso a imágenes de diversas resoluciones espaciales, espectrales y temporales. Muchos fenómenos ambientales son dependientes de la escala, esto quiere decir, que sus

características varían dependiendo del nivel al cual los datos espaciales están siendo analizados. En consecuencia, analizar el mismo fenómeno a diferentes escalas espaciales provee una visión integral facilitando un mejor entendimiento de sus impactos. En este orden de ideas, métodos de ampliación son necesarios para integrar datos de diferentes resoluciones (Chuvienco, 2016).

Una definición más detallada: Es un proceso de combinar imágenes, obtenidas por sensores de diferentes longitudes de onda que ven simultáneamente la misma escena, para formar una imagen compuesta. La imagen compuesta se forma para mejorar el contenido de la imagen y para facilitar al usuario la detección, el reconocimiento y la identificación de objetivos y aumentar su conocimiento de la realidad (Jiang D, Zhuang D, & Huang, 2013)

- **Corrección de imágenes satelitales**

Los datos que vienen almacenados en una imagen obtenida mediante un sensor los cuales están representados en números digitales (ND), dichos niveles digitales no representan de manera directa ninguna variable biofísica y, por tanto, no es conveniente que se obtenga ningún índice espectral usando dichos valores en crudo, la razón para no hacerlo es muy simple ya que los índices espectrales fueron desarrollados para trabajar con valores de reflectancia espectral de la superficie terrestre.

Los niveles digitales no proporcionan dicha información, por lo que es necesario convertir los números digitales (ND) en valores de reflectancia, este proceso se realiza en dos procesos el primero llamado corrección radiométrica que consiste

en transformar los ND en radiancia y la segunda denominada corrección atmosférica que consiste en transformar los ND en reflectancia.

- **Corrección Radiométrica**

El modelo de corrección radiométrica tiene en cuenta, entre otros factores, el relieve (ángulos de incidencia y sombras proyectadas), la posición solar, la distancia Tierra-Sol en el momento de captación de la imagen, el amortiguamiento atmosférico en los caminos de ida y de retorno de la radiación y parámetros, para cada canal, de densidad óptica atmosférica, irradiancia exoatmosférica solar y calibración del sensor.

- **Corrección atmosférica**

La corrección atmosférica busca recuperar la radiancia propia del objeto de estudio, obtenida de la señal recibida por el sensor. Para ello se requiere: 1) convertir los números digitales (ND) de cada banda a valores de radiancia, y 2) la radiancia se transforma a valores de reflectividad en el techo de la atmósfera, esto se obtiene mediante FLAASH la conversión a valores de reflectancia (Kruse, 2004).

- **Clasificación firmas espectrales provenientes de la imagen ASTER**

Para la identificación de las firmas espectrales de minerales característicos de yacimientos metálicos en la imagen satelital Aster se tiene en cuenta el método de la envolvente que busca generar la simplificación de la gráfica haciendo uso de los picos de absorción y reflectancia contenidos en las grafica inicial, para tener la posibilidad de comparar con las firmas espectrales de los minerales encontrados en la zona de estudio.

- **Máscaras de vegetación**

Esta técnica se utilizó para minimizar el efecto de la vegetación sobre las demás cubiertas de suelo y roca utilizando una máscara para vegetación por las características espectrales de la misma en las diferentes bandas de la imagen ASTER, para lo cual se procedió a generar una máscara de vegetación en base al índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) para excluir del análisis aquellas áreas con una elevada cobertura vegetal con un NDVI mayor que 0.3.

El cálculo del NDVI en una imagen ASTER se determina con las bandas del NIR y la banda R en el rango de longitudes de onda del infrarrojo cercano y R de la banda roja, estos valores de NDVI son adimensionales y están en un intervalo de -1 a 1.

$$\text{NDVI} = \frac{B3N - B2}{B3N + B2}$$

Dónde:

NDVI: Índice de vegetación normalizada

B3N: Banda NIR del infrarrojo cercano

B2: Banda R del rojo.

- **Cociente de bandas**

Los cocientes de bandas son muy utilizados para la detección de zonas de alteración hidrotermal y la discriminación de distintas litologías, donde se pueden contrastar o realzar las diferencias entre los máximos y mínimos de reflectancia. En el numerador colocamos la banda en la cual existe el máximo de reflectancia y en el denominar la banda correspondiente a la absorción. En base

al análisis de las firmas espectrales se realizó el cociente de bandas 3/1, 4/6, 7/5 en RGB (Figura 5) donde podemos ver las zonas de alteración argílica en color verde.

Los óxidos de Fe tienen reflectancia en la banda 3 y absorción en la banda 1. La forma de la curva puede variar de acuerdo al contenido en Fe, pero una alta respuesta en el índice 3/1 indicaría la presencia de zonas de oxidación en color rojo (R). El cociente 4/6 está relacionado con la alteración argílica, dando alta la respuesta del color verde (G) en los lugares con illita, caolinitas, montmorillonitas y/o moscovitas, ya que todos estos minerales tienen absorción en 2.208 μm (b6).

- **Procesamiento de datos aster, combinación de bandas**

De las diferentes combinaciones de banda, se ha seleccionado la composición color RGB: 461 (Figura 1), ella muestra diferentes zonas de alteración. El análisis de los diferentes colores de la combinación de bandas 461 en RGB nos permite inferir que el color magenta en la parte media superior de la imagen, en diferentes zonas del volcánico San Pablo se debe a una fuerte absorción de la B6 (2.20 μm .) en este rango espectral absorben los minerales de arcilla debido al enlace Al-OH. El color amarillo que se observa mayormente en las secuencias sedimentarias clásticas de la Formación Farrat se debe a una fuerte absorción de B1 (0.55 μm) en este rango espectral tenemos la absorción debida a procesos electrónicos del catión Fe³⁺ (Hunt y Salisbury, 1970).

ANÁLISIS ESPECTRAL DE LA IMAGEN ASTER

- **Mapeo mineralógico con MTMF**

El MTMF (Mixture Tuned Matched Filtering) es una técnica de clasificación hiperespectral que mapea abundancias de endmembers en la escala del sub-píxel y utiliza un filtro de ajuste (Matched Filter) para maximizar la respuesta del endmember conocido y suprimir la respuesta de los minerales desconocidos considerados de fondo. Esto proporciona un medio rápido de detección de materiales específicos con base en el ajuste a firmas espectrales provenientes de bibliotecas espectrales o imágenes, y no requiere conocimientos de todos los endmembers de una imagen.

Este algoritmo, realiza una desmezcla parcial del píxel mediante la identificación de la abundancia de un solo endmember definido por el usuario, maximizando la respuesta de los endmember de interés y minimizando la respuesta de los background desconocidos.

Los resultados de MTMF se pueden presentar en forma de imágenes en escala de grises con valores entre 0 y 1 los cuales proporcionan un medio de estimar la abundancia mineral, o como mapas en colores mostrando los minerales que predominan espectralmente en cada píxel.

- **Selección de los endmembers**

Se utilizaron como endmember firmas espectrales de minerales puros y más abundantes asociados a zonas de alteración hidrotermal y que contengan el enlace Al – OH (montmorillonita, caolinita/esmectita, caolinita, illita, alunita).

Los análisis por ratios nos muestran la escasa presencia de zonas de oxidación en el área de interés que pertenece al volcánico San Pablo, por lo cual no aplicaremos firmas espectrales de óxidos e hidróxidos de hierro como endmembers.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

MARCO GEOLOGICO LOCAL

La geología de la zona de estudio está comprendida en su mayoría por rocas del volcánico San Pablo, formadas por brechas volcánicas, stocks con venillas de cuarzo y biotita, flujos piroclásticos y lavas volcánicas de composición dacítica.

Estas rocas suprayacen a las areniscas cuarzosas de la formación Farrat, cuya orientación de los estratos lleva una dirección aproximada este – oeste.

Las rocas volcánicas presentan evidente alteración hidrotermal, variando desde cuerpos silicificados con ensamble cuarzo/alunita, zonas con alteración argílica moderada e intermedia y pequeñas áreas con alteración propílica con presencia de epidota y anhidrita.

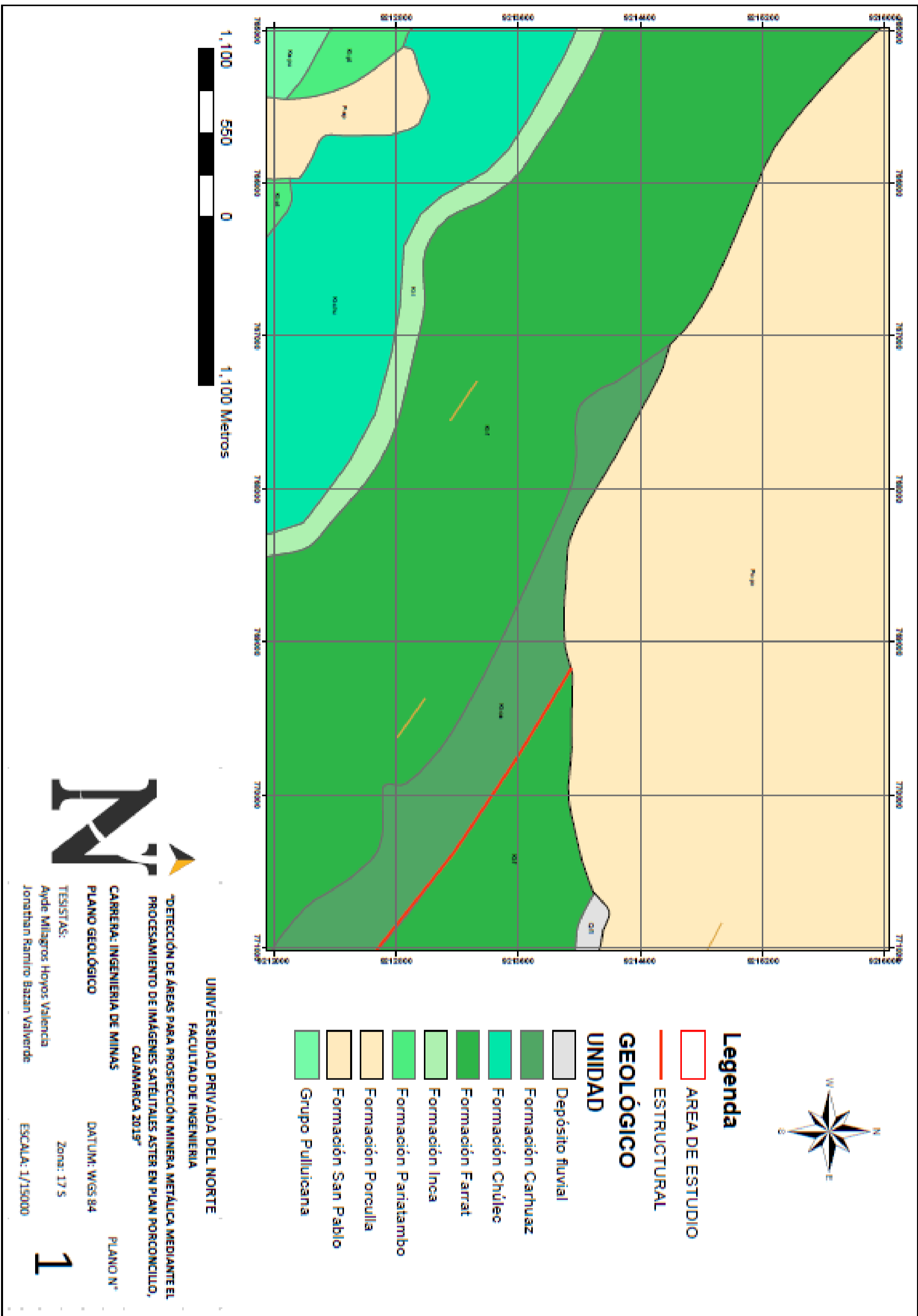


Figura 1: Plano geológico de la zona de estudio

3.1 Discriminación zonas de vegetación y roca en la zona de estudio

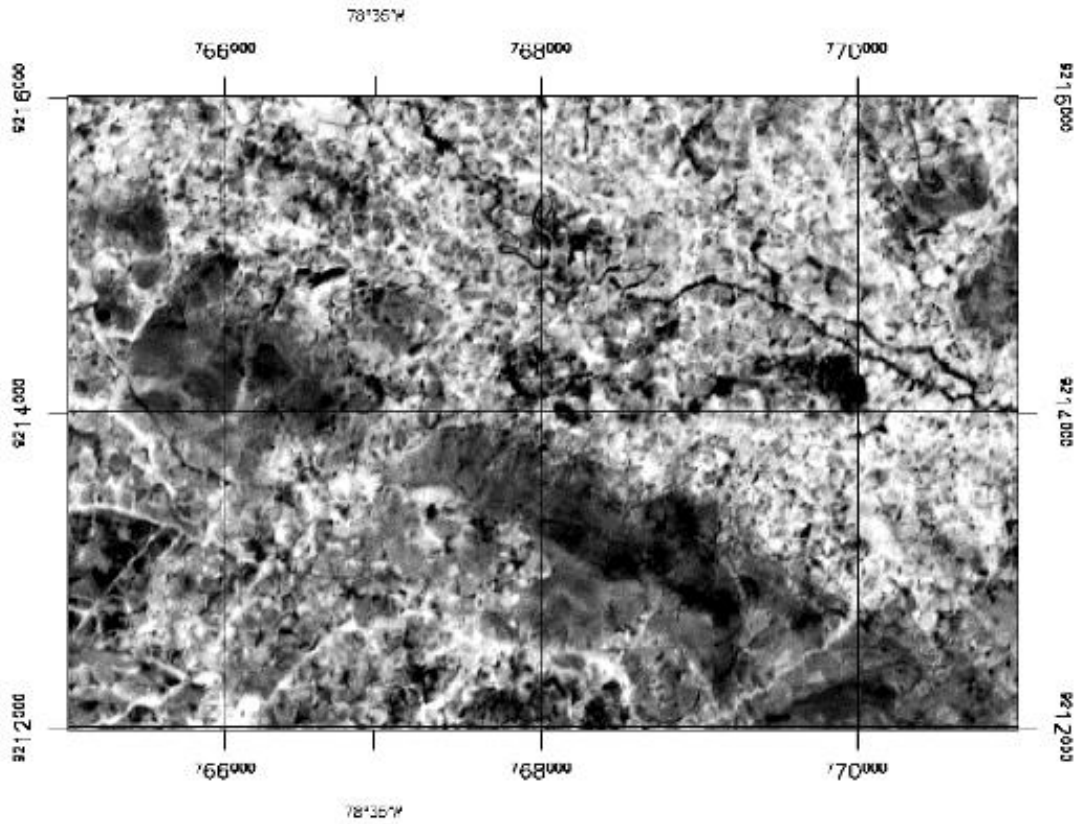


Figura 2: Imagen de la zona de estudio que muestra en tonos claros las cubiertas vegetales de la zona de estudio.

Posteriormente se construyó una máscara de vegetación en base al NDVI, tomando en cuenta que los valores superiores a 0.4 corresponden a la vegetación y pueden enmascarse para anularla del proceso.

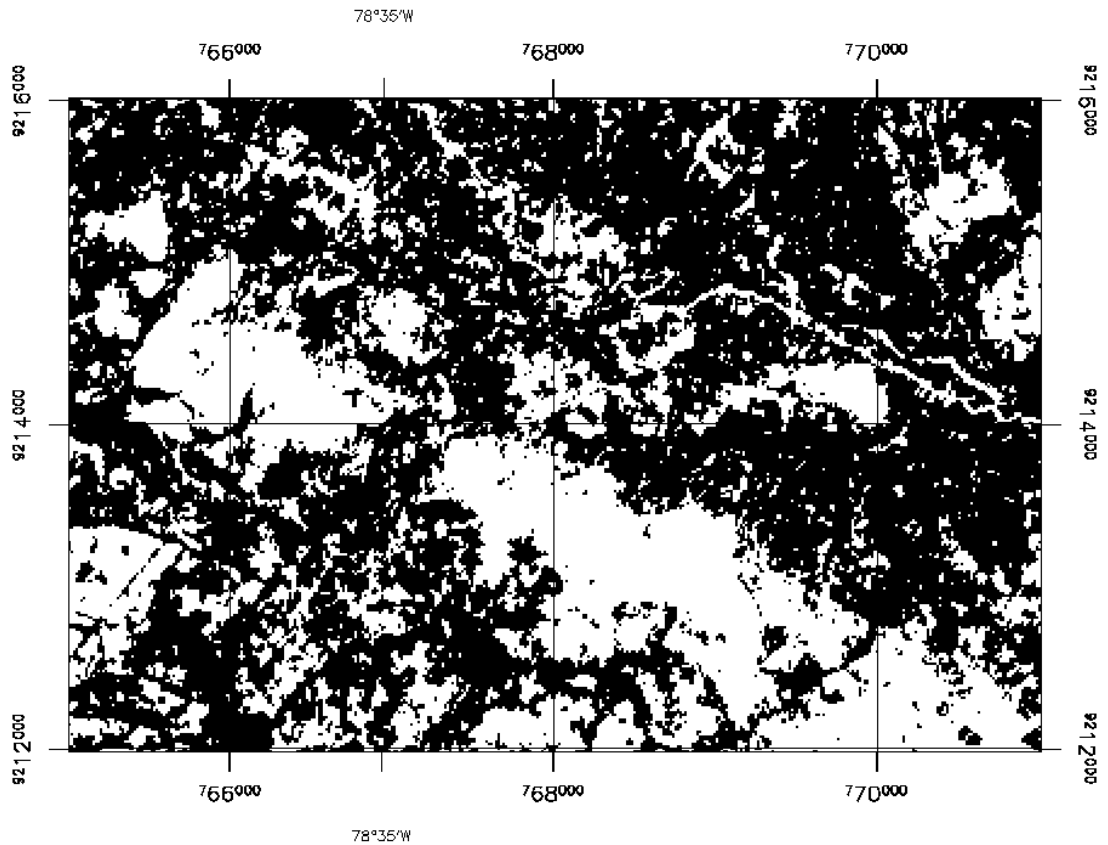


Figura 3: Mascara de vegetación de la zona de estudio que muestra en color negro las zonas con mayor cobertura vegetal.

Posteriormente se aplica esta máscara de vegetación a las nueve bandas de la imagen ASTER para enmascarar la vegetación y anular el efecto espectral de esta sobre las demás cubiertas.

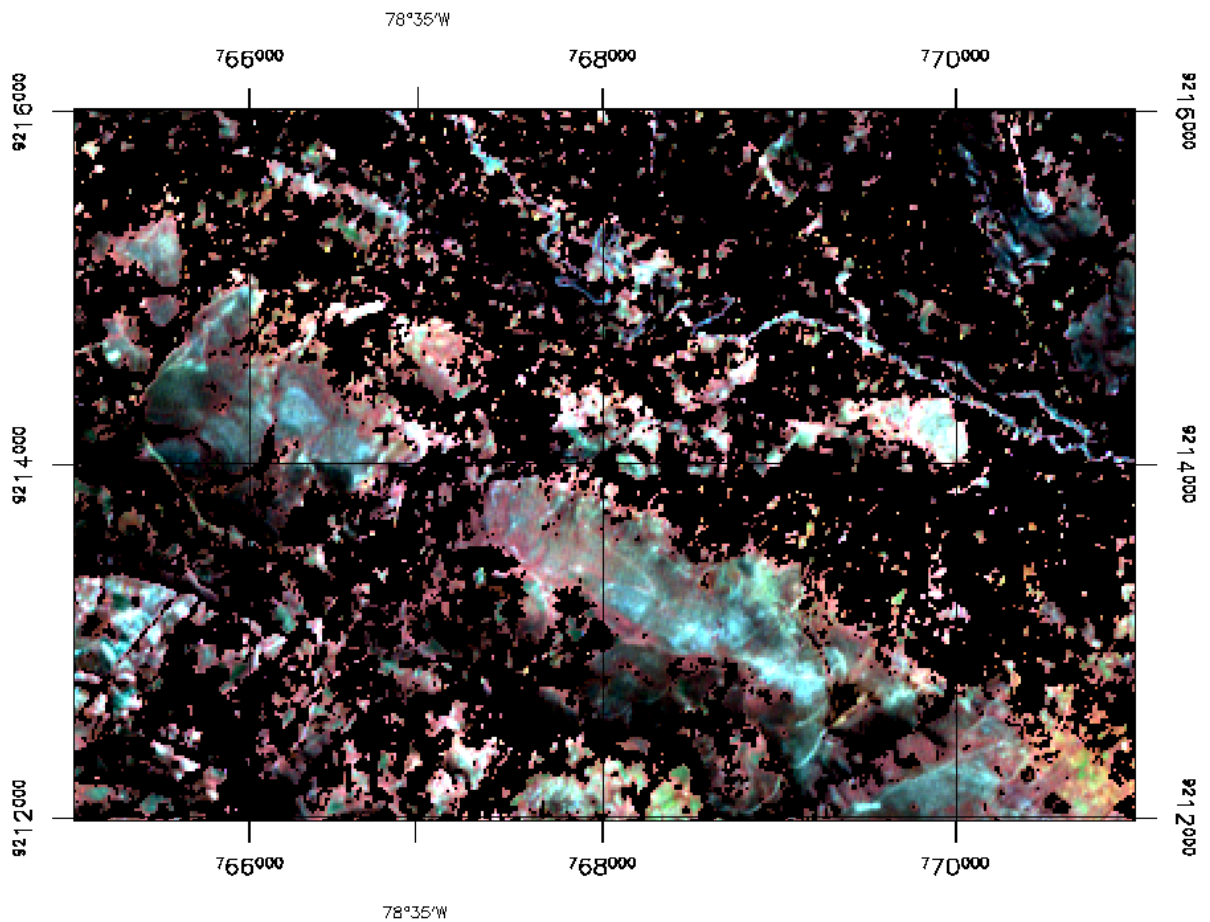


Figura 4: Imagen ASTER en la combinación 461 en RGB con aplicación de la máscara de vegetación donde solo se muestran las coberturas de suelos y rocas.

3.2 Detección de zonas de alteraciones hidrotermales y zonas de oxidación por intemperismo presentes en la zona

- Detección de zonas de alteración argílica y zonas de oxidación por intemperismo

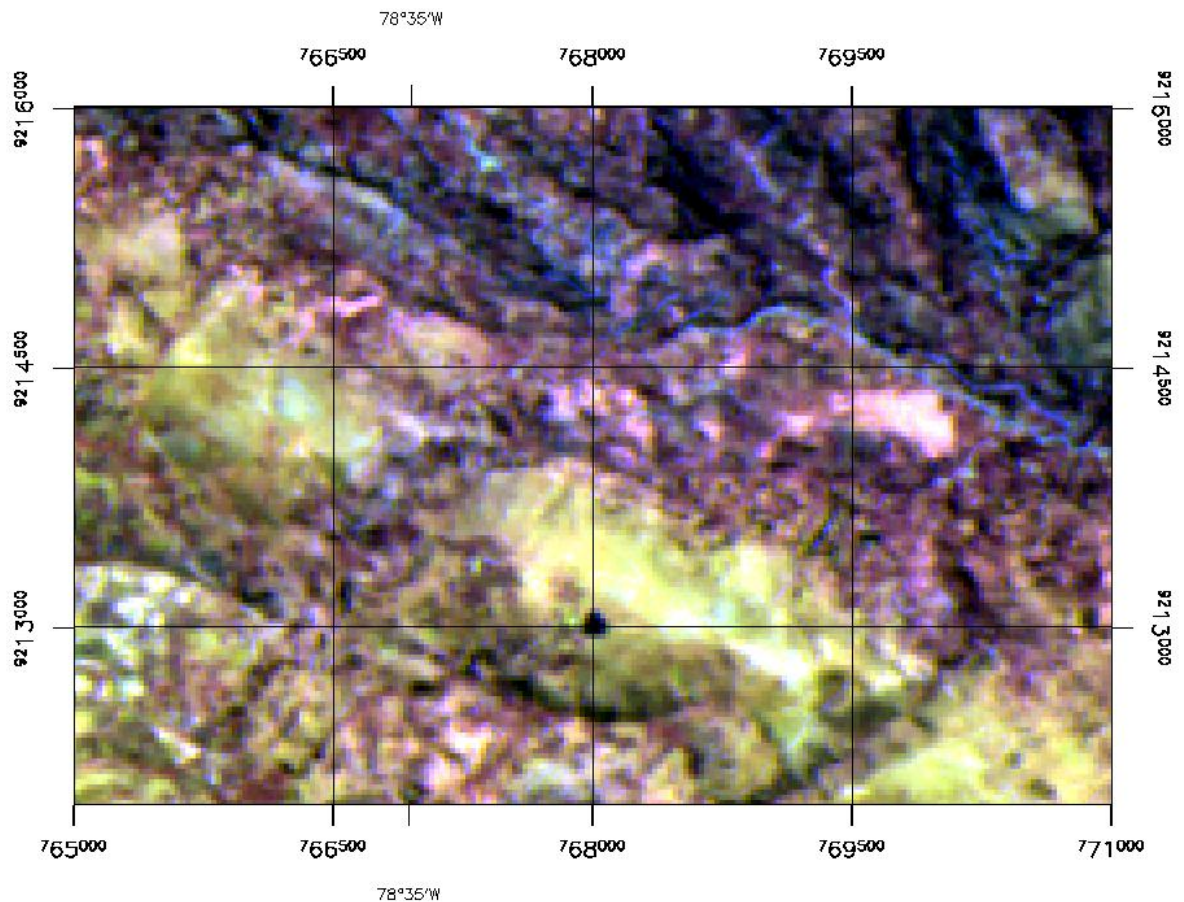


Figura 5: Imagen de la zona de estudio en la combinación de bandas 461 en RGB, donde se muestran en color magenta zonas con alteración argílica en los volcánicos y en color amarillo zonas de oxidación por intemperismo en las areniscas de la formación Farrat.

Se puede observar que existen zonas con coloración verde (figura 6), distribuidas mayormente en el volcánico San Pablo, debido a los ensambles mineralógicos de la

alteración argílica, pero ausencia del color rojo o amarillo debido a la escasa presencia de óxidos de hierro por alteración hidrotermal dentro de los volcánicos.

Las tonalidades rojizas y amarillentas aparecen mayormente en las secuencias sedimentarias clásticas debido al intemperismo de las mismas, acompañadas de tonalidades azules debido a la presencia de zonas de reducción del ion Fe.

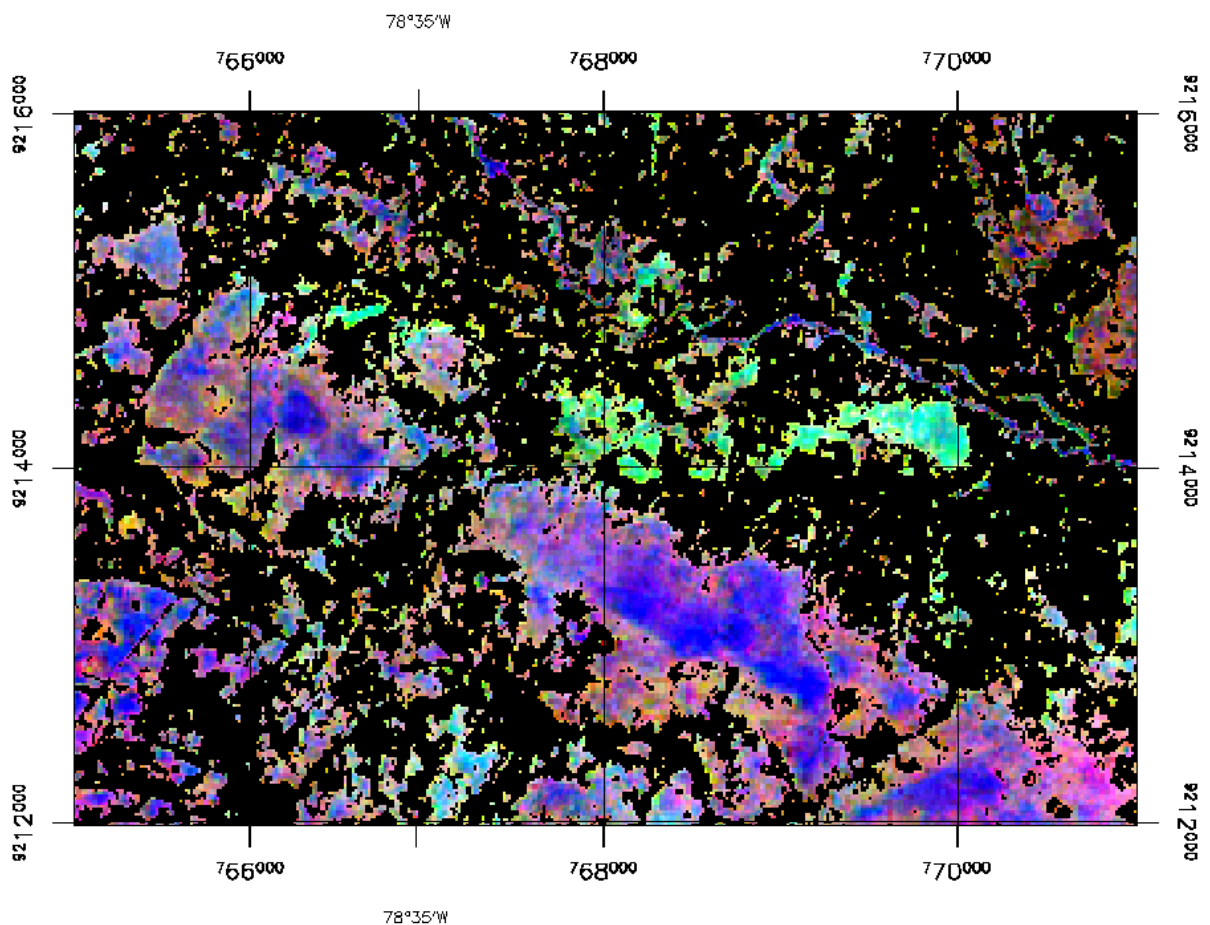


Figura 6: Cociente de bandas 3/1, 4/6, 7/5 en RGB, mostrando la alteración argílica en tonalidades verdes y zonas oxidadas en color rojizo amarillento.

Se utilizaron cocientes de bandas del subsistema SWIR para la discriminar zonas de alteración hidrotermal ya que estas presentan picos de absorción y de reflectancia

característicos en esta región del espectro electromagnético. La combinación de cocientes 4/5, 4/6, 4/7 dispuesto en una composición RGB (figura 7) muestran en blanco zonas de alteración hidrotermal en los volcánicos San Pablo debido a respuestas espectrales de todas las bandas involucradas, la banda B5 y B6 por absorción de los enlaces de Al-OH y la banda 7 por el enlace Fe-OH.

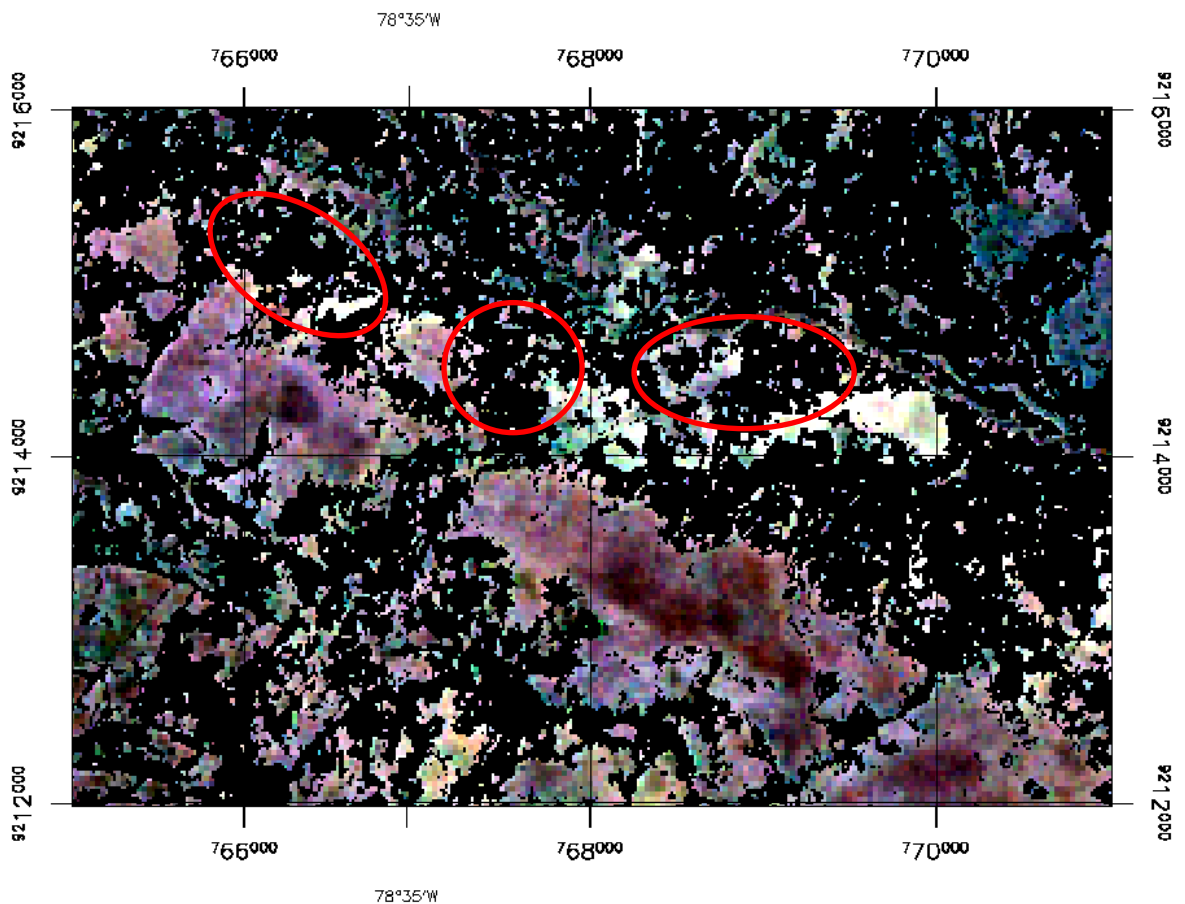


Figura 7: Cociente de bandas 4/5, 4/6, 4/7 en RGB, mostrando la alteración hidrotermal argílica en color blanco mayoritariamente en el volcánico San Pablo por presencia del enlace Al – OH.

3.3 Análisis de las firmas espectrales de los minerales para los endmember

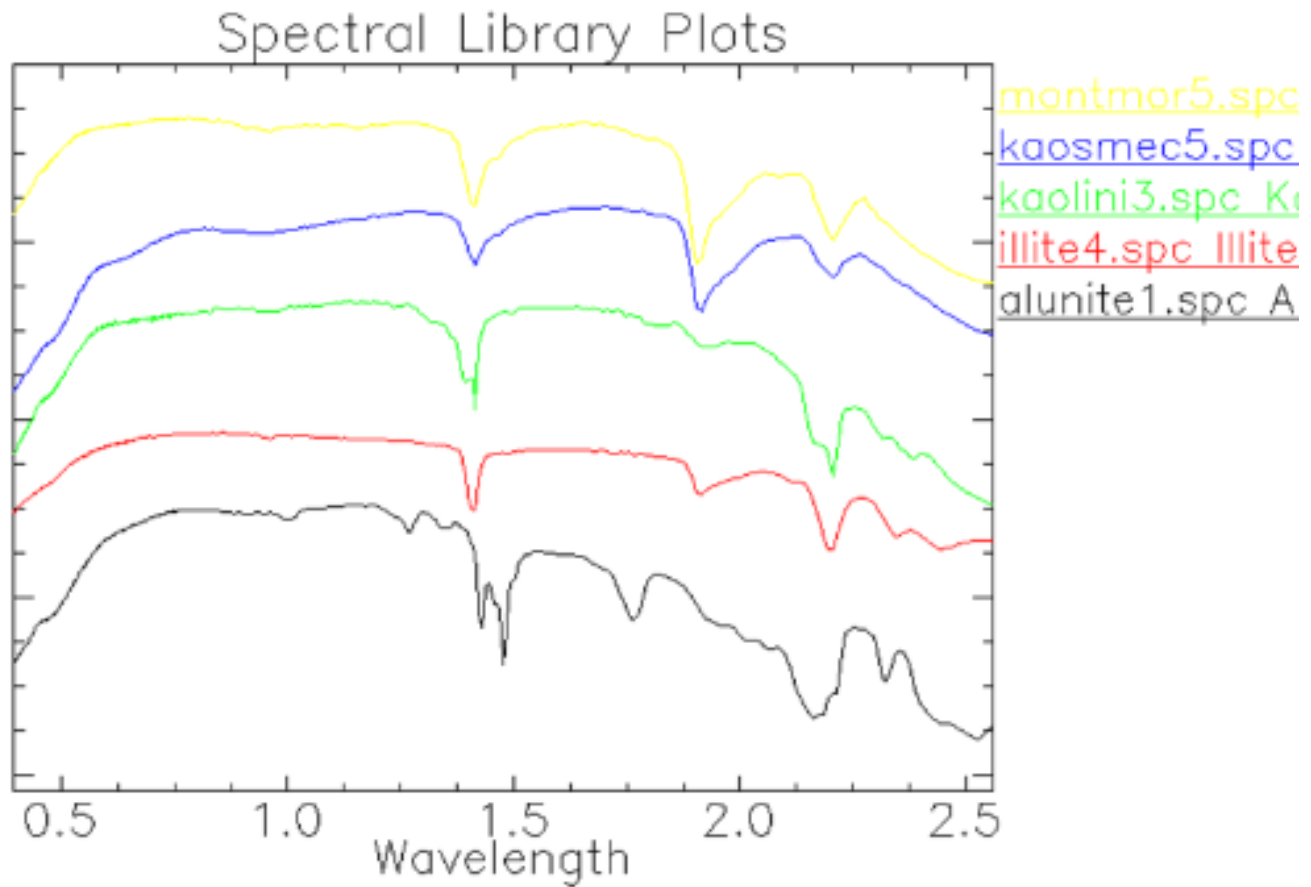


Figura 8: Firmas espectrales de minerales puros para los endmember que contienen el enlace Al – OH

En la imagen ASTER, se debe tener en cuenta que las firmas espectrales disponibles son muestras tomadas en laboratorio y en la naturaleza no es usual encontrar superficies extensas con presencia de un solo tipo de mineral. Entonces se debe tomar en cuenta las mezclas espectrales que se puedan dar en la superficie terrestre. En el caso de las imágenes satelitales ocurren las mezclas lineales y las fuentes que contribuyen a las mezclas lineales son:

- Los sistemas de imágenes ópticas que integran la reflexión de la luz sobre cada píxel.
- Todos los materiales presentes dentro el campo de visión del sensor contribuyen a la reflexión de cada uno de los píxeles.
- La variación de la luz en función de la topografía da como resultado la atenuación de las señales.

Se adaptaron las firmas espectrales de laboratorio a las longitudes de onda de las bandas ASTER y se construyó una librería ASTER únicamente con las bandas SWIR (B4, B5, B6, B7, B8 y B9), ya que en estas longitudes de onda (1.65um a 2.4um) se dan los procesos de absorción de la mayoría de minerales con el enlace Al – OH.

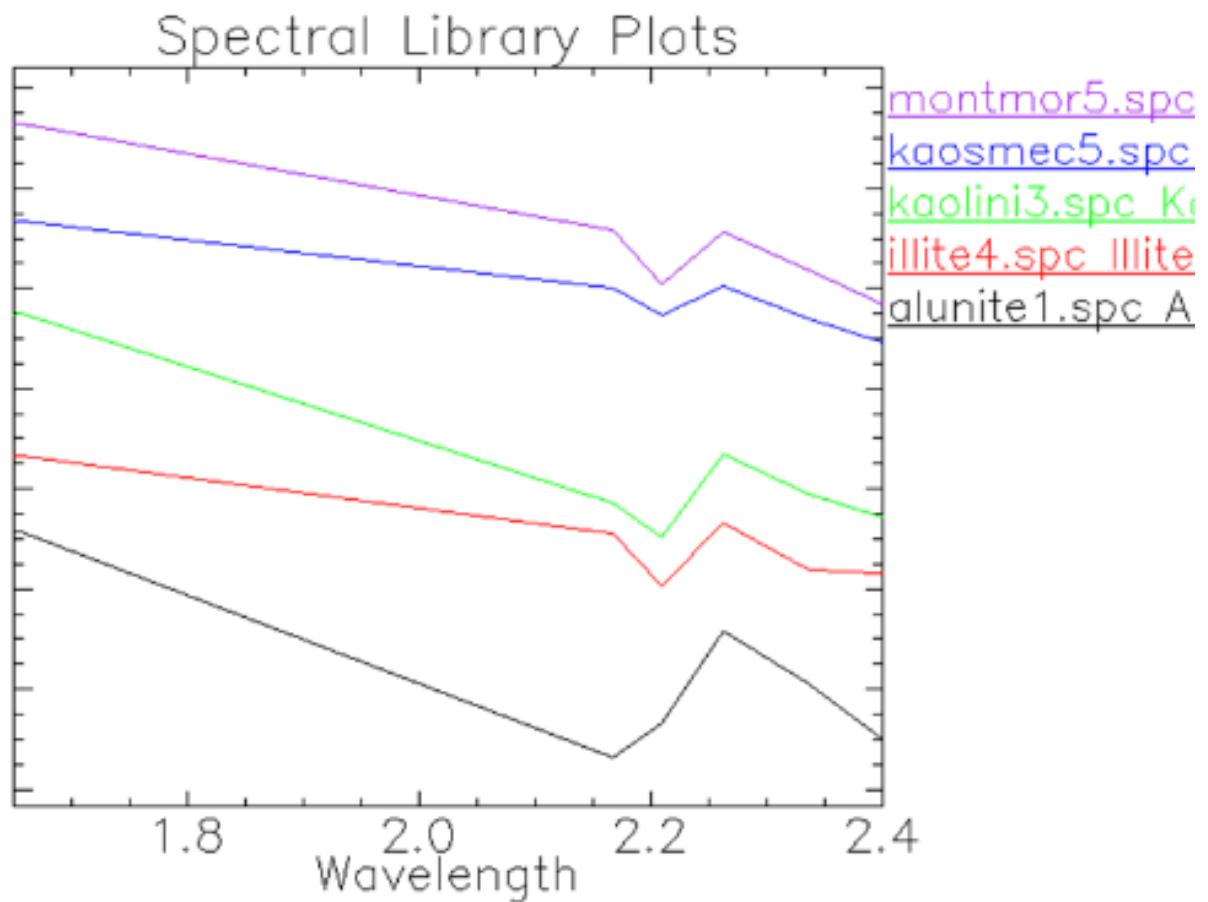


Figura 9: Firmas espectrales ATER SWIR de minerales puros para los endmember que contienen el enlace Al – OH

Se realizó la clasificación utilizando el método MTMF para los minerales como la caolinita, caolinita/esmectita, illita y alunite. Los espectros standard para clasificar el sector fueron tomados de la base de datos de las librerías espectrales del USGS.

3.4 Mapeo espectral para las especies minerales de la zona por el método MTMF.

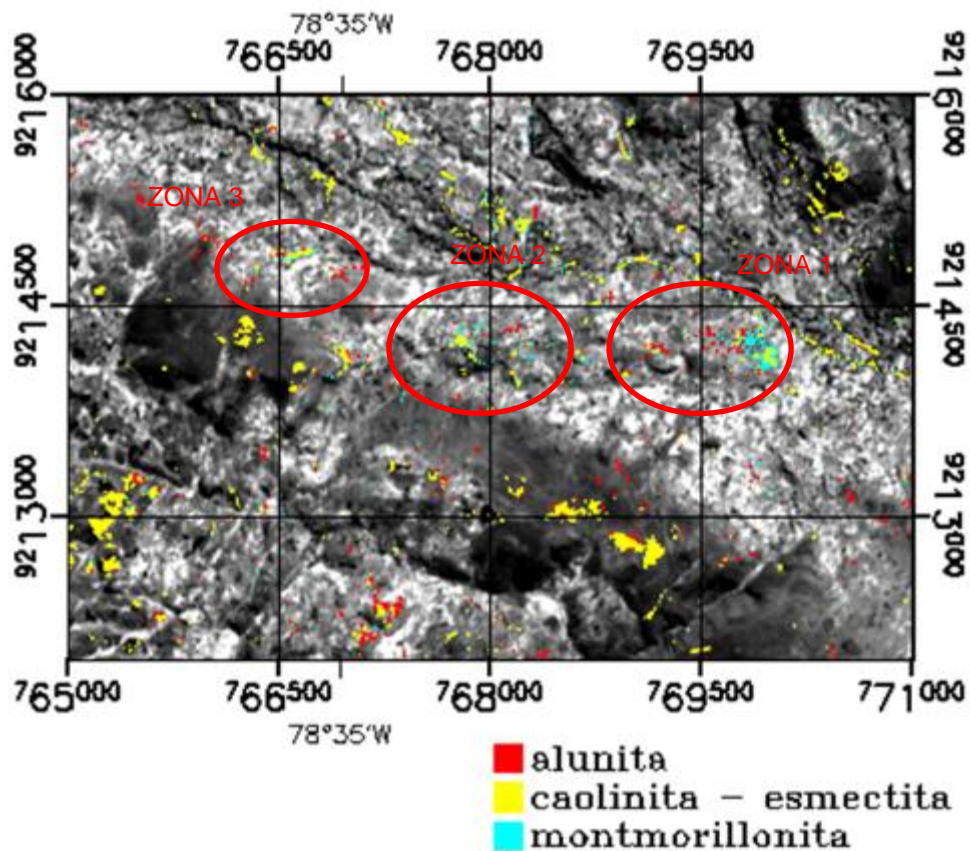


Figura 10: Mapeo espectral para las especies minerales alunita, caolinita/esmectita y alunita por el método MTMF.

Los resultados obtenidos del análisis espectral permitieron la identificación de los siguientes minerales en la zona correspondiente al volcánico San Pablo (figura 10): alunita (color rojo), caolinita/esmectita (color amarillo) y montmorillonita (color cian) que se los ha distribuido en tres zonas para su identificación en campo.

El análisis comparativo entre las firmas espectrales de la librería espectral de la USGS y las identificadas en la imagen ASTER, nos muestra similitudes en la región espectral

del SWIR, para las especies minerales alunita, caolinita/esmectita y montmorillonita, como se muestra en las siguientes figuras:

3.5 Comparación y correspondencia de las firmas espectrales con la librería de la USGS.

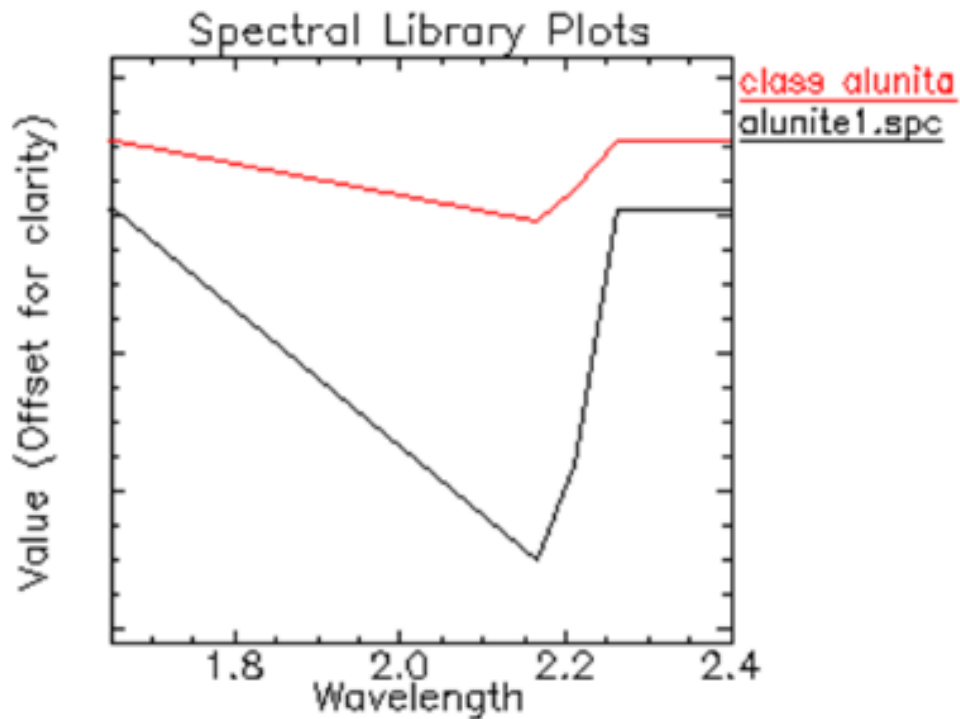


Figura 11: Comparación y correspondencia de las firmas espectrales de la clase alunita en color rojo con la firma espectral de la librería USGS. Gráfico del espectro de la imagen ASTER de la clase alunita, en abscisas la longitud de onda y en ordenadas reflectancia. Se observa una fuerte absorción de 2.1670 μm , típico de la alunita.

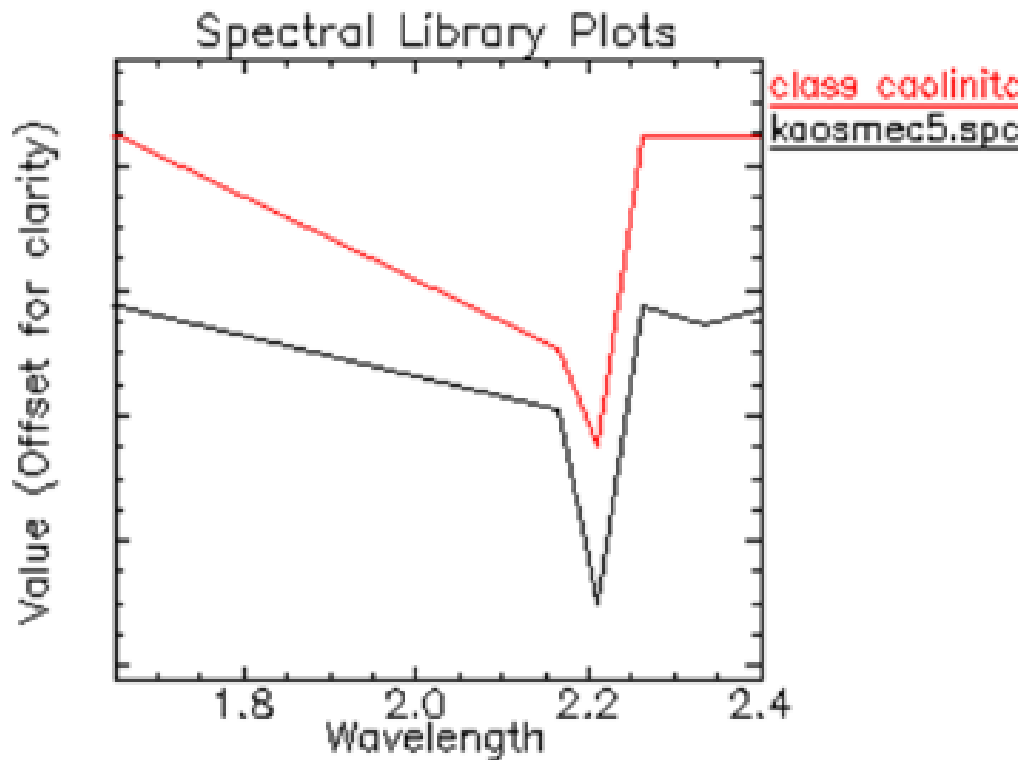


Figura 12: Comparación y correspondencia de las firmas espectrales de la clase caolinita/esmectita en color rojo con la firma espectral de la librería USGS. Gráfico del espectro de la imagen ASTER de la clase caolinita, en abscisas la longitud de onda y en ordenadas reflectancia. Se observa una fuerte absorción de 2.2090 μm , típico de las arcillas del grupo de la caolinita.

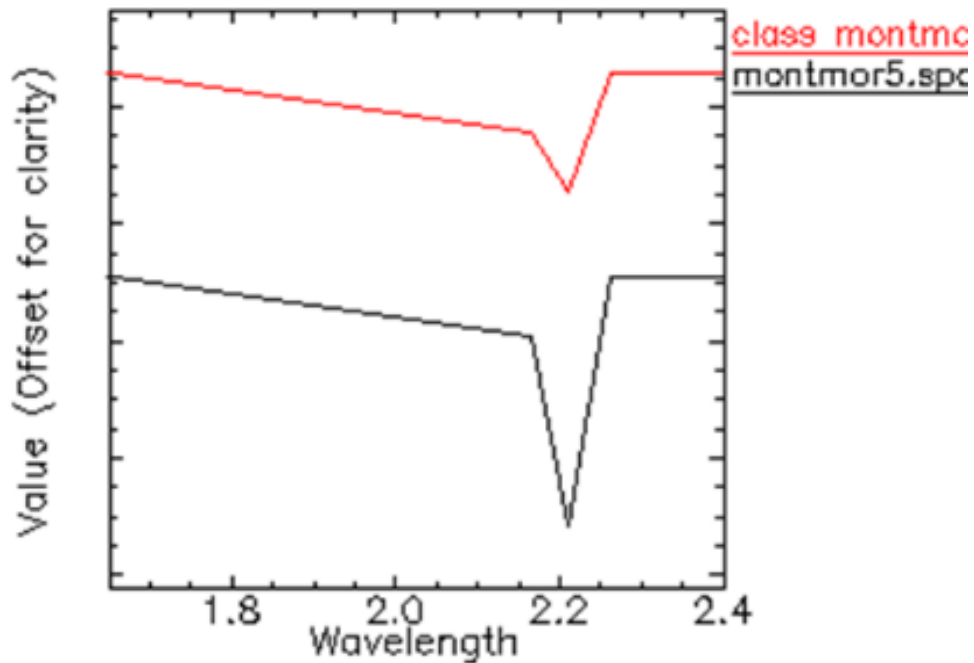


Figura 13: Comparación y correspondencia de las firmas espectrales de la clase montmorillonita en color rojo con la firma espectral de la librería USGS. Gráfico del espectro de la imagen ASTER de la clase caolinita, en abscisas la longitud de onda y en ordenadas reflectancia. Se observa una fuerte absorción de 2.2090 μm , típico de las arcillas del grupo de la montmorillonita.

3.6 Análisis y validación en campo de los resultados del análisis espectral de los datos Aster

ZONA 1 (PUNTOS DE IDENTIFICACION M1, M2, M3)

M1: Se identificó en la coordenada 769892.227E 9214138.854N zonas con alteración argílica moderada, plagioclasas alterándose a caolinita, presenta coloraciones rojizas por presencia de goethita en bajas proporciones.



Figura 14: Desarrollo de alteración argílica moderada sobre lavas andesíticas, presencia de caolinita con coloraciones gris blanquecinas.

M2: Se identificó en la coordenada 769686.751E 9214235.573N zonas con alteración argílica intermedia, presencia de arcillas más masivas, no se observa rasgos visibles de la textura original de la roca, presenta venillas de biotita secundaria.



Figura 15: Desarrollo de alteración argílica moderada - intermedia sobre lavas anaranjadas, desarrollo de venillas de biotita secundaria.

M3: Se identificó en la coordenada 769260.994E 9214175.447N zonas con alteración argílica avanzada, presencia de ensambles cuarzo/alunita como cuerpos masivos resistentes a la erosión.



Figura 16: Desarrollo de alteración argílica avanzada sobre probables flujos piroclásticos y tufos volcánicos, presencia de ensamble cuarzo/alunita.

ZONA 2 (PUNTOS DE IDENTIFICACION M4, M5)

M4: Se identificó en la coordenada 768197.000E 9214160.500N zonas con alteración argílica intermedia sobre derrames lávicos que aún conservan las estructuras almohadilladas, plagioclasas alterándose a caolinita, sericita y montmorillonita, presenta bastante venilleo de biotita secundaria y venillas de cuarzo.



Figura 17: Desarrollo de alteración argílica intermedia sobre lavas andesíticas, presencia de montmorillonita con coloración anaranjadas y caolinita gris blanquecina, desarrollo de venillas de biotita secundaria.



Figura 18: Desarrollo de alteración argílica intermedia sobre lavas andesíticas, presencia de montmorillonita con coloración anaranjadas, desarrollo de venillas de cuarzo oxidado.

M5: Se identificó en la coordenada 767963.410E 9214296.105N zonas con alteración argílica avanzada, presencia de ensambles cuarzo/alunita como cuerpos masivos resistentes a la erosión. Al ser partidos se evidencia la textura obliterada y limonitas.



Figura 19: Desarrollo de alteración argílica avanzada sobre probables flujos piroclásticos y tufos volcánicos, presencia de ensamble cuarzo/alunita con bastantes óxidos de hierro.

ZONA 3 (PUNTOS DE IDENTIFICACION M6, M7)

M6: Se identificó en la coordenada 766851.840E 9214818.648N zonas con alteración argílica intermedia sobre flujos piroclásticos, presencia de montmorillonita, crecimiento de cristales de anhidrita y venillas de óxidos de hierro.



Figura 20: Desarrollo de alteración argílica intermedia sobre flujos piroclásticos, presencia de montmorillonita con coloración anaranjada.



Figura 21: Crecimiento de cristales de anhidrita.

M7: Se identificó en la coordenada 766728.389E 9214898.178N zonas con alteración argílica intermedia, se observan plagioclasas alterándose a caolinita, presenta una coloración gris oscura con presencia de pirita diseminada en la matriz.



Figura 22: Desarrollo de alteración argílica intermedia, presencia de caolinita y pirita diseminada.

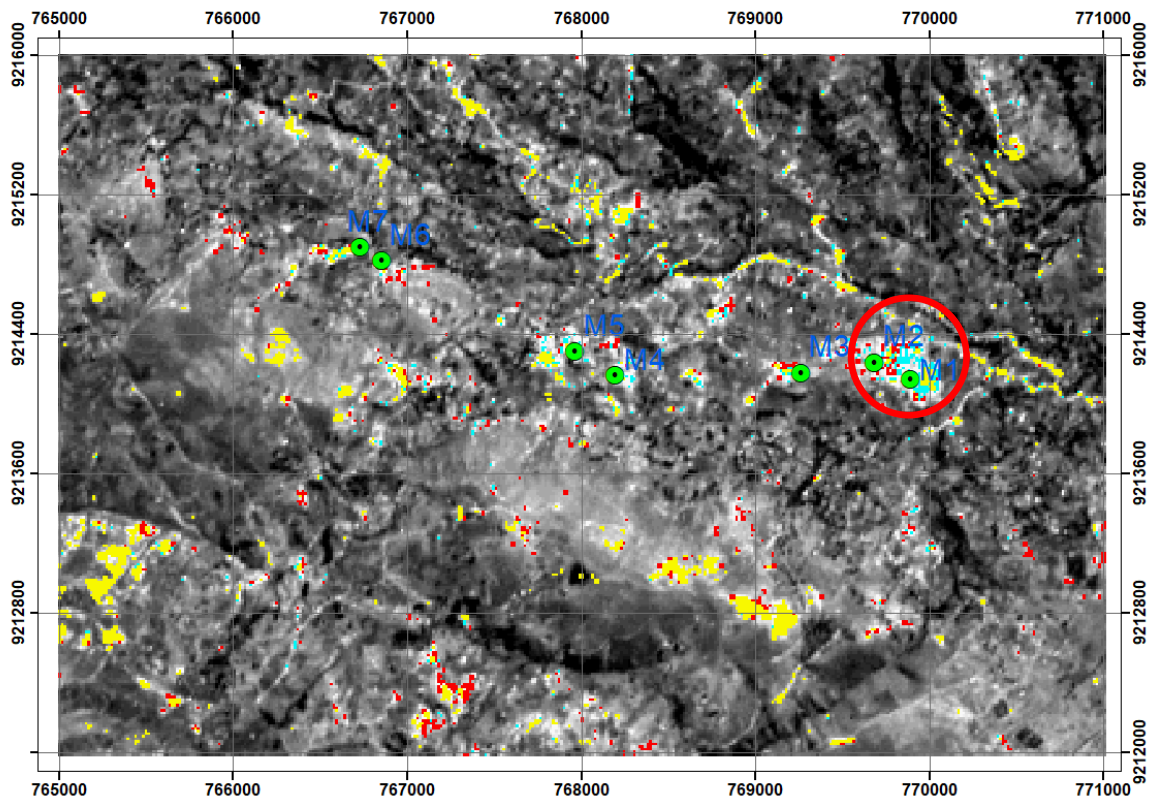


Figura 23: M1 y M2, muestreo rock chip sistemático en trincheras debido a la naturaleza masiva de la alteración argílica intermedia con el ensamble mineralógico caolinita/montmorillonita con pirita diseminada.

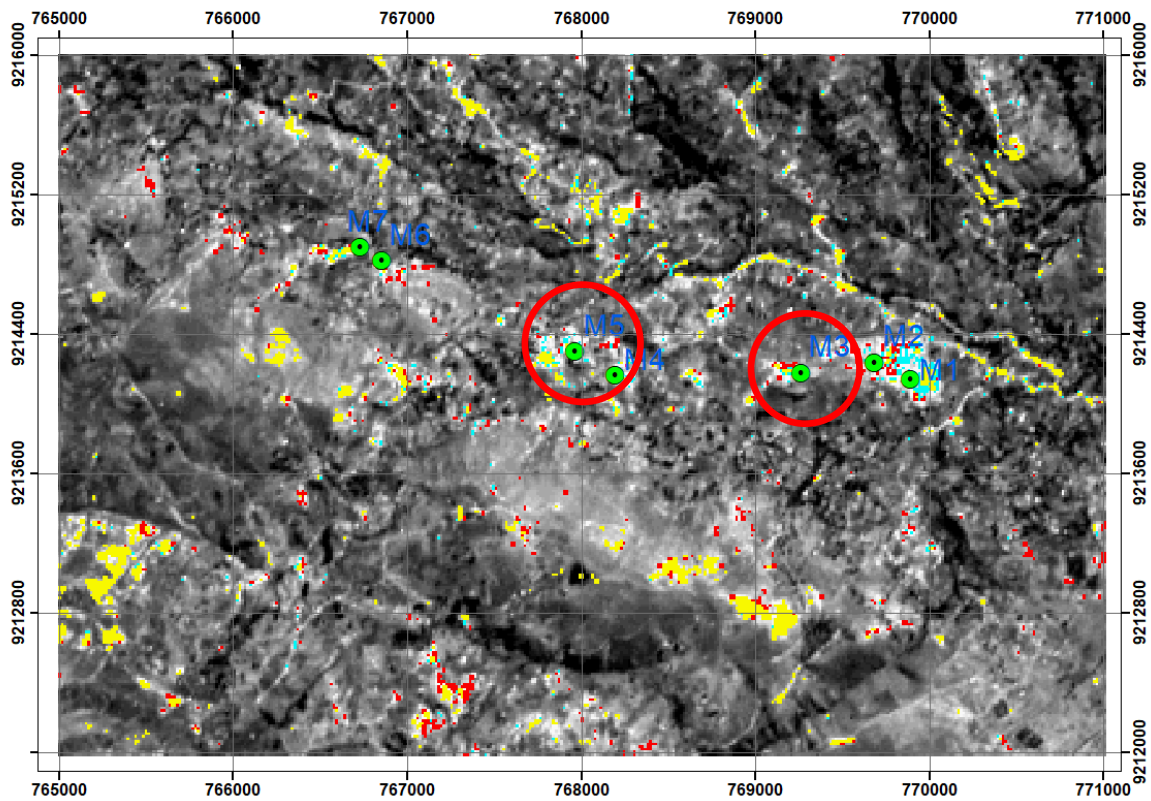


Figura 24: M3 y M5, muestreo tipo rock chip sistemático en trincheras debido a la naturaleza masiva de la alteración argílica avanzada con el ensamble mineralógico cuarzo/alunita.

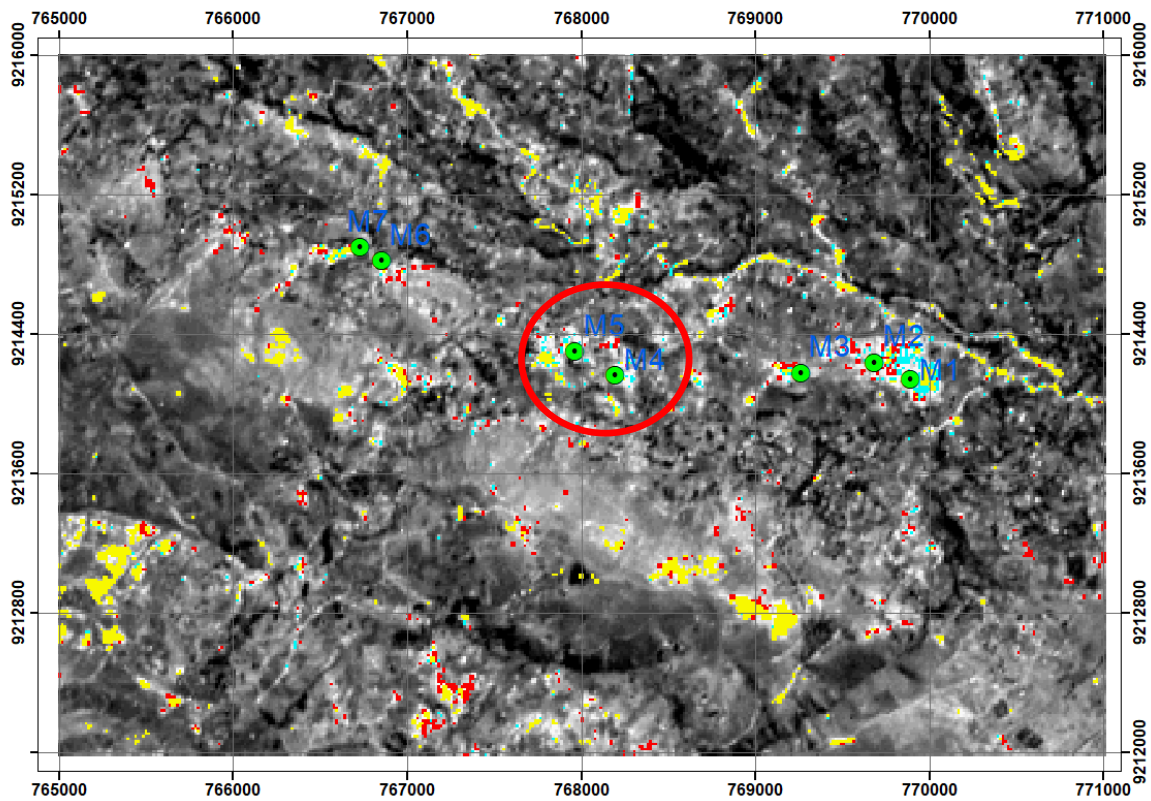


Figura 25: M4 y M5, muestreo tipo chip channel aleatorio en trincheras, perpendicular a las estructuras probablemente mineralizadas como son las venillas de cuarzo oxidado.

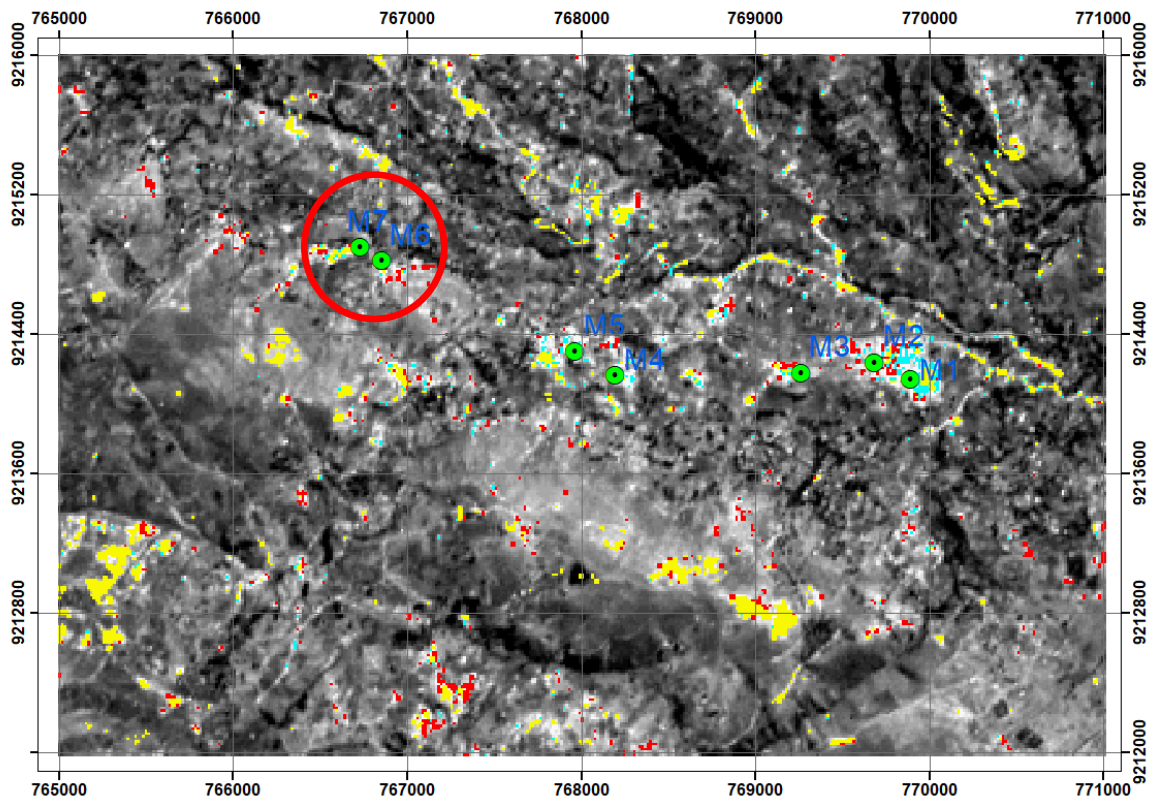


Figura 26: M6 y M7, muestreo rock chip sistemático en trincheras debido a la naturaleza masiva de la alteración argílica intermedia con el ensamble mineralógico caolinita/montmorillonita con pirita diseminada.

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Discusión

Los resultados del análisis espectral determinaron la presencia de minerales de alteración hidrotermal que contienen enlace Al – OH que se presenta mayormente en las arcillas como las del grupo de la caolinita y las montmorillonitas que muestran fuertes absorciones en la longitud de onda de 2.29 um correspondiente a la B6 del sensor ASTER.

Además, se determinó la presencia de firmas espectrales correlacionadas con la alunita que muestran fuertes absorciones en la longitud de onda de 2.1670um correspondiente a la B5 del sensor ASTER.

No se encontraron espectros relacionados a la actividad del ion Fe 3+, (óxidos e hidróxidos de hierro).

Los resultados del mapeo en campo presentan en la zona 1 áreas con alteración argílica moderada, argílica intermedia y argílica avanzada como cuerpos masivos aislados presentando los siguientes ensambles reconocidos en campo:

- Argílica moderada: plagioclasas alterándose a caolinita.
- Argílica intermedia: ensamble caolinita – montmorillonita con presencia de venillas de biotita secundaria, no presenta sulfuros diseminados.
- Argílica avanzada: ensamble cuarzo – alunita, escasa presencia de óxidos de hierro.

En la zona 2 se ha reconocido áreas con brechas hidrotermales con alteración argílica moderada, zonas con alteración argílica intermedia y argílica avanzada como cuerpos masivos aislados presentando los siguientes ensambles reconocidos en campo:

- Brechas hidrotermales (freatomagmáticas), con alteración argílica moderada de la matriz.
- Argílica intermedia: ensamble caolinita – sericita – montmorillonita con presencia de venillas de biotita secundaria y venillas de cuarzo oxidado, no presenta sulfuros diseminados.
- Argílica avanzada: ensamble cuarzo – alunita, con abundante presencia de óxidos de hierro.

En la zona 3 se ha reconocido áreas con alteración argílica intermedia presentando los siguientes ensambles reconocidos en campo:

- Argílica intermedia: ensamble caolinita – montmorillonita con presencia de sulfuros diseminados. En algunas zonas se presenta anhidrita como mineral accesorio.

4.2 Conclusiones

Los datos ASTER permitieron discriminar asociaciones minerales de alteración hidrotermal como son cuarzo/alunita, caolinita/montmorillonita, además no se logró identificar concentraciones anómalas de óxidos de hierro.

El mapeo por el método MTMF nos permitió identificar y cartografiar minerales de alteración hidrotermal para poder identificarlos en campo.

Se puede observar en campo áreas con alteración argílica intermedia (caolinita/montmorillonita) con ocurrencia de sulfuros metálicos como la pirita, además se encuentra bastante venilleo de cuarzo oxidado y biotita secundaria.

La zona estudiada corresponde a áreas concesionadas por minerales metálicos, esto se puede corroborar con los datos del software GEOADMIN.

Los sulfuros diseminados como la pirita están relacionadas a la ocurrencia de caolinita, mientras que las venillas de cuarzo oxidado están relacionados a los ensambles montmorillonita/esmectita.

No se han encontrado evidencias superficiales de sulfuros en los ensambles cuarzo/alunita, pero sin embargo estos ensambles presentan bastante oxidación.

Se utilizaron como endmember firmas espectrales de minerales puros y más abundantes asociados a zonas de alteración hidrotermal y que contengan el enlace Al – OH (montmorillonita, caolinita/esmectita, caolinita, illita, alunita).

Se identificaron los siguientes minerales en la zona correspondiente al volcánico San Pablo: alunita (color rojo), caolinita/esmectita (color amarillo) y montmorillonita (color cian).

Se dividió el área de interés en 3 zonas

- **ZONA 1**

M1: Coordenada 769892.227E 9214138.854N

M2: Coordenada 769686.751E 9214235.573N,

M3: Coordenada 769260.994E 9214175.447N

Realizar un muestreo rock chip sistemático en trincheras

- **ZONA 2 (PUNTOS DE IDENTIFICACIÓN M4, M5)**

M4: Coordenada 768197.000E 9214160.500N

M5: Coordenada 767963.410E 9214296.105N

Realizar muestreo tipo chip Chanel aleatorio en trincheras, perpendicular a las estructuras probablemente mineralizadas.

- **ZONA 3**

M6: Coordenada 766851.840E 9214818.648N

M7: Coordenada 766728.389E 9214898.178N

Realizar muestreo rock chip sistemático en trincheras

4.3 Recomendaciones

- Fomentar este tipo de investigaciones en diferentes áreas de Cajamarca.
- Realizar espectrometría de reflectancia TERRASPEC, para identificar mejor los ensambles mineralógicos, su proporción y abundancia en campo para identificar targets de exploración y validar en campo.

REFERENCIAS

- Arenas C. (2016). *Aplicación de la Teledetección en la exploración geo minera y de recursos naturales. Tesis de la Universidad de Oviedo. España.*
- Azurra, Castro Godoy, Kaku, Kohno, & Marín. (2003). *Procesamiento y productos ASTER del área de Sierra de Famatina, Provincia de La Rioja, República Argentina*
- Díaz Katherine (2012). Análisis de los sistemas Landsat ETM+ y Terra Aster como métodos de prospección de yacimientos minerales. Universidad Internacional de Andalucía. España.
- Gutiérrez C. (1993). *Teledetección geológica. Universidad de Oviedo. España.*
- Lambert Barrientos A. (2010). *Manual de Sondeos sistema de Perforación de Pozos con Corona Diamante.*
- López, MJ. (2002). *Geología Aplicada a la Ingeniería Civil. 2 ed. Editorial Dossat. Madrid. España.*
- Maggi, Bargiela, & Navone. (2009). *Comparación de la aplicación de imágenes ASTER y Landsat 5 TM para el mapeo de carbonatos en la Quebrada de Humahuaca, provincia de Jujuy. Argentina.*

Marchionni & Schalamuk, (2010). *Aplicación de la teledetección espacial óptica y de radar para el análisis geológico y la detección de áreas mineralizadas en el sector central del Macizo del Deseado, Provincia de Santa Cruz.* Revista de la Asociación Geológica Argentina.

Nueva Minería y Energía (2019). *Medición de trayectoria* de pozos de sondaje. Edición N° 10 del 10 de marzo de 2019. Informe preparado por Luis Silva Arrieta, Ingetrol. Chile.

Rowan, L.C., and Mars, J.C., 2003, *Lithologic mapping in the Mountain Pass, California, area using Advanced Spaceborne Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data: Remote Sensing of Environment*, v. 82, p. 350–366.

Silva, AL. (2008). *Informe sobre la tarea de medir variaciones en la dimensión de pozos.* Ingetrol Chile.

ANEXOS

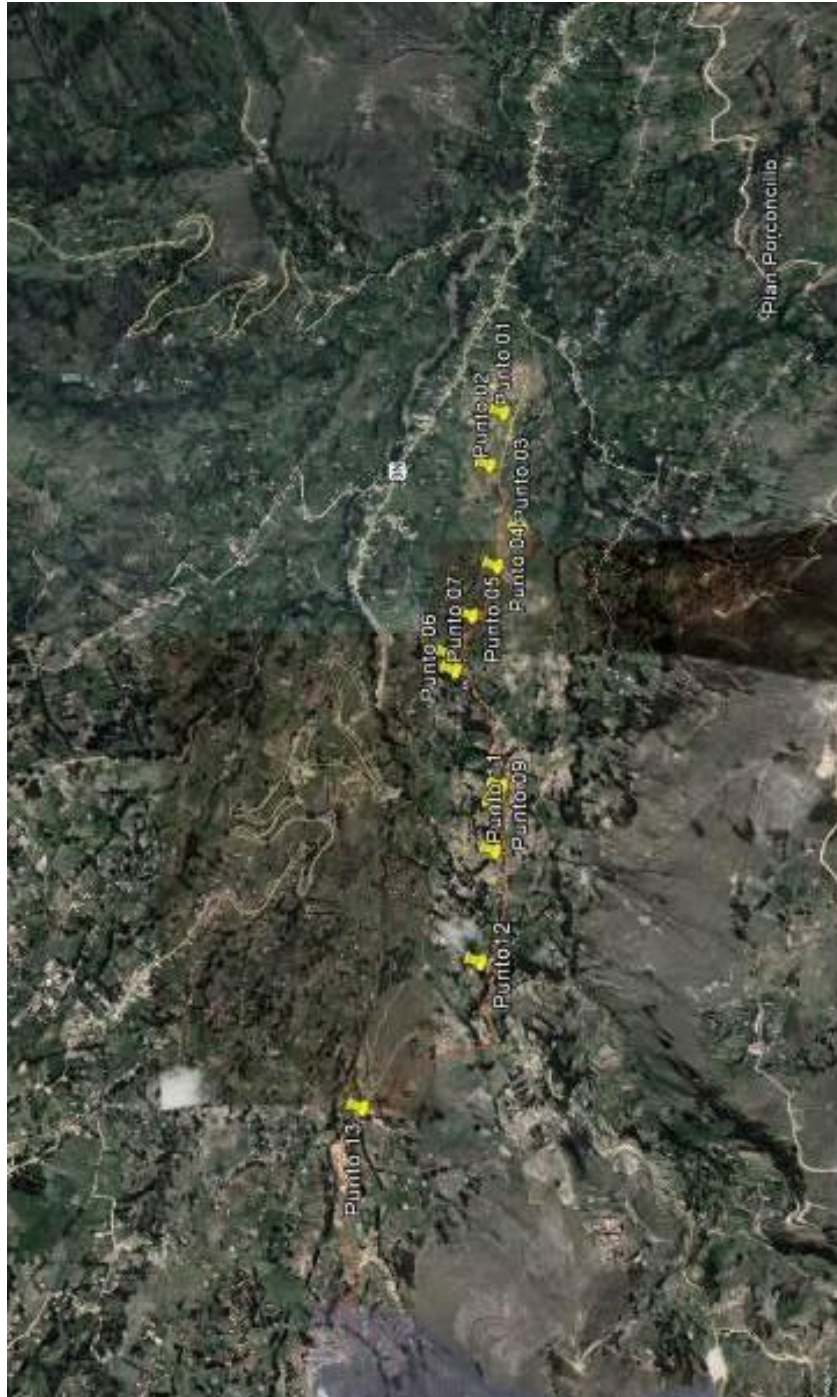


Foto 1. Mapa de la ruta de muestreo zona Plan Porconillo, Cajamarca



Foto 2. Anotando las coordenadas iniciales en la zona de Huambocancha Alta – sector Pencaloma.



Foto 3. Muestreando en el volcánico San Pablo – Alteración argílica/fílica con venillas de biotita



Foto 4. Recolección de datos en campo.



Foto 5. Muestra recolectada de una brecha de origen hidrotermal



Foto 6. Parte de la brecha de origen hidrotermal.



Foto 7 Conglomerado volcánico/Cenizas.



Foto 8. Recolecta de datos de puntos GPS.



Foto 9. Venillas de biotita (Alteración argílica avanzada)



Foto 10: Desarrollo de alteración argílica intermedia sobre lavas andesíticas



Foto 11: Desarrollo de alteración argílica intermedia



Foto 12: Zona de cuarzo alunita