

**UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO  
ABAD DEL CUSCO**

**FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA Y  
GEOGRAFIA**

**CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**



**DETERMINACION DE ZONAS DE ALTERACION  
HIDROTERMAL MEDIANTE IMAGENES ASTER,  
OESTE DE CAJAMARCA.**

Tesis presentada por:  
Bach. Flor Greethel Rodriguez Aycho

Para optar al Título Profesional de:  
INGENIERO GEOLOGO

**CUSCO - PERÚ  
2008**

Auspiciado por:



## **AGRADECIMIENTOS**

---

El presente estudio titulado: "Determinación de Zonas de Alteración Hidrotermal mediante Imágenes ASTER, oeste de Cajamarca", no habría sido posible sin el auspicio del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) por ello expreso mi mayor agradecimiento al Dr. José Macharé Ordoñez, al Presidente del Directorio Dr. Jaime Chavez-Riva, al Secretario General Sr. Mario Huerta y al Director de Geología Regional Dr. Víctor Carlotto Caillaux.

A mis asesores institucionales Ingenieros Pedro Navarro Colque y Jorge Acosta por transmitirme pacientemente sus conocimientos sobre la aplicación de los sensores remotos en la exploración minera.

Al ingeniero Luis Cerpa de la Dirección de Geología Regional por el apoyo brindado en las sugerencias y sustento en campo para este estudio

A la Dirección de Laboratorios representada por la Lic. Vicentina Cruz y al Técnico Juan Urbina, por las facilidades y asistencia en el desarrollo del mismo.

De igual forma hago extensivo este agradecimiento a los profesionales de la Dirección de Recursos Minerales y Energéticos representados por el Dr. Humberto Chirif, a los Ingenieros Jorge Quispe por la asesoría en el muestreo en campo y Teresa Velarde por la asesoría en los estudios de espectrometría.

A mi asesor académico, Ing. José Cárdenas, por las observaciones y sugerencias para llevar a buen término éste trabajo de Tesis.

## **RESUMEN**

La zona de estudio se encuentra en la Cordillera Occidental del los Andes Peruanos y corresponde al cuadrángulo de Chongoyape (14-E) en los cuadrantes I y II, que abarca los distritos de Niepos, Sexi y Llama que pertenecen a las provincias de San Miguel, Santa Cruz y Chota respectivamente, en el departamento de Cajamarca. Estos sitios se encuentran entre los 1900 y 3500 msnm de altitud.

La zona en estudio se encuentra dentro de la gran unidad geomorfológica de la Cordillera Occidental, y localmente presenta geformas como: pisos de valle, laderas, montañas y mesetas.

La estratigrafía de la zona está conformada por unidades que van desde el Mesozoico al Cuaternario. Dentro del Mesozoico comenzando de la base se ubican la Formación Tinajones seguida del Grupo Goyllarisquizga, suprayaciendo a estas se encuentran las formaciones Chúlec, Pariatambo, Pullucana y Quilquiñan, las cuales se caracterizan por presentar material calcáreo y carbonatado. En el Cenozoico, se presenta el Grupo Calipuy que con los nuevos conceptos empleados en lo que se refiere a la distribución de los volcánicos por eventos, centros eruptivos y calderas, para el presente trabajo este grupo se dividen en Volcánicos del Eoceno inferior y Volcánicos del Eoceno superior; finalmente se presentan los depósitos cuaternarios y algunos cuerpos intrusivos.

Estructuralmente predominan los lineamientos con dirección NO-SE pero también existen los de dirección NE-SO y en menor frecuencia los de dirección E-O; aparentemente la zona de estudio es un área neutral que no presenta grandes deformaciones más que las de los sectores adyacentes.

Para determinar las zonas de alteración hidrotermal se usaron imágenes satelitales captadas por el sensor ASTER, que se encuentra a bordo del satélite TERRA. Este sensor posee 3 sub-sistemas: Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR), el Infrarrojo de Onda Corta (SWIR) y el Infrarrojo Termal (TIR), que cuentan con una resolución espectral de 3, 6, y 5 bandas respectivamente y resoluciones espaciales de 15 m, 30 m y 90 m para cada subsistema, superando a otros sensores como es el caso de Landsat. Las imágenes

ASTER al gozar de mayor cobertura espectral, permiten la diferenciación de arcillas y minerales típicos que se encuentran en las zonas de alteración.

Las imágenes fueron procesadas utilizando el software ENVI, fueron analizadas por diferentes técnicas que nos dieron las zonas de alteración y la clasificación por minerales con las que se consigue varias áreas de interés, las mismas que fueron validadas en campo mediante la creación de una librería espectral a partir de las muestras recolectadas haciendo uso del PIMA, instrumento que sirve para identificar las firmas espectrales de minerales. Con este ajuste se volvieron a procesar las imágenes validando las técnicas de Análisis de Principales Componentes y Afinamiento por Filtración Emparejada como las que más se aproximan en la determinación de zonas de alteración hidrotermal y la clasificación por minerales respectivamente.

Con estos resultados se logró el mapa de alteraciones obteniendo las siguientes áreas de interés: Cerro Señal pongo la Mesa, Cerro Las Astillas, Cerro Los Pircos y Cerro La Fila; resaltando principalmente alteraciones acida o argílicas y minerales como alunita, caolinita, esmectita, illita, sericita.

*DEDICATORIA*

*A MIS DOS GRANDES EJEMPLOS DE PROFESIONALES Y GRANDES PERSONAS  
MIS PADRE JULIO Y FLOR, QUIENES ME INCULCARON LOS VALORES DE LA  
VIDA Y A QUIENES LES DEBO Y AGRADEZCO LO QUE SOY.*

*A MIS HERMANAS SHIRLEY Y STEFANNY, QUIENES SIEMPRE CONFIARON EN  
MI Y SON MIS GRANDES APOYOS.*

*A ARTURO QUIEN FUE UN GRAN APOYO DURANTE ESTA ETAPA.*

## **CONTENIDO**

### **CAPÍTULO I INTRODUCCION**

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2. HIPOTESIS	2
1.3. OBJETIVO	2
1.4. METODOLOGIA DE TRABAJO	2
1.5. TRABAJOS ANTERIORES	4
1.6. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	5
1.7. ACCESIBILIDAD	5
1.8. CLIMA	5

### **CAPITULO II GEOMORFOLOGIA**

2.1. GEOMORFOLOGIA REGIONAL	7
2.2. GEOMORFOLOGIA LOCAL	7
2.2.1. Piso de valle	7
2.2.2. Laderas	8
2.2.3. Meseta	9
2.2.4. Montañas	9

### **CAPITULO III GEOLOGIA GENERAL**

3.1. ESTRATIGRAFIA	12
3.1.1. MESOZOICO	13
3.1.1.1. Formación Tinajones	13
3.1.1.2. Grupo Goyllarisquizga	13
3.1.1.3. Formación Chúlec	15
3.1.1.4. Formación Pariatambo	15
3.1.1.5. Grupo Pulluicana	15
3.1.1.6 Grupo Quilquiña	15
3.1.2. CENOZOICO	16

3.1.2.1. Grupo Calipuy	16
3.1.2.2. Volcánicos Eoceno inferior (Llama)	17
3.1.2.3. Volcánicos Eoceno superior (Huambos)	17
3.1.3. DEPÓSITOS CUATERNARIOS	18
3.1.4. ROCAS INTRUSIVAS	18
3.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	21
3.3.1. Lineamientos	21
3.3.2. Lineamientos NO-SE	22
3.3.3. Lineamientos NE-SO	24
3.3.4. Lineamientos E-O	24
3.3.5. Lineamientos circulares	25

## **CAPITULO IV PRINCIPIOS BASICOS EN LA INTERPRETACION DE IMÁGENES DE SATELITE**

4.1. INTRODUCCION	28
4.2. EL ESPECTRO ELECTROMAGNETICO	29
4.3. EFECTOS ATMOSFERICOS	31
4.3.1. ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA	31
4.4. INTRODUCCION AL SENSOR ASTER	32
4.4.1. Características del ASTER	33
4.4.2. Resolución	34
4.4.2.1 Resolución espacial	34
4.4.2.2. Resolución radiométrica	34
4.4.2.3. Resolución temporal	34
4.4.2.4. Resolución espectral	34
4.4.3. Subsistema Infrarrojo visible y cercano (VNIR)	35
4.4.4. Subsistema Infrarrojo de onda corta (SWIR)	36
4.4.5. Subsistema Termal de la onda corta (TIR)	36
4.4.6. Nivel de data	38
4.4.6.1. Nivel 1A	38
4.4.6.2. Nivel 1B	39
4.4.6.3. Nivel 3A	40

## **CAPÍTULO V: PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES ASTER**

5.1. CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA	43
5.2. COMBINACION DE BANDAS	43
5.3. RATIOS O COCIENTES DE BANDAS	49
5.3.1. Cociente 4/6	49
5.3.2. Cociente 5/6	50
5.3.3. Cociente 5/8	50
5.3.4. Combinación de cocientes	51
5.4. ANALISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (PCA)	53
5.4.1. Componente 1467 (Cuadro 5.1.)	53
5.4.2. Componente 1356 (Cuadro 5.2.)	54
5.4.3 Componente 1358 (Cuadro 5.3.)	54
5.5. MAPEO POR EL ANGULO ESPECTRAL (SAM)	56
5.6. AFINAMIENTO DE FILTRACIÓN EMPAREJADA (MTMF)	58
5.7. CARACTERISTICA FILTRADO ESPECTRAL (SFF)	60

## **CAPITULOVI: INTERPRETACION DE LAS ZONAS DE ALTERACION HIDROTERMAL**

6.1. INTRODUCCIÓN	62
6.2. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL ESPECTROMETRO PORTATIL INFRARROJO DE ONDA CORTA (PIMA)	62
6.3. ANÁLISIS DE REFLECTANCIA ESPECTRAL DE LAS ROCAS, MEDIANTE PIMA	64
6.4. MINERALES DE ALTERACIÓN HIDROTERMAL QUE CONTRIBUYEN EN LA REFLECTANCIA DE LAS ROCAS ALTERADAS	66
6.4.1. Alunita [K Al (OH) <sub>6</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ]	67
6.4.2. Caolinita [Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> ]	67
6.4.3. Esmeclita [(Na, Ca) <sub>3</sub> (Al, Mg) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> .nH <sub>2</sub> O]	68
6.4.4. Sericita [K Al <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al) O <sub>10</sub> (OH,Fe) <sub>2</sub> ]	69

6.4.5. Clorita [Mg, Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup> ) <sub>6</sub> AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub> ]	69
6.4.6. Epidota [Ca <sub>2</sub> (Fe <sup>3+</sup> , Al) (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH)]	69
6.4.7. Illita [K <sub>2</sub> Al <sub>4</sub> (Si <sub>7</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>2</sub> n(OH) <sub>4</sub> )]	70
6.5. INTERPRETACIÓN ESPECTRAL DE ALTERACIONES HIDROTERMALES	70
6.6. ÁREAS QUE PRESENTAN ALTERACIÓN HIDROTERMAL	71
6.6.1. Cerro Señal Pongo La Mesa	
6.6.2. Cerro Las Astillas	
6.6.3. Cerro Los Pircos	
6.6.4. Cerro La Fila	

## **CONCLUSIONES**

## **RECOMENDACIONES**

## **REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

## **GLOSARIO**

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCION**

---

#### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En la zona de estudio existen muchos estudios relacionados a la geología y puntualmente estudios de exploración minera. Por encontrarse el metalotecto del Grupo Calipuy en casi la totalidad del área de estudio y con una topografía muy accidentada, se plantea la utilización de una herramienta de percepción remota, relacionada a la determinación de zonas de alteración hidrotermal por medio del análisis y procesamiento de las imágenes satelitales.

En los últimos años, la teledetección se ha configurado como una herramienta de indudable valor para el estudio de la superficie terrestre, uno de estos sensores es el Radiómetro Espacial Avanzado de Reflexión y de Emisión Termal (ASTER), este sensor se encuentra en la plataforma del satélite TERRA y corresponde a un sensor satelital de imágenes multiespectrales de alta resolución, que permite la observación y captación de información de la superficie terrestre en un amplio rango espectral que va desde el visible hasta el infrarrojo del espectro electromagnético, mediante sus subsistemas. Este sensor tiene 3 subsistemas que registran datos simultáneamente que son: visible e infrarrojo cercano de tres bandas (VNIR), infrarrojo de la onda corta (SWIR) de seis bandas y el infrarrojo termal (TIR) de cinco bandas.

Son varios los sensores que son empleados en la determinación de áreas de alteración hidrotermal, como es el caso del LANDSAT TM, pero la cualidad del sensor ASTER está en su resolución espectral con la que puede mapear zonas de alteración e incluso clasificar minerales mediante diferentes métodos o técnicas, las cuales son aplicadas con software creados exclusivamente para el análisis y procesamiento de imágenes satelitales como es el caso de ENVI, las que serán validadas en la presente tesis.

El Espectrómetro Portátil Infrarrojo de Onda Corta (PIMA, siglas del inglés Portable Infrared Minerales Analyzer) es otra valiosa herramienta, utilizada para determinar la mineralogía de rocas alteradas y minerales en general, que no pueden ser distinguidos a simple vista; servirá de ayuda en la clasificación de los sistemas de mineralización para llegar a identificar con precisión las zonas de alteración hidrotermal.

## **1.2. HIPOTESIS**

Debido a las características estratigráficas y estructurales del Grupo Calipuy es probable que presente zonas de alteración hidrotermal o mejor aún prospectables en la parte oeste de la región de Cajamarca.

## **1.3. OBJETIVO**

El objetivo general es:

- Determinar zonas de alteración hidrotermal mediante el uso de las firmas espectrales provenientes de las imágenes ASTER.

Los objetivos específicos son:

- Compilar una base de datos espectrales de las diferentes litologías presentes.
- Validar las técnicas aplicables para la clasificación de minerales en la búsqueda de yacimientos magmáticos hidrotermales.
- Determinar posibles zonas de alteración hidrotermal o prospectables.

#### **1.4. METODOLOGIA DE TRABAJO**

Se realizó la compilación de información científica relacionada a la geología del área de estudio y a la teledetección principalmente del sensor ASTER, cuyo número de bandas que posee es mayor al de otros sensores y están estratégicamente distribuidas en comparación a las imágenes LANDSAT TM, por lo tanto se puede separar información espectral como el de las arcillas y otros minerales que se encuentran presentes en las distintas etapas o zonas de alteración hidrotermal.

El área de estudio está comprendida en dos escenas o imágenes satelitales identificados por códigos que indican las fechas de toma y el nivel de información de la imagen: AST\_L1B\_00304292005153906 y AST\_L1B\_00304292005153857, que fueron tomadas el 29 de abril del 2005. Para poder realizar el análisis se deberán realizar correcciones o calibraciones con las cuales se obtendrán información con mayor precisión. Las imágenes fueron obtenidas con una data de nivel 1B, las cuales fueron tratadas mediante el software SILCAST, quedando la información en el nivel 3A.

Luego de las correcciones tanto como geométricas atmosféricas, se procede con el análisis de las imágenes para obtener las zonas con probable alteración hidrotermal, esto mediante el software ENVI 4.2, utilizando para el análisis e interpretación de las escenas las siguientes técnicas:

- Combinaciones de Bandas.
- Cocientes o Ratios de Bandas.
- Análisis de Principales Componentes (PCA).
- Mapeo por Angulo Espectral (SAM).
- Afinamiento de Filtración Emparejada (MTMF).
- Ajuste de Características Espectrales (SFF).

Además se utilizó los modelos de elevación digital (DEM's) de las imágenes para trazar lineamientos, mediante el uso de las técnicas de modelos de sombras (Shade Relief) y el de pendientes (Aspect).

Para la etapa de validación se realizó el muestreo sistemático en las zonas determinadas previamente en gabinete, las cuales fueron analizadas mediante el PIMA, obteniendo una base de datos espectral. Dichos resultados se utilizan en la nueva librería espectral, con la que se calibra los datos de las imágenes a nivel digital de cada píxel. Los Mapas finales se realizaron con el software ArcGis versión 9.1.

## **1.5. TRABAJOS ANTERIORES**

Para la zona de estudio no se tiene estudios desarrollados en lo que respecta al análisis de imágenes satelitales, sin embargo, en cuanto a estudios geológicos el uso de imágenes satelitales para la determinación de anomalías es una herramienta utilizada mucho en estos días. Servicios geológicos de otros países, así como empresas privadas de exploración realizan estos estudios y desarrollan métodos adecuados a la geografía de cada país o región.

Existen trabajos relacionadas al análisis espectral de alteraciones hidrotermales mediante imágenes del satélite Landsat en el sur del territorio peruano:

- **Acosta, J. (1999).** Correlación de Imágenes Landsat y Espectrometría con Alteraciones hidrotermales del Pórfido de cobre de Quellaveco. En este trabajo se concluye que las imágenes Landsat TM son útiles para la exploración de nuevos depósitos sin embargo no es capaz de discriminar minerales hidroxilados de alteración hidrotermal por su baja resolución espectral en las bandas 5 y 7.
- **Marquetti, C. et al. (2005).** Detección de Áreas de Alteración Hidrotermal en el Distrito Minero Farallón Negro, Catamarca-Argentina. Mediante el uso de las imágenes del sensor ASTER, se confirma la delimitación de zonas de alteración, para después clasificarlos por minerales mediante los índices y módulos de software utilizados en el procesamiento de imágenes satelitales.
- **Di Tommaso I. et al. (2004).** Mapeo de alteración Hidrotermal a partir de Datos ASTER en el Pórfido de Cu-Mo El Infiernillo, Mendoza-Argentina. En este trabajo de investigación, se logran discriminar notoriamente halos de alteración

argílica y el núcleo rico en hematita mediante el uso de formulas que resaltan las características de los enlaces Al-OH, Fe-OH y la división de bandas.

## **1.6. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

El área de estudio abarca los cuadrantes I y II del cuadrángulo de Chongoyape (14-e) (Fig. 1.1.) ubicados en la zona 17; enmarcados entre las coordenadas geográficas siguientes:

Latitud	6°00'00''S y 6°30'00''S
Longitud	79°00'00''O y 79°15'00''O

Comprende los distritos de Niepos, Sexi y Llama que pertenecen a las provincias de San Miguel, Santa Cruz y Chota respectivamente, en el departamento de Cajamarca.

## **1.7. ACCESIBILIDAD**

Las principales vías de acceso para llegar a la zona de estudio son: por la Carretera Panamericana Norte hasta la divisoria entre los departamentos de La Libertad y Cajamarca, continuando por la carretera asfaltada hacia Tembladera y los ramales de El Prado-Niepos-La Florida (Fig. 1.1.). Se continúa por las trochas Udima-Sexi-Llama.

Otro acceso es mediante la carretera asfaltada Chiclayo-La Puntilla-Chongoyape, continuando por las carreteras afirmadas Chongoyape-Cumbil-Llama (Fig. 1.1.).

## **1.8. CLIMA**

Son muchos los fenómenos que influyen en la determinación del clima para cada región; en la zona de estudio los principales factores que condicionan el clima son la Cordillera de los Andes estableciendo una barrera de circulación de los vientos, la Corriente Oceánica Peruana, con masas de agua fría y la Contracorriente Oceánica de El Niño, con masas de agua cálida, que circula de norte a sur, estos condicionan un clima templado a frío hacia la sierra entre las altitudes de 1000 a 3600 m en la zona de estudio.

El clima se caracteriza por presentar temperaturas mínimas con un promedio anual de 11°C y las máximas de 23°C para la zona templada, mientras que en las zonas altas o de sierra descende hasta los 9° y la máxima llega a los 19°C. En la zona de estudio se presenta un periodo de lluvias entre los meses de diciembre a abril y otro periodo de estiaje de mayo a noviembre.

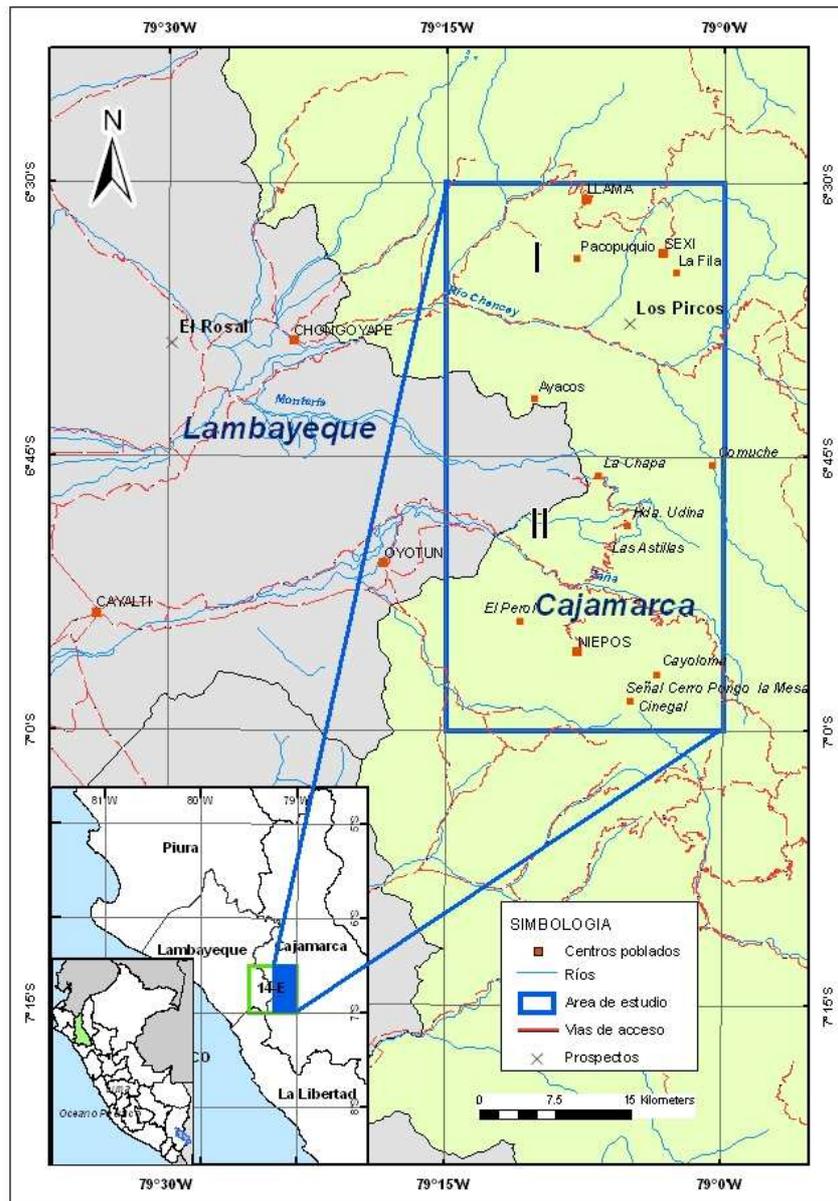


Fig. 1.1. Mapa de ubicación y accesibilidad.

## **CAPITULO II**

### **GEOMORFOLOGIA**

---

#### **2.1. GEOMORFOLOGIA REGIONAL**

Regionalmente la zona de estudio se encuentra dentro de la unidad geomorfológica Cordillera Occidental.

#### **2.2. GEOMORFOLOGIA LOCAL**

En el área de estudio se identificaron las geoformas locales siguientes: piso de valle, mesetas y montañas (Figs. 2.1. y 2.2). Estas unidades se encuentran entre los 300 y 3600 msnm de altitud, que a continuación se describen.

##### **2.2.1. Piso de valle**

Esta unidad morfológica se aprecia en las partes terminales de los valles de los ríos Zaña y Chancay (Foto 2.1.) que discurren en dirección E-O, que se extiende hacia la costa. Son extensiones de relieve suave casi plano, cuyas pendientes son menor a 1 grado, por donde discurren las aguas de los valles, las cuales han ido erosionando y formando este tipo de morfología.



Foto 2.1. Piso de Valle El Espinal, aprovechado en la agricultura.

### **2.2.2. Laderas**

En la zona de estudio esta morfología se presenta en el cambio de costa a sierra y se caracterizan por tener pendiente moderada a fuerte ( $25^\circ$  a  $70^\circ$ ) (Foto 2.2.). También se reconocen estas unidades entre los pisos de valle y las grandes montañas. La topografía accidentada con pendientes favorece a los procesos erosivos de las laderas.



Foto 2.2. Ladera de pendiente moderada, Comuche (Santa Cruz).

### **2.2.3. Meseta**

Se identificó una meseta al noreste del área en estudio, entre las localidades de Sexi y Atumpampa (Foto 2.3.). Esta planicie con laderas de pendiente media ( $10^{\circ}$  a  $15^{\circ}$ ), se encuentra entre los 2000 y 2500 msnm y está cortada por algunas quebradas.



Foto 2.3. Meseta volcánica, tomada del Cerro La Fila (Sexi), vista al norte.

### **2.2.4. Montañas**

Esta unidad se reconoce hacia el lado este del área de estudio y es parte de la Cordillera Occidental de los Andes del norte del Perú, con altitudes entre los 2000 y 3600 msnm; consta de un macizo no tan elevado en comparación con el resto de la cordillera (Foto 2.4.).

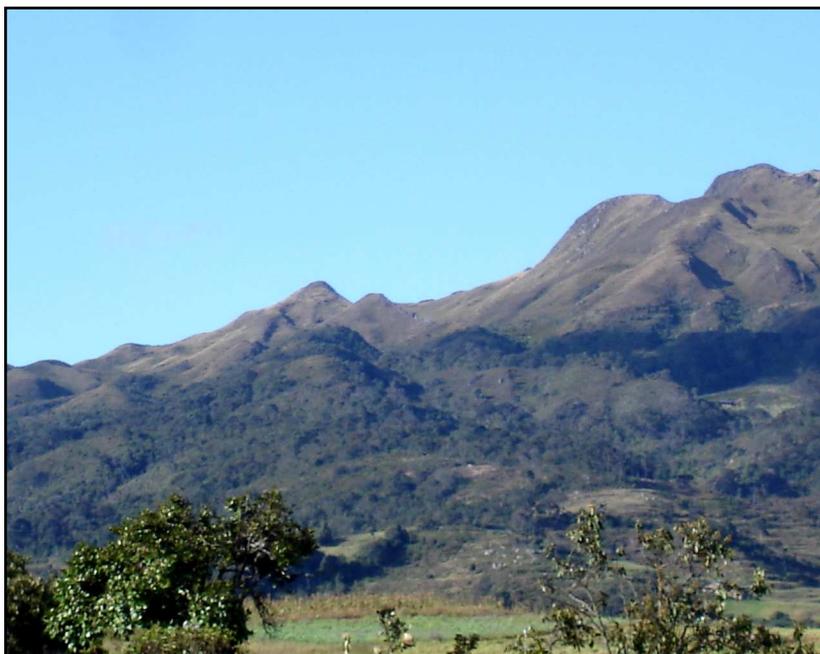
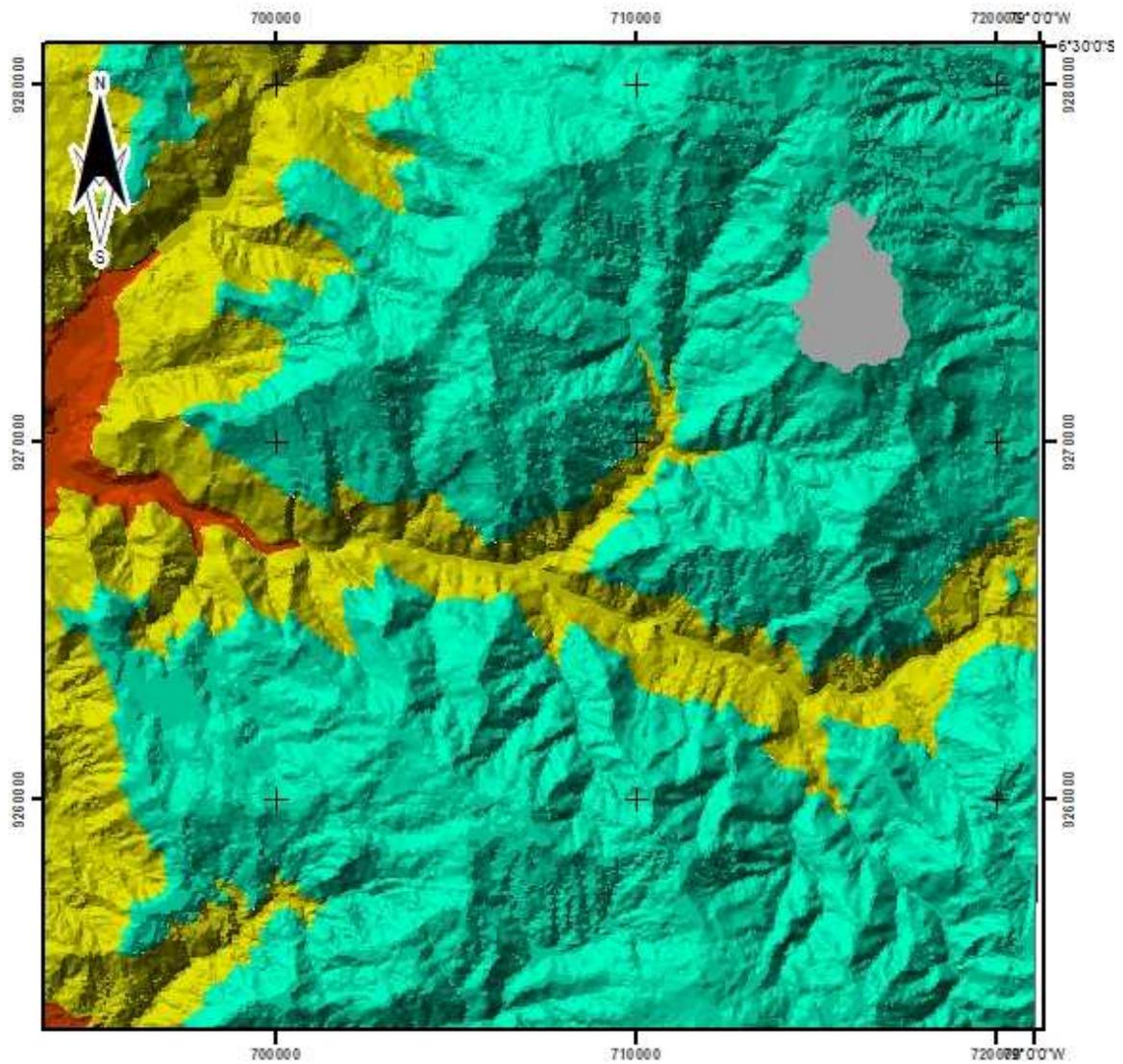
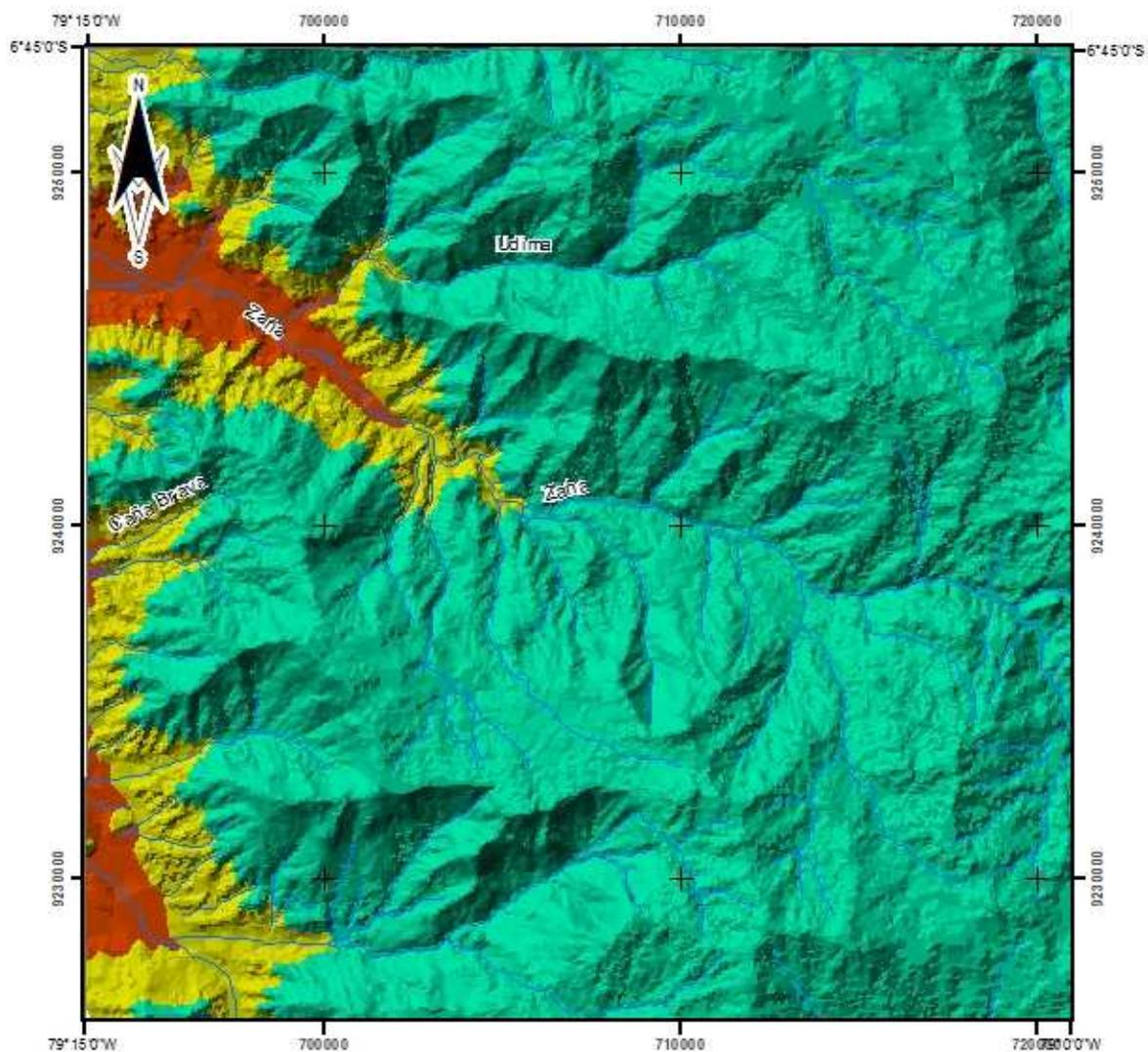


Foto 2.4. Vista panorámica del Cerro Negro que representa las montañas (Udima).



 UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAAD DEL CUSCO		
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA		
ANALISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	Escala: 1:500.000	Zona: II
Rech.: FLOR GREETHEL RODRIGUEZ AYCHO	Fecha: 20 de 2008	Plan: 2+

Leyenda	
Unidades Geomorfológicas	
	Montañas
	Laderas
	Rascas/Valle
	Lake



 UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAAD DEL CUZCO		
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA		
ANALISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	Escala: 1:200 000	Zona: II
Doc.: FLOR GREETHEL RODRIGUEZ AYCHO	Fecha: 04/2004	Plan: 2.2

Leyenda	
Unidades Geomorfologicas	
	Llanuras
	Laderas
	Rasca/lluvia
	Nevado

## **CAPITULO III**

### **GEOLOGIA GENERAL**

---

En el área de estudio mayormente afloran los volcánicos del Grupo Calipuy (Cossio, 1964), que Wilson (1985) las divide en tres formaciones y que se emplazan entre 53 y 14 Ma (Eoceno-Mioceno). Estas rocas volcánicas son de gran importancia ya que en estos se emplazaron los grandes yacimientos metálicos del país, principalmente los depósitos del tipo epitermal de alta y baja sulfuración y zonas de alteración hidrotermal (Navarro, 2006). Dentro de la zona de estudio se encuentra el proyecto minero Los Pircos que es un depósito epitermal de baja sulfuración.

El presente estudio se ha realizado dentro del proyecto GR-04 “Volcanismo Cenozoico (Grupo Calipuy) y su asociación con yacimientos epitermales, Norte del Perú”, que tiene como objetivo reconocer y caracterizar los centros eruptivos de emisión; así como establecer la estratigrafía y evolución volcánica, las relaciones espaciales y petrogenéticas de emplazamiento y su relación con la formación de yacimientos minerales.

#### **3.1. ESTRATIGRAFIA**

La estratigrafía de la zona está conformada por unidades que van desde el Mesozoico al Cuaternario (Figs. 3.1., 3.2. y 3.3.). En el Mesozoico se tienen principalmente rocas sedimentarias, con algunas intercalaciones de algunas rocas volcánicas, representados por las formaciones Tinajones, Chúlec, Pariatambo y los grupos Goyllarisquizga,

Pulluicana y Quilquiñan que están constituidas por la intercalación de areniscas, lutitas y calizas.

En el Cenozoico domina el Grupo Calipuy que se divide en Volcánico Huambo, Llama y Porculla (Wilson, 1985) y se encuentran en discordancia angular sobre unidades del Mesozoico. El Grupo Calipuy abarca la mayor parte del área de estudio y para efectos del presente trabajo se describen a los volcánicos del Grupo Calipuy, según sus edades de emplazamiento. Cubriendo las unidades anteriormente mencionadas se tienen los depósitos cuaternarios (Fig.3.1.).

### 3.1.1. MESOZOICO

#### **3.1.1.1. Formación Tinajones**

Esta formación aflora al noroeste de la zona de estudio, en el sector de Cumbil (Fig. 3.3). Esta unidad está bien estratificada en capas delgadas a medianas, constituida por una intercalación de lutitas oscuras fisibles y areniscas de color gris. Pardo, A. refiere que esta formación se encuentra en discordancia paralela o ligeramente angular sobre los volcánicos Oyotún (en Wilson, 1985). Se identificaron restos fósiles de *Berriasellidae* del Titoniano pertenecientes al Jurásico superior

#### **3.1.1.2. Grupo Goyllarisquizga**

Asignado como grupo por Wilson (1963), y se subdivide en cuatro formaciones: Chimú, Santa, Carhuaz y Farrat. En la zona de estudio resulta imposible reconocer las secuencias de este grupo (Monge, com. verbal).

Este grupo se reconoce en los cerros Maichil y Catache (Figs. 3.2. y 3.3), donde a la base afloran bancos de areniscas cuarzosas mientras que en la parte intermedia presenta intercalaciones de arenisca cuarzosa con limolitas, hacia el techo las capas de limolitas son de mayor espesor. La edad del Grupo Goyllarisquizga se encuentra entre el Valanginiano y Albiano en base a ammonites (Rivera, 1951).

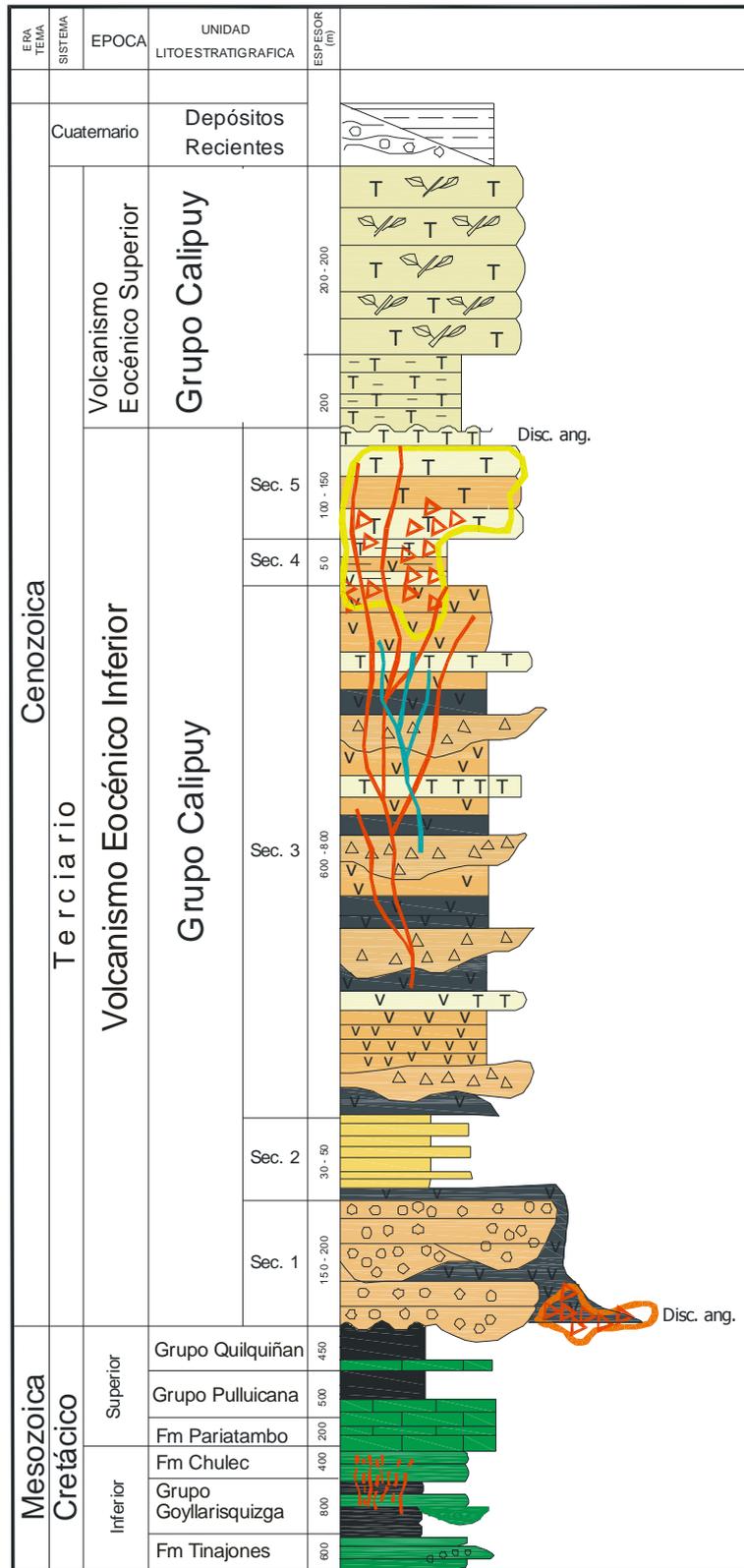


Fig. 3.1. Columna estratigráfica de zona de estudio (modificado de Enriquez, J., 2004).

### **3.1.1.3. Formación Chúlec**

Esta formación se reconoció cerca de la localidad de Catache (Fig. 3.3.). Suprayace al Grupo Goyllarisquizga e infrayace a la Formación Pariatambo. Su litología está representada por calizas. Presenta fauna del Albiano superior por lo que se le atribuye al Cretácico inferior (Benavides, 1956).

### **3.1.1.4. Formación Pariatambo**

Aflora al oeste de la zona en estudio, entre las localidades de Llama y Cumbil (Figs. 3.2. y 3.3.). Se encuentra sobreyaciendo a la Formación Chúlec. Representada litológicamente por calizas de 5 a 10 cm de espesor, presenta intercalaciones de calizas mudstone a packstone y limolita de color gris oscuro. Se encontró fauna que está representada por especies de ammonites que indican una edad Albiano superior (Wilson, 1985) que pertenecen al límite entre el Cretácico inferior-superior.

### **3.1.1.5. Grupo Pulluicana**

Aflora en los alrededores del cerro El Pajonal (Figs. 3.3.), sobreyace a la Formación Pariatambo. Su litología está representada por materiales carbonatados como son mudstone y packstone, con niveles lenticulares a nodulares de lutitas. La edad asignada a esta formación es del Albiano medio al Cenomaniano (Benavides, 1956).

### **3.1.1.6 Grupo Quilquiñan**

Se presenta en los alrededores de la localidad de Llama (Fig. 3.2.) y suprayace al Grupo Pulluicana. Litológicamente presenta lutitas friables gris oscuras. Datada por Benavides (1956) mediante ammonites en el intervalo Cenomaniano al Turoniano (en Wilson 1985).

### 3.1.2. CENOZOICO

#### 3.1.2.1. Grupo Calipuy

Ha sido reconocido y mapeado en grandes extensiones territoriales en el Perú central y septentrional por varios autores. Este grupo se subdivide en los volcánicos Llama, Porculla y Huambos, para el área de Chongoyape y Chepen (Wilson, 1985); mientras que para el área de Cajamarca subdividen a este grupo en los volcánicos Tembladera, Chilete y San Pablo (Reyes, 1980), surgiendo inconvenientes para nombrarlos y diferenciarlos.

Este grupo aflora en la mayor parte del área de estudio (Figs. 3.2. y 3.3.) y está constituido por secuencias volcánicas y volcano-sedimentarias, sobreyacen en discordancia angular a las formaciones silico-clásticas y carbonatadas del Mesozoico (Foto 3.1.).

Para efectos del presente estudio se ha considerado la estratigrafía del Grupo Calipuy a partir de la reconstrucción de centros de emisión, para relacionar a cada uno de ellos sus respectivos productos volcánicos, por lo cual se divide en Volcánicos del Eoceno inferior y Volcánicos del Eoceno superior, que podrían corresponder a las formaciones Llama y Huambos respectivamente.

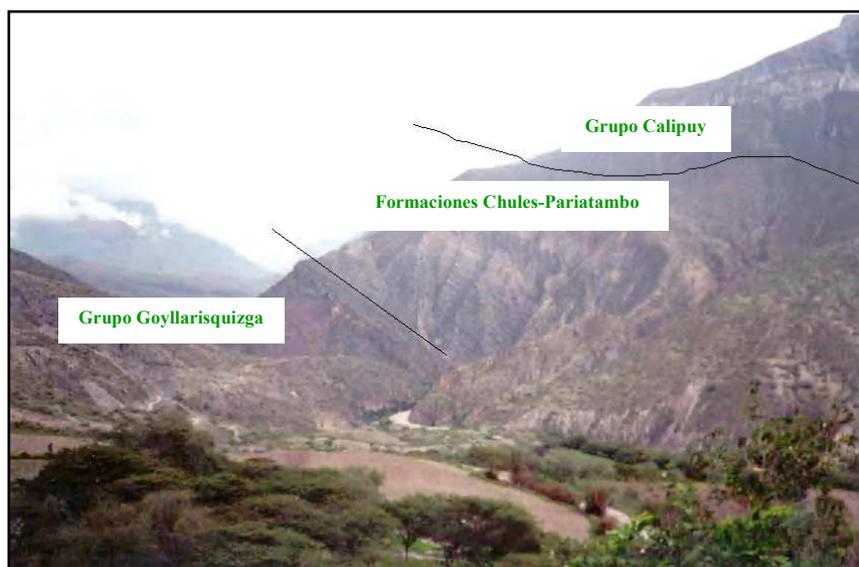


Foto 3.1. Secuencias de las formaciones Chulec Pariatambo y grupos Goyllarizquizga y Calipuy, en la margen derecha del río Chancay.

### **3.1.2.2. Volcánicos Eoceno inferior (Llama)**

Este emplazamiento corresponde a la parte basal del volcanismo Calipuy y afloran en las localidades de Zorin, El Perol, Llama y Cerros Pongo la Mesa y Pajonal (Figs. 3.2. y 3.3.). Estos volcánicos se encuentran sobreyaciendo en discordancia angular a las unidades mesozoicas (Grupos Pulluicana y Quilquiñan). Están constituidos por depósitos de flujos piroclásticos y lavas andesíticas, principalmente de flujos de cenizas y líticos e intercalaciones de flujos de cenizas y flujos de cristales de cuarzo, estos son característicos en la zona de El Perol, mientras que en los alrededores de la localidad de Llama predominan los flujos de ceniza y flujos de cristales de cuarzo y biotita. Su espesor varía de 800 a 1000 m. Al este del Perol, este volcánico es cortado por un intrusivo de composición granodiorítica.

El Volcánico Eoceno inferior se inicia a partir de los 55 Ma hasta los 42 Ma (Fase Inca I), en el cual hay una interrupción de este evento volcánico, para dar inicio al evento tectónico de la Fase Inca II. Dataciones sobre plagioclasas de las rocas volcánicas en las coordenadas UTM: 9278550N-707712E y 9278558N-707703E, dan una edad de  $55 \pm 2$  Ma, mediante el método de K/Ar (Noble et al., 1990).

### **3.1.2.3. Volcánicos Eoceno superior (Huambos)**

Estos volcánicos suprayacen en discordancia angular a los volcánicos del Eoceno inferior. Se encuentran ubicados en las localidades de Sexi (Foto 2.2.), Atumpampa y Las Astillas (Figs. 2.2. y 2.3.).

Litológicamente están conformados por intercalaciones de flujos de cenizas y pómez, flujos de líticos y cristales. El espesor varía aproximadamente de 50 m a 100 m.

Este volcanismo se da a comienzos de la Fase Inca II, con edades aproximadamente entre 42 Ma y 33 Ma. En la zona de estudio se tienen dos dataciones en sanidina en los puntos de coordenadas UTM: 9277978N-712504E y 9279823N-714346E mediante los métodos de K/Ar y Ar/Ar, que dan una edad de 39 Ma y 36 Ma (Noble et al., 1998).



Foto 3.2. Contacto de los Volcánicos del Eoceno inferior y Eoceno superior en la localidad de Sexi.

### 3.1.3. DEPÓSITOS CUATERNARIOS

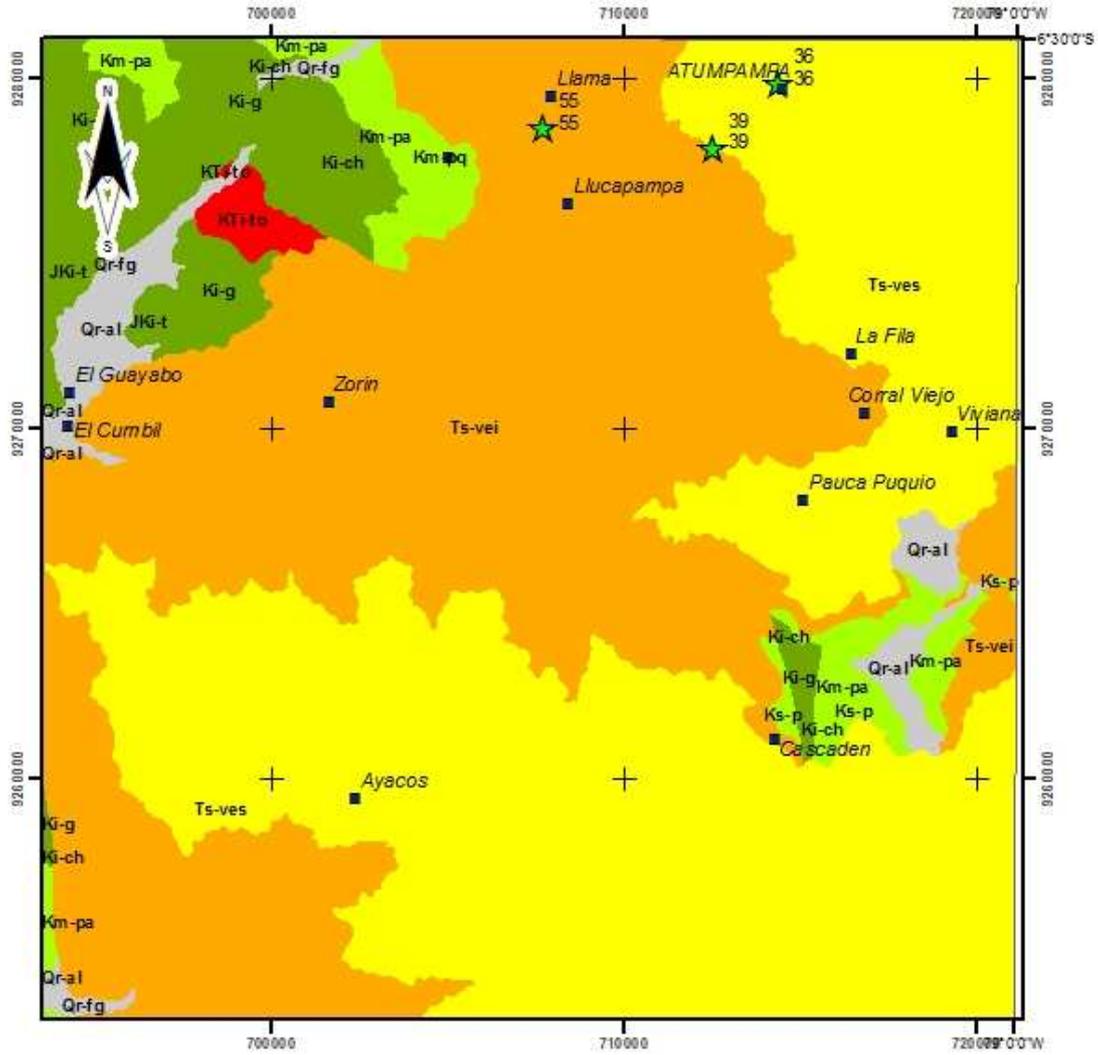
Constituido por depósitos recientes, estos se encuentran principalmente en los valles de Zaña y Chancay. Sobreyacen principalmente a las unidades sedimentarias del Mesozoico y en menor proporción a los volcánicos Eocénicos (Figs. 3.2. y 3.3.).

En la zona de estudio se han reconocido los depósitos aluviales y fluviales. Los depósitos aluviales se componen de bloques y gravas en una matriz limo arenosa que se encuentran en las laderas de los cerros y quebradas. Los depósitos fluviales están constituidos por gravas, arenas y limos que se encuentran en los pisos de valles y quebradas.

### 3.1.4. ROCAS INTRUSIVAS

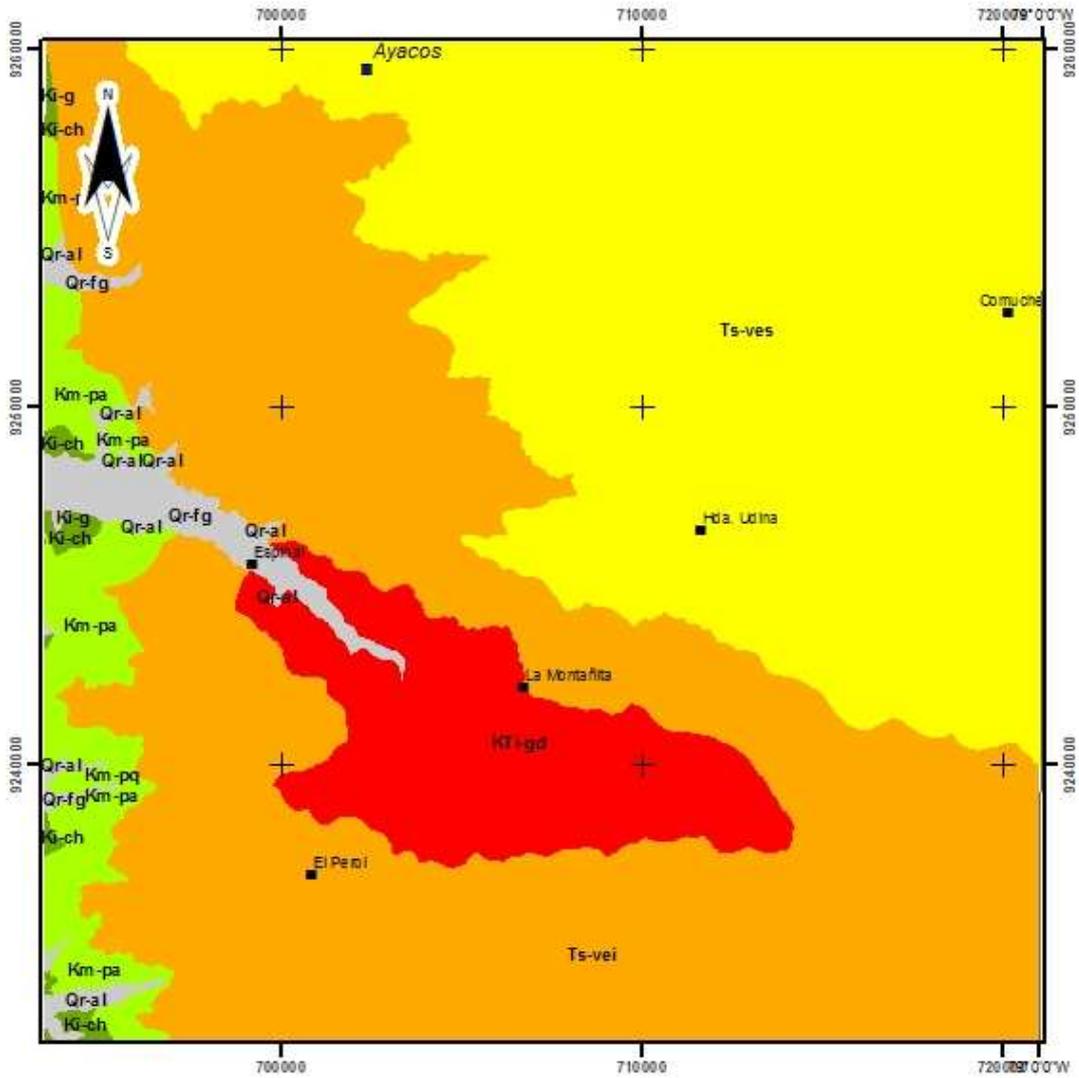
Estas rocas afloran en las localidades de Florida y la Montañita cubriendo un área bastante extensa (Fig. 3.3.), las rocas ígneas intrusivas son de composición granodiorítica, con cristales de cuarzo de gran tamaño aproximadamente de 3 mm y plagioclasas bien desarrolladas. En la zona de Llama afloran rocas ígneas intrusivas de composición tonalítica (Fig. 3.2.).

También se reconoció un dique granodiorítico que se extiende desde la quebrada del Cirato y que podría prolongarse hasta la quebrada El Guayabo (Fig. 3.2.). Posiblemente tenga una edad Terciaria por cortar los volcánicos eocénicos.



Leyenda			
Era	Sistema	Unidades Litoestratigráficas	Rocas intrusivas
Cenozoico	Cuaternario	Qr-al Depósito Aluvial	KTi-g KTi-h
	Terciario	Quaternario	
Neógeno		Ts-vei Volcánico Sicoenico Superior	
	Ts-ves Volcánico Sicoenico Inferior		
Mesozoico	Cretácico Superior	Ki-g Grupo Culquiñan	
		Ki-g Grupo Pululcane	
		Ki-ga Formación Paratambo	
	Cretácico Inferior	Ki-ch Formación Chulic	
		Ki-g Formación Goyllariguaje	
		Ji-ai Formación Tinajones	

UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABADEL CUSCO	
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA	
<b>MAPA GEOLOGICO</b>	
Escala: 1:200.000	Zona: 07
Fecha: 2014	Plan: 02
Autor: FLOR GREENIEL RODRIGUEZ AYCHO	



Leyenda			
Bs	Sistema	Unidades Litoestratigráficas	Rocas intrusivas
Cenozoico	Cuaternario	Qr-al Depósito Aluvial	KT-gd KT-ko
	Terciario	Qr-fg Depósitos fluvio-glaciares	
Mesozoico	Cretácico Superior	Ts-ves Volcánico Eoceno Superior	
		Ts-ves Volcánico Eoceno Inferior	
	Cretácico Inferior	Ki-g Grupo Culquiñan	
		Ki-pg Grupo Pulicane	
		Km-pa Formación Paratambo	
		Ki-ch Formación Chulac	
	Ki-g Formación Goyllarpuqo		
	Ji-04 Formación Tinajones		

	UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO		
	CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA		
<b>MAPA GEOLOGICO</b>		Escala: 1:200.000	Zona: IT
Autor: FLOR GREENIEL RODRIGUEZ AYCHO		Fecha: 2da 2008	Plano: 22

### **3.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL**

La Cordillera de los Andes es el resultado de fuerzas compresivas, en este caso por el proceso de subducción convergente del fondo oceánico por debajo del continente Sudamericano, donde los materiales de la corteza sufren deformaciones complejas como son pliegues y fallas principalmente, que en la actualidad pueden ser observados. En el Perú la Cordillera de los Andes se subdivide en la Cordillera Oriental y la Cordillera Occidental, las cuales se formaron en el Paleozoico y Mesozoico respectivamente (Cobbing, 1985).

El área de estudio se encuentra en la Cordillera Occidental, la cual se desarrolló a partir del Mesozoico, bajo un régimen extensivo, generando cuencas las cuales fueron depositadas por material sedimentario y volcanoclástico. Durante la fase tectónica del Cretácico superior tuvo lugar el incremento del plegamiento y el levantamiento de los Andes, afectando la cuenca Occidental Peruana, creando zonas de debilidad, teniendo como consecuencia la formación de lineamientos como fallas y fracturas, por donde posteriormente se emplazó un extenso volcanismo subaéreo denominado como Grupo Calipuy (Flores, 2006).

#### **3.3.1. Lineamientos**

Los lineamientos en su mayoría son de dirección NO-SE, que son consecuencia de los esfuerzos compresionales NE-SO, del mismo modo existen otros sistemas de fallas de dirección NE-SO y E-O con menor frecuencia.

Los Modelos de Elevación Digital (DEM, que proviene del inglés digital elevation model), son archivos sistemáticos integrados en las imágenes ASTER. Son una herramienta imprescindible para aquellos lugares donde no hay mapas topográficos, permitiendo generar vistas en 3D facilitando la comprensión de las geoformas, relaciones estratigráficas y estructurales entre otros. La forma de la superficie terrestre nos brinda información acerca de la composición litológica de las rocas, la erosión, estructuras y movimientos tectónicos, toda esta información puede ser extraída de la interpretación de las imágenes procesadas mediante técnicas como son: modelo de

sombras (Shaded Relief) y el modelo de pendientes (Aspect) que fueron verificados en campo.

- **Modelo de Sombras (Shaded Relief)**  
Es un método o técnica de análisis de la superficie terrestre a partir de los DEM's de las imágenes ASTER donde la dirección de iluminación es un factor importante, ya que las estructuras que corren paralelas a la dirección de iluminación no pueden ser sombreadas, por lo tanto no se detectan (Marquetti, C., 2005). Para este caso se creó una imagen con distintas direcciones de iluminación cada 30° con el fin de obtener una imagen multidireccional ensamblada, en la cual se podrá delinear los diferentes lineamientos (Fig. 3.4.).
- **Modelo de Pendientes (Aspect)**  
Es otro método de análisis terrestre o topográfico, mediante los cuales se genera un mapa de pendientes, en el cual se podrán interpretar los lineamientos (Fig. 3.5.)

### **3.3.2. Lineamientos NO-SE**

El Perú presenta lineamientos por lo general de orientación NO-SE, las cuales se hallan asociada a los principales elementos estructurales tales como plegamientos, fallas y cuerpos intrusivos menores.

Esta orientación de lineamientos se presenta principalmente en la zona norte del Perú, entre el paralelo 5° y 8° y los meridianos 76° y 79°. Se presenta como un rasgo estructural que coincide con el emplazamiento de las estructuras mineralizadas, que están controladas por fallas de la misma dirección (Fotos 3.3. y 3.4.), por lo tanto complementan el alineamiento regional de los yacimientos con características metalogenéticas comunes (Enríquez, et al., 2004).

En la figuras 3.4. y 3.5. se muestran los lineamientos interpretados mediante el modelo de sombras (shade relief) y pendientes (aspect), mientras que en el Cuadro 3.1. se muestran las estructuras de dirección NO-SE verificadas en el campo.

Cuadro 3.1. Estructuras con orientación NO-SE.

N°	Este	Norte	Estructura	Rumbo	Buzamiento
1	710881	9245006	Falla	145	55NE
2	710999	9244917	Falla	110	20NE
3	711190	9245636	Falla	135	84NE
4	715282	9243977	Falla	120	30NE
5	715353	9243967	Falla	140	85NE
6	713599	9249412	Falla	105	70SW
7	713424	9249120	Falla	110	66SW
8	712924	9267018	Falla-veta?	120	70N
9	711035	9267094	Falla-veta?	135	65NE
10	712940	9268529	Falla-veta?	141	62NE
11	713849	9267879	Estratificación	145	10NE
12	713450	9278519	Falla	160	27NE



Foto 3.3. Tobas con falla de rumbo N140 y buzamiento 85N en la coordenada UTM:  
9243967N-715353E.



Foto 3.4. Falla con dirección N135 y buzamiento 84S.

### 3.3.3. Lineamientos NE-SO

Al igual que los lineamientos NO-SE, también fueron interpretados en gabinete y comprobados en campo.

Los lineamientos con esta orientación son los que al intersectarse con los de dirección NO-SE forman las estructuras donde se pueden encontrar posiblemente mineralización.

En las figuras 3.4. y 3.5. se muestran los lineamientos interpretados mediante el modelo de sombras (shade relief) y pendientes (aspect), no obstante solo se pudo verificar en campo una estructura de dirección NO-SE (Cuadro 3.2.).

Cuadro 3.2. Estructuras con orientación NE-SO.

Este	Norte	Estructura	Rumbo	Buzamiento
716624	9272590	Estratificación	10	20NE

### 3.3.4. Lineamientos E-O

Esta orientación de lineamientos, se presenta en menor proporción en comparación con los de dirección NO-SE y NE-SO.

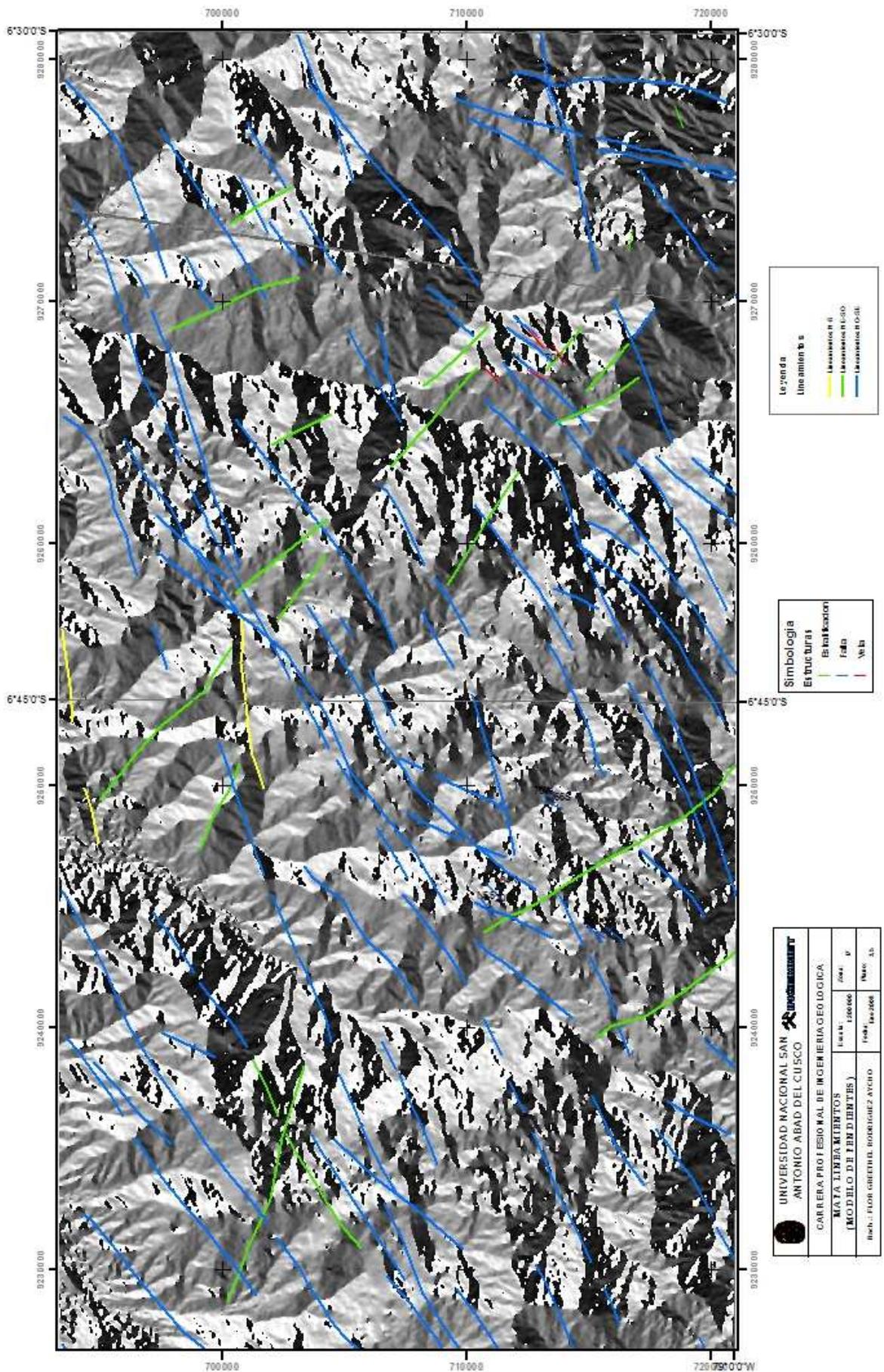
Se han podido interpretar mediante las técnicas de modelo de sombras (shade relief) y el de pendientes (aspect) los lineamientos en esta dirección (Figs. 3.4. y 3.5), que algunos fueron comprobados en campo.

### **3.3.5. Lineamientos circulares**

Estas estructuras curvas de forma circular, corresponden a estructuras geológicas o geomorfológicas diversas como diapiros, calderas y centros volcánicos.

Para poder definir este tipo de estructuras se utilizaron las técnicas de modelo de sombras y la de pendientes; sin embargo, con la técnica de modelo de sombras (Fig. 3.4.) se pueden definir de mejor manera este tipo de estructuras, tal como se muestra en los alrededores de la localidad de Niepos dos estructuras de forma circular y otra en la localidad de Sexi, las cuales fue verificada en campo. Por el análisis visual de las imágenes, del tipo de depósito y las relaciones de campo en el caso de Niepos se considera como un centro volcánico.





## **CAPITULO IV**

### **PRINCIPIOS BASICOS EN LA INTERPRETACION DE IMÁGENES DE SATELITE**

---

#### **4.1. GENERALIDADES**

Los sensores remotos son instrumentos que sirven para obtener información a distancia de objetos o fenómenos sin tener contacto directo con ellos, en este caso situados en la superficie terrestre y que en la actualidad son de gran ayuda en la geología, agricultura exploración minera, vulcanología, catastro urbanístico y otras ciencias.

Para ser posible la observación remota se necesita tener básicamente entre el objeto y el sensor algún tipo de energía, esta energía puede ser por reflexión o emitida, o por emisión-reflexión del mismo objeto, siendo estas tres las formas de energía con las cuales se puede obtener información de la superficie terrestre (Fig. 4.1.). El principio de la teledetección se basa en que cada área emite o refleja una radiación específica, en función de su propia naturaleza, por consiguiente el flujo energético es un factor indispensable en la adquisición de información para conseguir como producto una imagen o escena (Chuvieco, 2000).

Entre el sensor y la cubierta terrestre se interpone la atmósfera, que está compuesta de gases que dispersan y absorben la señal original, interactuando con la radiación electromagnética.

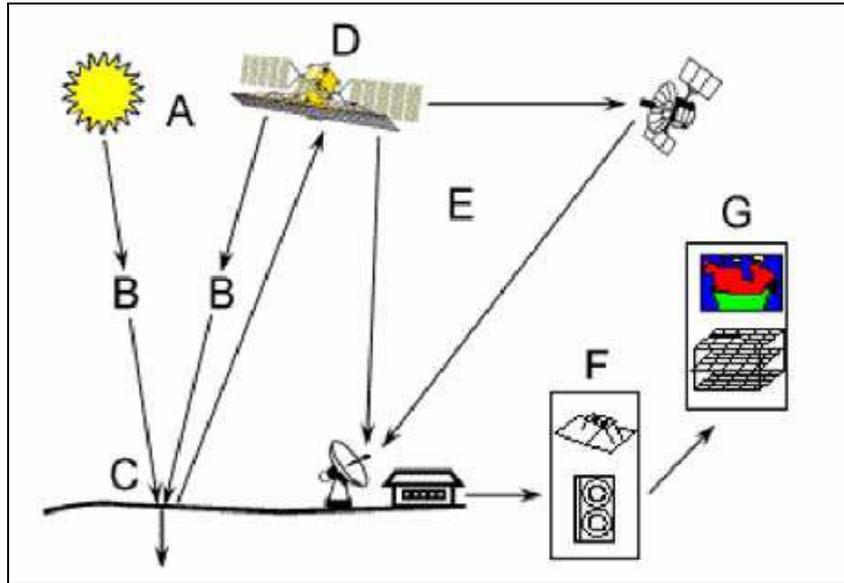


Fig. 4.1. Elementos de la Percepción Remota: A: Fuente de energía, pasiva o activa B: Trayectoria y su interacción con la atmósfera C: Incidencia en la superficie terrestre D: Satélite E: Ciclo de toma y descarga de datos F: Estación terrena de preproceso G: Información al usuario

## 4.2. EL ESPECTRO ELECTROMAGNETICO

Cualquier tipo de energía se puede definir mediante sus longitudes de onda o frecuencias. El espectro electromagnético (EEM) viene a ser la sucesión de estas longitudes de onda que están divididas en regiones dentro de las cuales las longitudes de onda son similares. El espectro electromagnético se extiende desde las longitudes de onda muy cortas como los rayos gamma (medido en partes de nanómetros) a las longitudes de onda largas de la región radioeléctrica (medido en m). El EEM está dividido en regiones basadas en sus longitudes de onda (Fig. 4.2.) que son:

**Rayos Gamma** (menores a  $0.003 \mu\text{m}$ ): Esta radiación es completamente absorbida por la atmósfera y no es sensible a los sensores remotos.

**Rayos X** ( $0.03\text{nm}$  a  $30 \text{ nm}$ ): También es absorbida por la atmósfera. No se usa en sensores remotos.

**Rayos Ultravioleta** ( $0.03$  a  $0.4 \mu\text{m}$ ): Esta radiación es absorbida completamente por el ozono ( $\text{O}_3$ )

**Espectro Visible** ( $0.4 \mu\text{m}$  a  $0.7 \mu\text{m}$ ): Denominado así por ser la única radiación electro magnética perceptible por nuestra vista. Dentro de esta se tiene 3 bandas que son: Azul

(0,4 $\mu\text{m}$ -0,5 $\mu\text{m}$ ), Verde (0,5 $\mu\text{m}$ -0,6 $\mu\text{m}$ ) y Rojo (0,5 $\mu\text{m}$ -0,6 $\mu\text{m}$ ) que son los colores primarios.

**Infrarrojo cercano** (0,7  $\mu\text{m}$ -1,3  $\mu\text{m}$ ): También denominado infrarrojo o fotográfico ya que puede detectarse a partir de filmes dotados de emulsiones especiales. Su importancia radica en que esta discrimina las masas vegetales.

**Infrarrojo medio** (1,3  $\mu\text{m}$ -8  $\mu\text{m}$ ): En esta se puede obtener el contenido de humedad en la vegetación y principales focos de alta temperatura.

**Infrarrojo lejano o térmico** (8  $\mu\text{m}$ -14  $\mu\text{m}$ ): Comprende la porción emisiva del espectro donde se detecta el calor proveniente de la cubierta terrestre.

**Micro ondas:** Son aquellas que penetran por nubes, neblina, lluvia, imágenes se obtiene por scanning systems activos y pasivos.

De todas estas regiones espectrales, las más importantes para nuestro estudio son el espectro visible, las regiones del infrarrojo cercano medio y lejano, donde operan los sensores remotos pasivos.

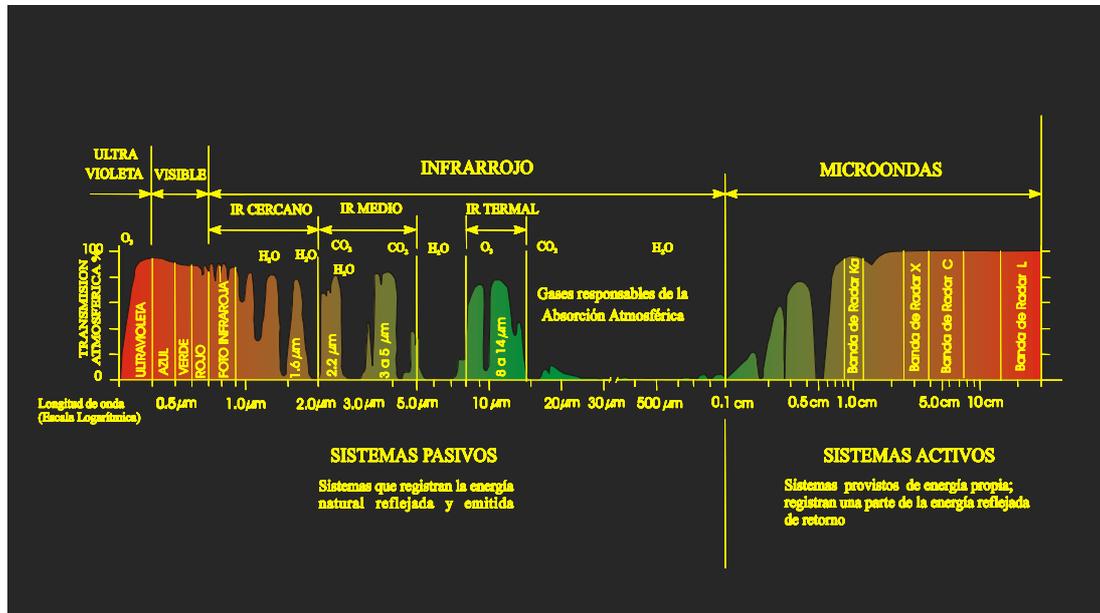


Fig. 4.2. Espectro electromagnético.

### **4.3. EFECTOS ATMOSFERICOS**

#### **4.3.1. ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA**

La atmósfera está compuesta principalmente de gases como el oxígeno atómico ( $O_2$ ), anhídrido carbónico, ozono ( $O_3$ ) y nitrógeno; los cuales afectan en la interacción entre el flujo energético y el sensor teniendo como efecto la absorción atmosférica, que consiste en la absorción de las diferentes radiaciones en determinadas bandas del espectro en donde es menos intensa. Como consecuencia se tiene las ventanas atmosféricas que son determinadas bandas del espectro en las cuales la transmisividad es alta y son idóneas para realizar los análisis espectrales (Sabins, 2000).

Las principales ventanas atmosféricas son en el espectro visible e infrarrojo cercano varias en el infrarrojo medio, infrarrojo térmico y microondas en donde la atmósfera es prácticamente transparente (Fig. 4.3.).

Otra causa de alteración de información es la dispersión atmosférica que a su vez pueden ser de diferentes tipos, siendo la más importante y la de mayor influencia en teledetección la dispersión Rayleigh que afecta las longitudes de onda más cortas y es la causante por ejemplo del color azul del cielo.

Cualquier cuerpo por encima del cero absoluto emite energía calorífica, de igual manera la atmósfera también emite energía calorífica que también distorsiona los datos, por lo que deberá considerarse esta para ser separada o corregida.

Todos estos efectos negativos para la obtención de información deberán de ser corregidos antes de procesar las imágenes.

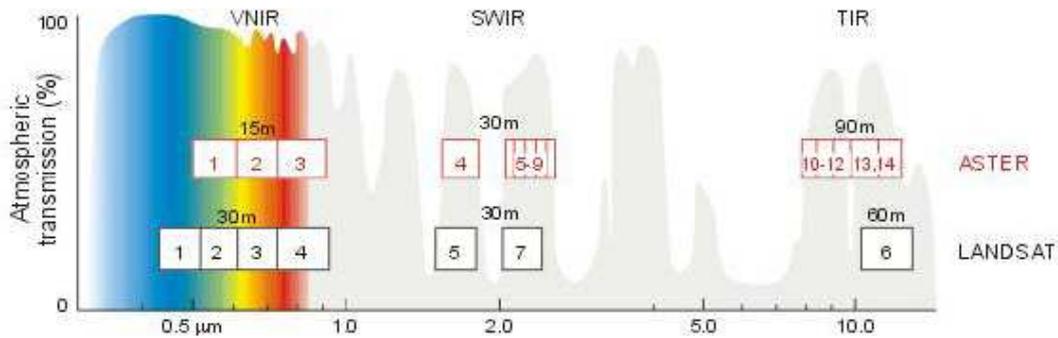


Fig. 4.3. Ventanas atmosféricas.

#### 4.4. INTRODUCCION AL SENSOR ASTER

El sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) fue creado como un esfuerzo cooperativo entre la NASA (USA) y el Ministerio de Comercio Economía e Industria de Japón (METI). Con la colaboración de científicos de ambos países, el 18 de diciembre de 1999 es lanzado por la NASA el satélite artificial TERRA (Fig. 4.4.).

Este es el primero de una serie de satélites creados por la NASA, que cuenta con múltiples instrumentos elaborados con el fin de observar la superficie terrestre, la biosfera, atmósfera y los océanos, que permitirán una mejor comprensión de la Tierra en conjunto, denominando a este proyecto como el Sistema de Observación de la Tierra (EOS).

Terra lleva a bordo el sensor de última generación ASTER, que es un radiómetro multiespectral con un alto potencial que supera en cualidades a otros sensores, proporcionando la suficiente resolución espacial y espectral para poder discriminar incluso las distintas clases de minerales; siendo el único instrumento de alta resolución espacial sobre Terra, es el "zoom" de los otros instrumentos o sensores que también transporta como son el MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer), que sirve para monitoreo de volcanes, el CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System), utilizado en el monitoreo climático, el MOPITT (Measurements of Pollution in the Troposphere), que como su nombre lo dice capta la contaminación en la atmósfera, específicamente en la troposfera.

Los parámetros de órbita del satélite TERRA son similares al de Landsat 7, es decir presenta una órbita helio-sincrónica, con excepción del tiempo local de cruce del Ecuador siendo este a las 10:30 hora local solar, con una diferencia de 30 minutos detrás de Landsat (Aster User Manual, 2001).

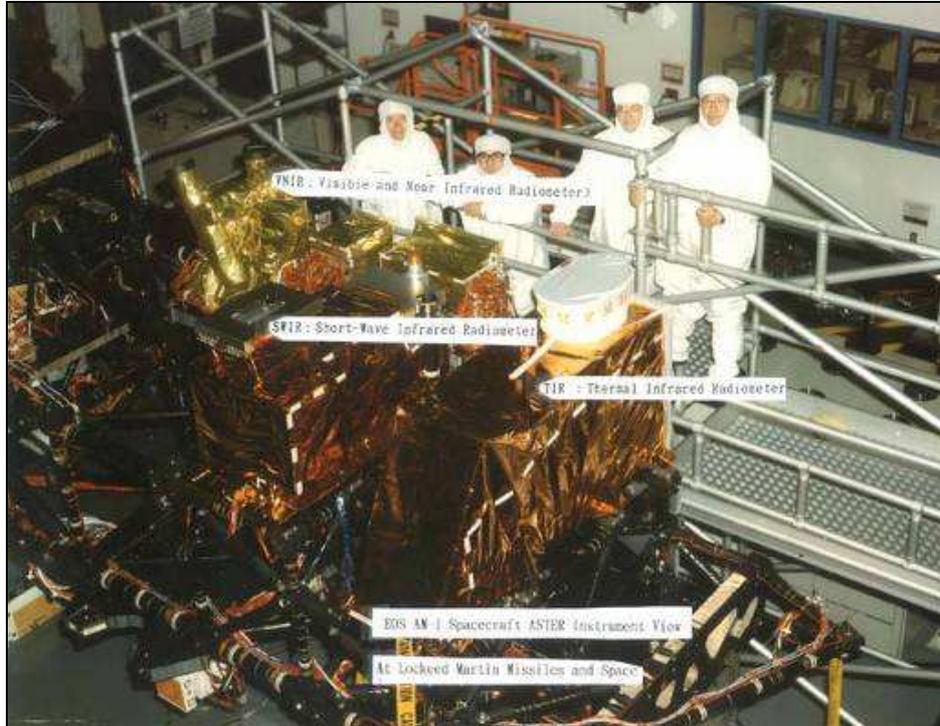


Fig. 4.4. Sensor ASTER, antes de su lanzamiento (foto Aster User's, 2002).

#### **4.4.1. Características del ASTER**

ASTER tiene la capacidad de adquirir hasta 650 escenas por día, teniendo una cobertura total del globo terráqueo; dichas escenas tienen un ancho de barrido de 60x60 Km, las cuales son captadas a una altura de 705 Km.

Las escenas según el proceso que reciban, están divididas por niveles, es así que al ser captadas y recibidas en la estación se encuentran en el nivel cero y mediante el desarrollo de ciertas técnicas son elevadas al nivel 1A, mientras que alrededor de 200 a 300 son elevadas o procesadas al nivel 1B. Es recién en estas condiciones que las escenas son puestas a la venta para su distribución y respectivo procesamiento de la data que poseen las mismas, con datos llamados HDF. La revisita o periodicidad de registro de información multispectral satelital es cada 16 días.

#### **4.4.2. Resolución**

La definición común de resolución se refiere a la agudeza y claridad de una imagen, pero para sensores remotos es bastante amplia, ya que la resolución de un sensor dependerá de sus componentes.

##### 4.4.2.1 Resolución espacial

Es la mínima unidad de información incluida en la imagen, comúnmente denominada píxel. Este término se aplica al objeto más pequeño que puede ser captado por el sensor. También se emplean términos más complejos como effective resolution element (ERE) o effective instantaneous field of view (EIFOV) (Townshend, 1980).

Cuanto menor sea el tamaño del píxel será menor la probabilidad de que este sea un compuesto de datos cercanos, es decir será mayor su resolución espacial.

##### 4.4.2.2. Resolución radiométrica

Capacidad del sensor para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe. Esta es registrada mediante bits. En el caso de las imágenes ASTER tiene una resolución radiométrica de 8 bits ( $2^8=256$ ), lo cual significa que el valor de sus píxeles tiene un rango numérico que fluctúa entre 0 y 255. Es decir que la intensidad total de la energía medida es descompuesta dentro de 256 tonos de grises.

##### 4.4.2.3. Resolución temporal

Se refiere a la medida de la frecuencia con que el sensor capta las imágenes de un área en particular. En el caso del sensor ASTER su resolución temporal es de 16 días pero si fuese necesario se pueden obtener imágenes cada tres días.

##### 4.4.2.4. Resolución espectral

Se refiere al número y ancho de las bandas que un sensor puede discriminar. Mientras menor sea el ancho de la banda, y mayor el número de estas se tendrá mejor resolución

ya que se podrá discriminar información espectral característica en dichas regiones que abarcan las bandas. Los datos ASTER cuentan con una resolución espectral de 14 bandas que nos permiten discriminar de forma más directa diferentes litologías y mineralogías asociadas, a diferencia del Landsat TM 7 que cuenta con 7 bandas con los cuales no se puede llegar a una clasificación específica (Fig. 4.5.).

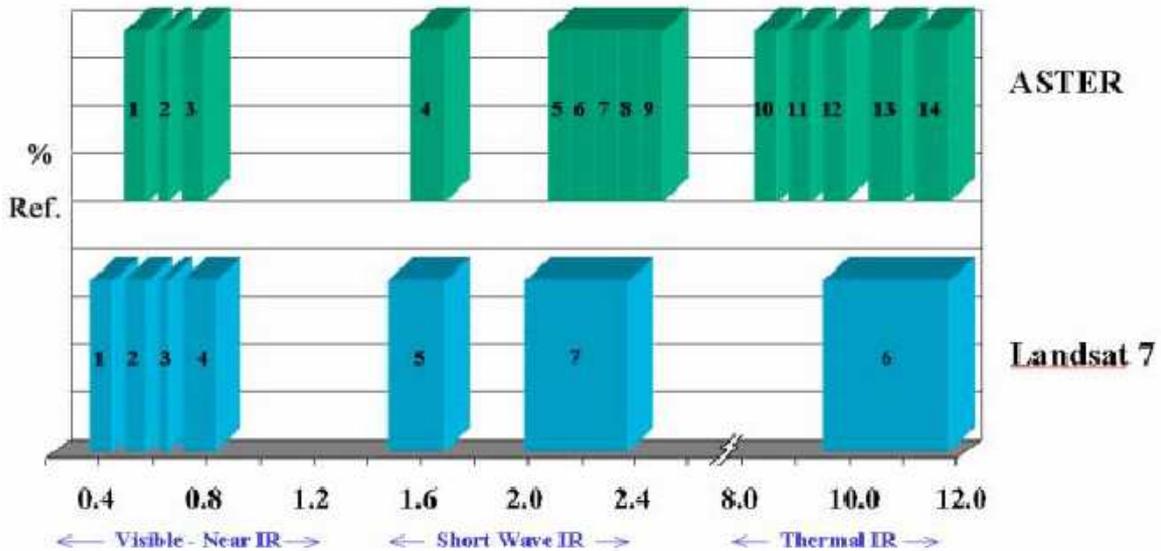


Fig. 4.5. Comparación entre las resoluciones espectrales de ASTER y Landsat 7 (Thematic Mapper).

Las 14 bandas de ASTER están divididas en 3 subsistemas, que abarcan regiones del espectro electromagnético, los cuales se detallan a continuación:

#### 4.4.3. Subsistema Infrarrojo visible y cercano (VNIR)

Estas captan vibraciones de los metales de transición, en especial hierro y algunas tierras raras (Fig. 4.6.). Comprende tres bandas las cuales captan las imágenes de manera vertical llamada también vista Nadir (3N), pero además cuenta con un telescopio adicional, con el que se permite la vista Backward (3B) o vista atrás. Este proporciona una perspectiva que permite ver los datos o imágenes estéreo, a partir de los cuales se lograra la obtención de los DEM's o modelo de elevación digital e imágenes que ortorrectificadas sirven para la cartografía y otras aplicaciones en geología como la definición de lineamientos. Tiene una resolución espacial de 15 m.

#### 4.4.4. Subsistema Infrarrojo de onda corta (SWIR)

Este detecta las vibraciones moleculares de hidratos e hidróxidos de aluminio, hierro, magnesio y carbonatos, obteniendo las imágenes con seis bandas (Fig. 4.6.), las cuales están estratégicamente posicionadas en esta región del espectro electromagnético. Es en estas bandas donde se pueden asociar las longitudes de onda de absorción de los minerales y diferenciarlos por los tres principales tipos de alteración ácida, intermedia y propilítica, a través de sus picos de absorción característicos 2.165  $\mu\text{m}$ , 2.209  $\mu\text{m}$ , 2.360  $\mu\text{m}$  respectivamente. Este rango es utilizado ampliamente por los sensores hiperespectrales para el mapeo de zonas de minerales, convirtiendo a esta región en una de las más importantes y cuenta con una resolución espacial de 30 m.

#### 4.4.5. Subsistema Termal de la onda corta (TIR)

Los principales minerales formadores de las rocas poseen sus picos de absorción en este rango del espectro, siendo las 5 bandas las que detectan las moléculas de los silicatos (Fig. 4.7.). Pero además este subsistema es importante para la utilización en el monitoreo de temperaturas y gases, a partir de imágenes nocturnas para evitar la componente de reflexión de la luz solar. Estas cuentan con una resolución de 90 m.

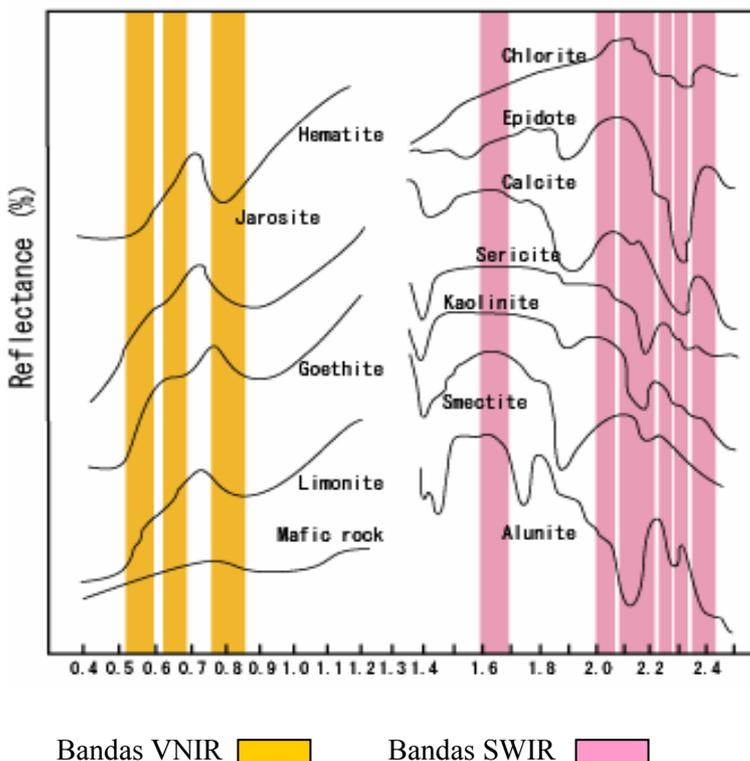
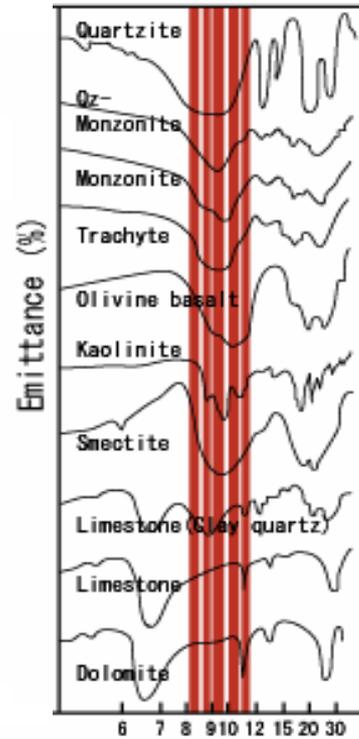


Fig. 4.6. Características espectrales de minerales en los subsistemas de VNIR y SWIR del sensor ASTER.

 Bandas del TIR

Fig. 4.7. Características espectrales de minerales en los subsistemas de TIR del ASTER.



En el cuadro 4.1. se resume los rangos espectrales y resolución espacial de las bandas en los tres subsistemas del sensor.

Cuadro 4.1. Características de los subsistemas del sensor ASTER.

Subsistema	Numero de Bandas	Rango Espectral (micrometros)	Resolución Espacial (m)
VNIR	1	0.52-0.60	15
	2	0.63-0.69	
	3N	0.76-0.86	
	3B	0.76-0.87	
SWIR	4	1.60-1.70	30
	5	2.145-2.185	
	6	2.185-2.225	
	7	2.235-2.285	
	8	2.295-2.365	
TIR	9	2.360-2.430	90
	10	8.125-8.475	
	11	8.475-8.825	
	12	8.925-9.275	
	13	10.25-10.95	
	14	10.95-11.65	

#### **4.4.6. Nivel de data**

Los datos producidos por el sensor ASTER, como ya se ha mencionado anteriormente según su procesamiento está dividida en niveles, algunas veces representados por las siglas L provenientes del inglés level (nivel), seguido del número (L1). A su vez los niveles pueden ser: 1A y 1B y 3B.

##### 4.4.6.1. Nivel 1A

Se define esta data como la reconstrucción de la información no procesada a máxima resolución, que viene acompañado por un archivo suplementario con las efemeridades de posicionamiento del satélite y de un archivo auxiliar con la tabla de coeficientes de calibración radiométrica y corrección geométrica que componen los datos de la imagen; además de otros datos como son porcentaje de nubosidad, humedad, sin aplicar a la imagen, manteniendo así los valores de los datos originales. Todas las imágenes adquiridas por el sensor son elevadas a este nivel (L1A).

Las principales etapas de las operaciones de procesamiento de datos de nivel L0 a L1A, puede resumirse de este modo:

- El sensor transmite el Nivel-0 a través de los datos de seguimiento del satélite de retransmisión de datos y del sistema (TDRSS), a estaciones receptoras terrestres en White Sands, Nuevo México en los EE. UU.
- La adquisición de información de todo un día de imágenes es procesada o genera en Japón, en ASTER GDS con aportaciones de Estados Unidos y es enviada al centro de operaciones de EOS.
- GDS procesa imágenes L0 a L0A, lo cual incluye:
  - Desempacar el Nivel-0 de datos, que como su nombre lo dice es el instrumento que tiene función de recuperar la fuente de datos; utilizando un contador secuencial, con datos de cabecera principal, que incluyen datos de tiempo que se encuentran en la cabecera secundaria (Fig. 4.8.).
  - Demultiplicar fuente de datos que se usa para separar los datos de la imagen en bandas espectrales en formato BSQ. Cada grupo de data

(VNIR, SWIR, TIR) contiene información acerca de las imágenes y datos complementarios del sensor y otros datos auxiliares.

- Realineamiento de los datos gráficos de los subsistemas SWIR y TIR, datos de reajuste para compensar el error producido por el paralaje del detector para estos subsistemas, que se corrige con una combinación de imágenes de correlación y métodos de DEM.

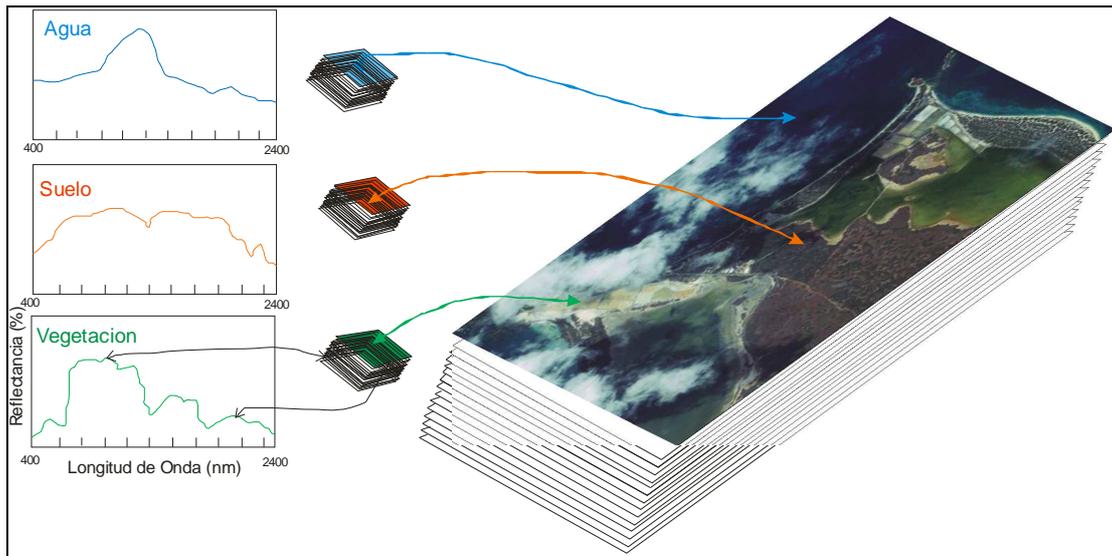


Fig. 4.8. Bandas desempacadas.

#### 4.4.6.2. Nivel 1B

Es generado aplicando esos coeficientes del archivo auxiliar, no así el suplementario.

- Transformación de coordenadas mediante la identificación de los puntos de observación en coordenadas de latitud y longitud en la superficie terrestre definida por el modelo WGS84 Tierra; usando la información de los datos complementarios.
- La calibración radiométrica, consiste en compensar la información y sensibilidad de los coeficientes a partir de una base de datos de todos los sensores, utilizando valores reales y se actualizan periódicamente.

#### 4.4.6.3. Nivel 3A

La información de las imágenes en este nivel cuentan con las correcciones de los niveles L1A y L1B, pero además están ortorectificadas es decir se realiza la corrección de las variaciones topográficas de la superficie de la Tierra debido a la inclinación del sensor que afectan la distancia con la que se muestran las características en la imagen satelital (Cuadro 4.2.). Cuanto más topográficamente diverso sea el área, tanto mayor será la distorsión en la imagen.

Para eliminar con precisión estas distorsiones de la imagen, se usa un modelo digital de elevación (DEM); que para el caso del sensor ASTER cuenta con DEM's de 15 m, 30 m y 90 m; para el presente estudio se utilizó el DEM de 30 metros, mediante el uso del software SILCAST.

Cuadro 4.2. Características de los niveles de imágenes ASTER

IMAGEN ASTER	Nivel 1A	Nivel 1B	Nivel 3A
Calibración Radiométrica	X	✓	✓
Georeferenciada	X	✓	✓
Modelo elevación digital (DEM)	X	X	✓

Al tener entre el sensor y el objeto de estudio a la atmósfera, se ve la necesidad de corregir estas interferencias ya que modifican la recepción de la información. Es así que antes de comenzar cualquier análisis con imágenes satelitales se realiza una corrección atmosférica de acuerdo a la necesidad del estudio a realizar.

## **CAPÍTULO V**

### **PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES ASTER**

---

#### **5.1. GENERALIDADES**

Se han desarrollado una variedad de métodos o técnicas para resaltar o identificar determinadas características de la superficie de la tierra en imágenes captadas por sensores remotos. Así mismo en la actualidad son varios los programas que se han desarrollado para el análisis y procesamiento de imágenes satelitales.

Para el presente estudio se utilizó el software Environmental for Visualizing Images (ENVI) v. 4.2, el cual es muy versátil y es utilizado para el análisis de todo tipo de data producida por sensores remotos. Posee herramientas para el procesamiento de imágenes pancromáticas, multiespectrales, hiperspectrales, radar, así como casi cualquier otro tipo de datos de imágenes raster.

Puede utilizarse para realizar todas las técnicas comúnmente utilizadas en el análisis de imágenes satelitales, incluyendo clasificación multiespectral, varios tipos de filtros espaciales, ratios y estadísticas de las imágenes.

El programa ENVI también tiene un único conjunto de herramientas avanzadas de análisis espectral específicamente designado para trabajar con imágenes hiperspectrales y un completo set de herramientas para trabajar con imágenes radar (RSI, 2005).

En el procesamiento de las imágenes satelitales ASTER dependiendo del estudio que se desea realizar se deben efectuar correcciones previamente detalladas en el anterior capítulo.

El área en estudio abarca en este caso 2 escenas, que fueron trabajadas independientemente ya que al unirlos se mezclaría la información que contiene cada uno de los píxeles en el área de intersección de las imágenes. Dichas imágenes son remuestreadas a nivel de los subsistemas VNIR y SWIR, de tal manera que se obtiene un nuevo archivo de 9 bandas y con 30 m de resolución espacial. Obteniendo un nuevo archivo al cual se le aplicara la corrección atmosférica, para alcanzar el archivo más óptimo con el que se procederá a procesar y analizar las imágenes.

Las firmas espectrales tomadas en laboratorio con espectrómetros capturan la firma espectral en toda la región del infrarrojo de onda corta (SWIR) como se muestra en la figura 5.1. Las firmas espectrales de las imágenes ASTER solo poseen la información en sus 14 bandas que no son contiguas, como se muestra en la figura 5.2.

Esta es una de las razones por la cual mientras más bandas posean un sensor mayor será la información que se obtenga del objeto o fenómeno en estudio.

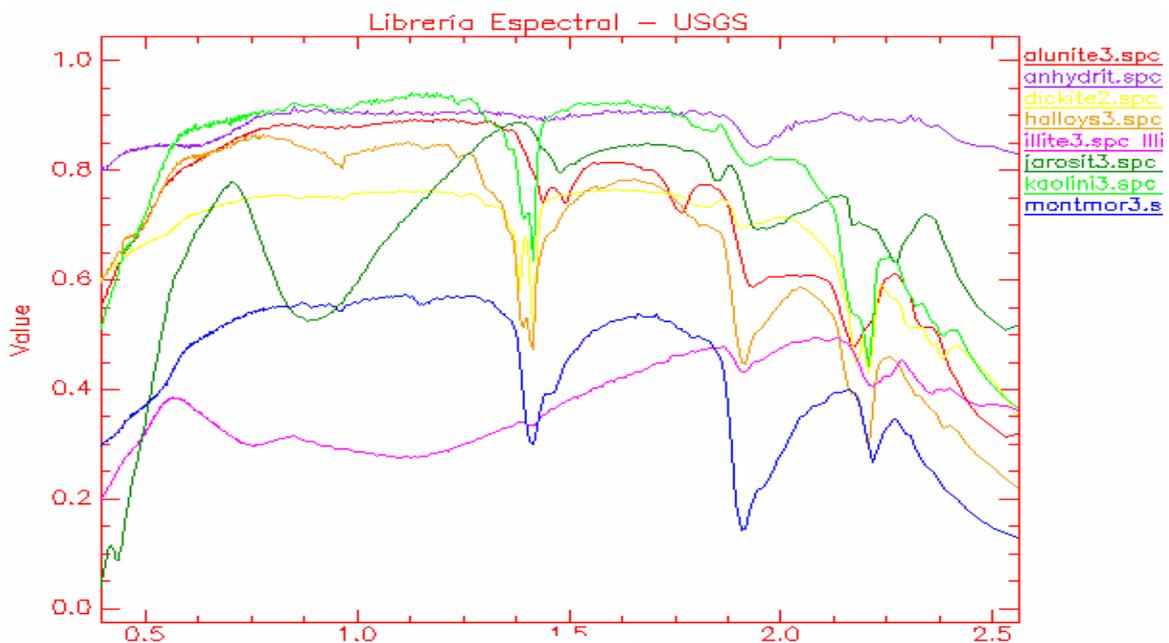


Fig. 5.1. Firmas espectrales de minerales.

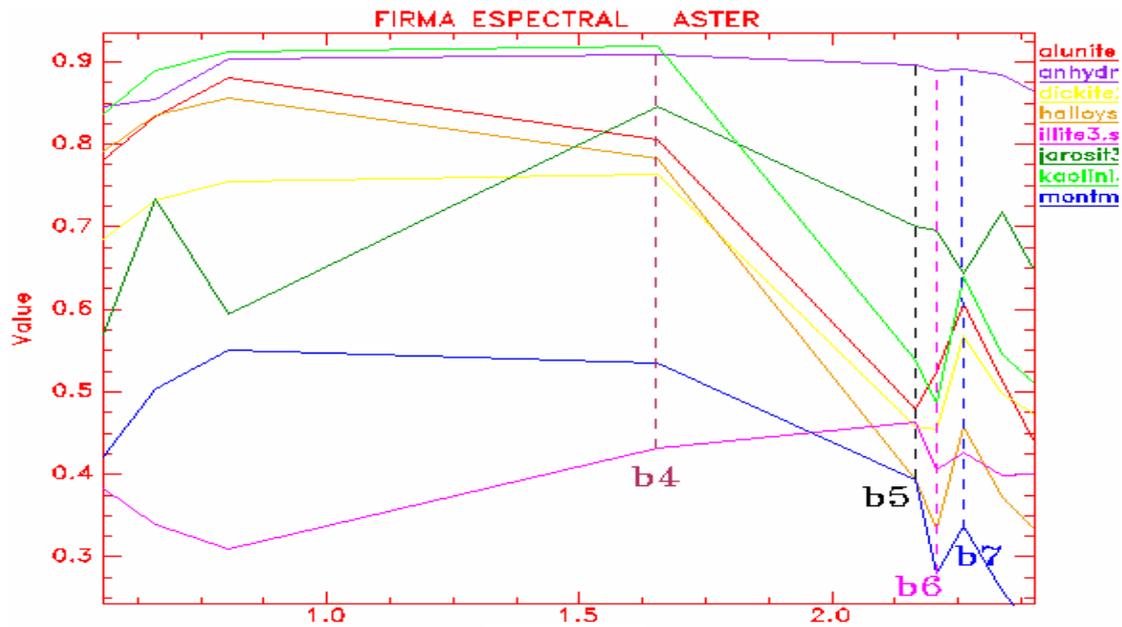


Fig. 5.2. Firmas espectrales de una imagen ASTER.

## 5.2. CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA

Existen diferentes herramientas para la corrección atmosférica, pero la más recomendable para las imágenes ASTER es el LogResidual. Esta calibración se realizó mediante el software ENVI v. 4.2, con la cual se corrige la radiación que cualquier superficie refleja sobre la radiación que incide sobre la misma. Este proceso permite obtener la reflectancia relativa que sirve para visualizar los picos de absorción de cada una de las bandas.

Para poder detectar o resaltar las áreas de alteración hidrotermal es necesario usar la combinación de bandas y otras técnicas utilizadas en el presente estudio, que a continuación se detalla.

## 5.3. COMBINACION DE BANDAS

Las imágenes de color se obtienen al combinar 3 bandas, asignándoles a cada una de estas los colores primarios: Rojo, Verde y Azul (RGB). De esta manera se logran las imágenes de falso color resaltando las características de acuerdo al estudio que se desea realizar como el índice normalizado de la diferencia de la vegetación (NDVI), color natural para el caso de las ASTER.

En este estudio utilizamos la combinación de las bandas de los subsistemas VNIR y SWIR, mediante las cuales se pueden reconocer diferentes características geológicas como son: litología, estructuras, zonas de alteración hidrotermal, además de la geomorfología, vegetación, etc.

El procesamiento de una imagen en color natural de las imágenes ASTER no solo se consigue con la combinación de bandas sino que es necesario primero realizar una operación con las mismas, ya que este sensor no presenta una banda en el color azul del espectro; la combinación de las bandas b1, b2 b3 y b4 nos dará como resultado la imagen en color natural tal como la veríamos en una fotografía aérea a color (Fig. 5.3.).

El índice normalizado de la diferencia de la vegetación (Normalized Difference Vegetation Index-NDVI), es otra aplicación de resalte de las características de la vegetación. Utilizada para la discriminación entre dos cubiertas vegetativas con comportamiento reflectivo distinto entre dos bandas, es así que el NDVI muestra un contraste en la firma espectral entre la banda roja (0,6  $\mu\text{m}$  a 0,7  $\mu\text{m}$ ) y el infrarrojo cercano (0,7 a 1,1  $\mu\text{m}$ ) de la vegetación sana; mientras en la banda roja los pigmentos de las hojas absorben la mayor parte de energía, y en el infrarrojo cercano reflejan bastante (Fig. 5.4.) haciendo posible el separar o diferenciar la vegetación de otras cubiertas.

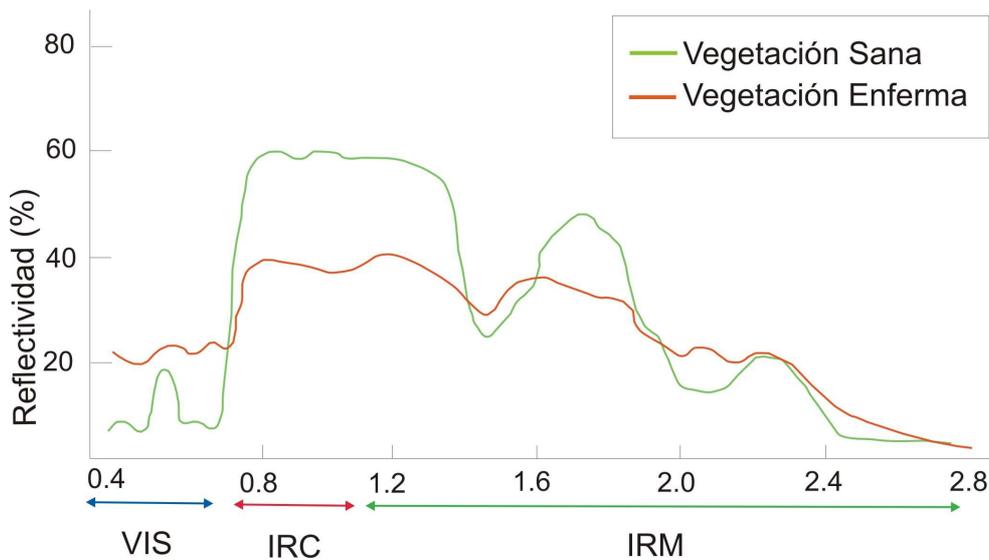
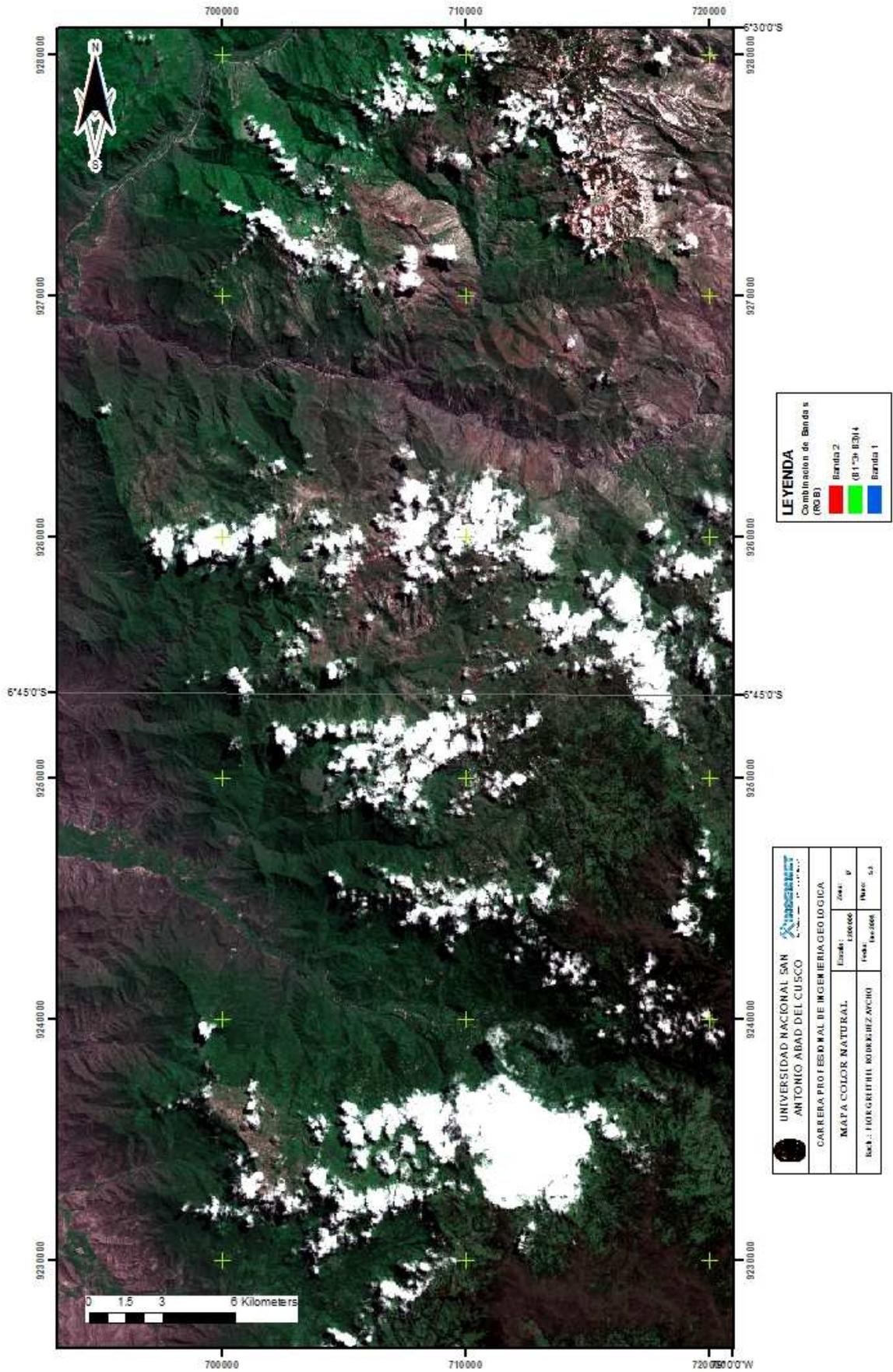


Fig.5.4. Diferencia entre firmas espectrales de vegetación sana y enferma



Por otro lado la vegetación enferma presenta reflectividad muy baja en el infrarrojo cercano, presentando muy poco contraste entre las reflectividades de esta y de la banda roja (Chuvieco, 2000).

Para el presente estudio se resaltan las zonas de alteración hidrotermal que fueron divididas de acuerdo a sus características espectrales, agrupar a la caolinita, dickita y alunita que presentan absorción en las banda 6 debido al enlace Al-OH. Mientras alta reflectividad en la banda 4, coincidiendo con la zona de alteración ácida o argílica (Fig. 5.5.).

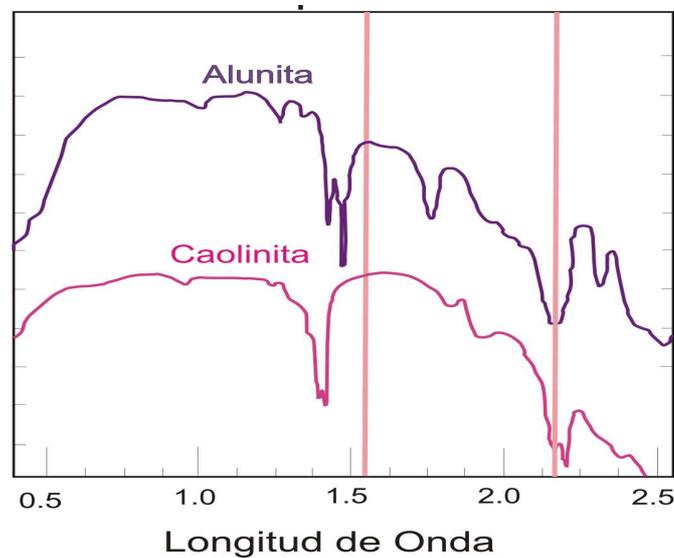


Fig. 5.5. Firmas espectrales de minerales de alteración ácida (USGS).

Se agrupó a los minerales con características de absorción en la banda 6 y alta reflectancia en la banda 5, en este caso fueron los minerales de sericita, motmorillonita, illita y esmectita que se encuentran en la zona de alteración intermedia que puede corresponder a una alteración filica (Fig. 5.6.).

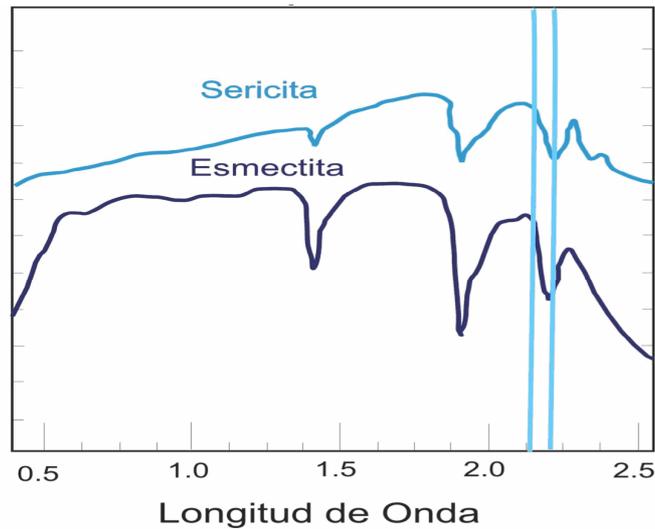


Fig. 5.6. Firmas espectrales de minerales de alteración intermedia (USGS).

Mientras que los minerales con características de absorción en la banda 8 y alta reflectancia en la banda 5, son la clorita, epidota y calcita que pertenecen a la zona de alteración propilítica (Fig. 5.7.).

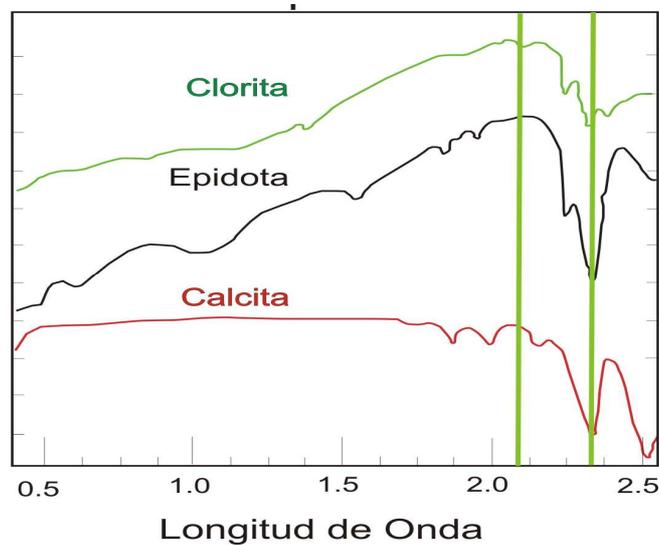
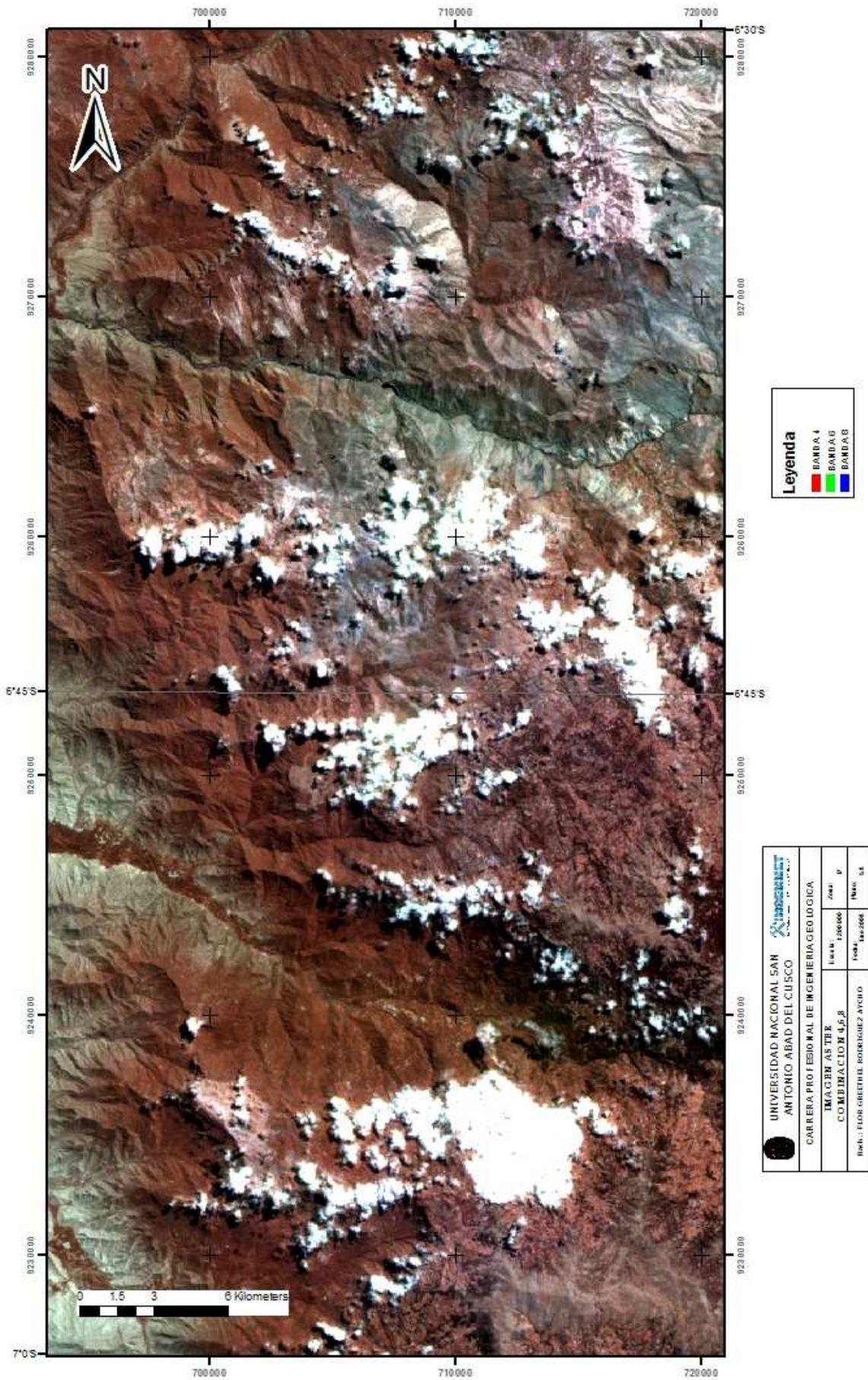


Fig. 5.7. Firmas espectrales de minerales de alteración propilítica (USGS).

Como se observan en las figuras anteriores, de acuerdo a sus exclusivas características de absorción y reflectancia de los minerales, es que se consigue la combinación de las zonas de alteración, las cuales se distinguirán en tonalidades del rosado, debido a la reflectancia y absorción de las bandas 4 y 8 respectivamente representadas por la combinación de los colores rojo y azul (Fig. 5.8.).



Las técnicas utilizadas para el resalte de las zonas de alteración son las siguientes:

#### **5.4. RATIOS O COCIENTES DE BANDAS**

Como las respuestas espectrales de las rocas son similares, se dificulta la diferenciación de las litologías, por ello utilizamos técnicas o métodos que nos ayuden a discriminar entre estas, así tenemos los cocientes o ratios de bandas, que como su nombre lo indica, un cociente o ratio implica una división, píxel a píxel, entre los ND (números digitales) almacenados en dos o más bandas de la misma imagen. Este método nos ayuda a discriminar entre dos materiales con comportamiento reflectivo muy distinto en esas dos bandas, los resultados serán píxeles con la más grande diferencia de reflectancia entre las dos bandas espectrales involucradas.

Los cocientes de bandas que se aplican para poder discriminar las zonas de alteración hidrotermal son en el SWIR, ya que en esta parte de la región espectral presentan picos de absorción y de reflectancia característicos (Yamaguchi, 1987)

En una imagen de cocientes, las áreas de color más oscuro son aquellas en las cuales el denominador es mayor que el numerador, así mismo cuando el numerador es mayor que el denominador las áreas son más claras (Acosta, 1999).

Para la zona de estudio se analizaron los siguientes cocientes:

##### **5.4.1. Cociente 4/6**

Este cociente resalta las características de la alteración ácida o argílica avanzada ya que los minerales representativos de esta alteración como son la alunita, dickita y arcillas como la caolinita tienen los picos de reflectancia en las bandas 4, y la mayor absorción en las bandas 5 y 6 (Fig. 5.9.).

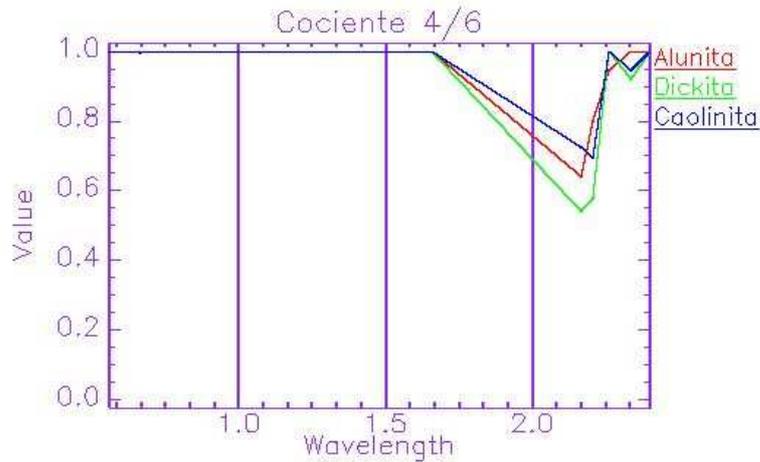


Fig. 5.9. Picos de absorción minerales de alteración ácida.

#### 5.4.2. Cociente 5/6

Con este cociente resaltaremos minerales que tienen sus mayores reflectancias en la banda 5 y como mayor absorción en la banda 6 (Fig. 5.10.), estas características espectrales presentan las arcillas como son la sericita, esmectita que son minerales guía para la zona de alteración filica o intermedia.

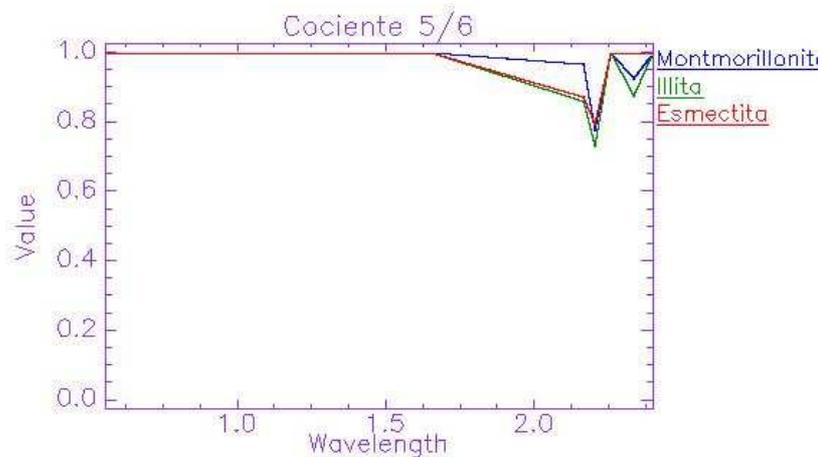
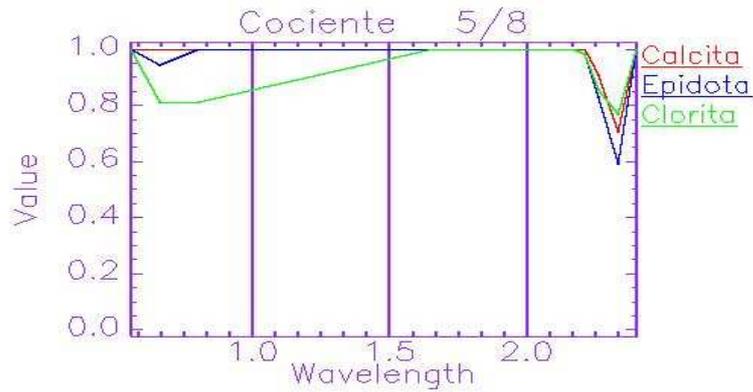


Fig.5.10. Picos de absorción de minerales de alteración intermedia.

#### 5.4.3. Cociente 5/8

Para realizar este cociente se sabe que los minerales típicos de la alteración propilítica tienen sus mayores reflectancias en la banda 5 y su mayor pico de absorción en la banda 8 (Fig. 5.11.), entonces podremos resaltar rocas con este tipo de alteración.



5.11. Picos de absorción de minerales de alteración propilítica.

#### 5.4.4. Combinación de cocientes

Al igual que una combinación entre bandas solas, también se combinan los cocientes teniendo como respuesta para este caso los tres tipos de alteración hidrotermal, la alteración ácida, intermedia y la propilítica representados por los colores rojo, verde y azul respectivamente.

En el área de trabajo la alteración propilítica resaltan en los Cerros Cunyac y Las Palanganas. Además obtendremos otros tres subtipos de alteración que vendrían a ser la combinación de las alteraciones, así por ejemplo la alteración ácida mas la intermedia estará representada por el color amarillo que en el área de trabajo sobresale en el Cerro La Fila. La combinación de las alteraciones intermedia y la propilítica será representada por el color cian, resaltando en el Cerro Alumbral y Cirato; finalmente en la zona sur la combinación de las alteraciones ácida y propilítica de color magenta que resalta en los Cerros El Perol, Las Astillas, Cinegal y Señal Pongo La Mesa (Fig. 5.12.).



## **5.5. ANALISIS DE PRINCIPALES COMPONENTES (PCA)**

Las siglas PCA provienen de su nombre en inglés PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS. Es una técnica matemática y es utilizada en diferentes ramas de la ciencia. Tiene como objetivo sintetizar una amplia información de variables en un grupo mucho menor pero sin perder información original.

El Análisis de Principales Componentes transforma la data multivariable en un nuevo sistema de coordenadas. Los ejes o principales componentes del nuevo sistema de coordenadas son combinaciones específicas lineales de la data original. Cada nuevo sistema de coordenadas es orientado perpendicularmente al anterior y en la dirección donde permanece la mayor densidad de datos (píxeles).

Cada componente principal resalta ciertos rasgos o características independientes una con respecto a otras, lo que nos permite discriminar la litología de la vegetación y las zonas de alteración (Choque, 2002).

La imagen de Análisis de Componentes Principales es el resultado de esta técnica matemática, tratando a cada banda como una componente principal, las cuales son seleccionadas para cada tipo de alteración.

### **5.5.1. Componente 1467 (Cuadro 5.1.)**

Representa a la alteración ácida, destacando en colores claros a la principal componente resultando después de los cálculos a la componente 7, representados por los minerales arcillosos.

Cuadro 5.1. Cálculo de las componentes principales 1467.

<b>Alteración Acida</b>	<b>PC1</b>	<b>PC4</b>	<b>PC6</b>	<b>PC7</b>
Banda 4	0.6871	-0.5793	-0.3436	-0.2722
Banda 6	-0.2894	-0.7620	0.3268	0.4783

### 5.5.2. Componente 1356 (Cuadro 5.2.)

Constituye el tipo de alteración intermedia, originando después del procesamiento la componente principal a la componente 6, que resalta a las arcillas.

Cuadro 5.2. Cálculo de las componentes principales 1356.

<b>Alteración Intermedia</b>	<b>PC1</b>	<b>PC3</b>	<b>PC5</b>	<b>PC6</b>
Banda 5	0.736276	-0.108198	0.465322	0.479235
Banda 6	-0.237348	-0.965297	0.053173	0.095083

### 5.5.3 Componente 1358 (Cuadro 5.3.)

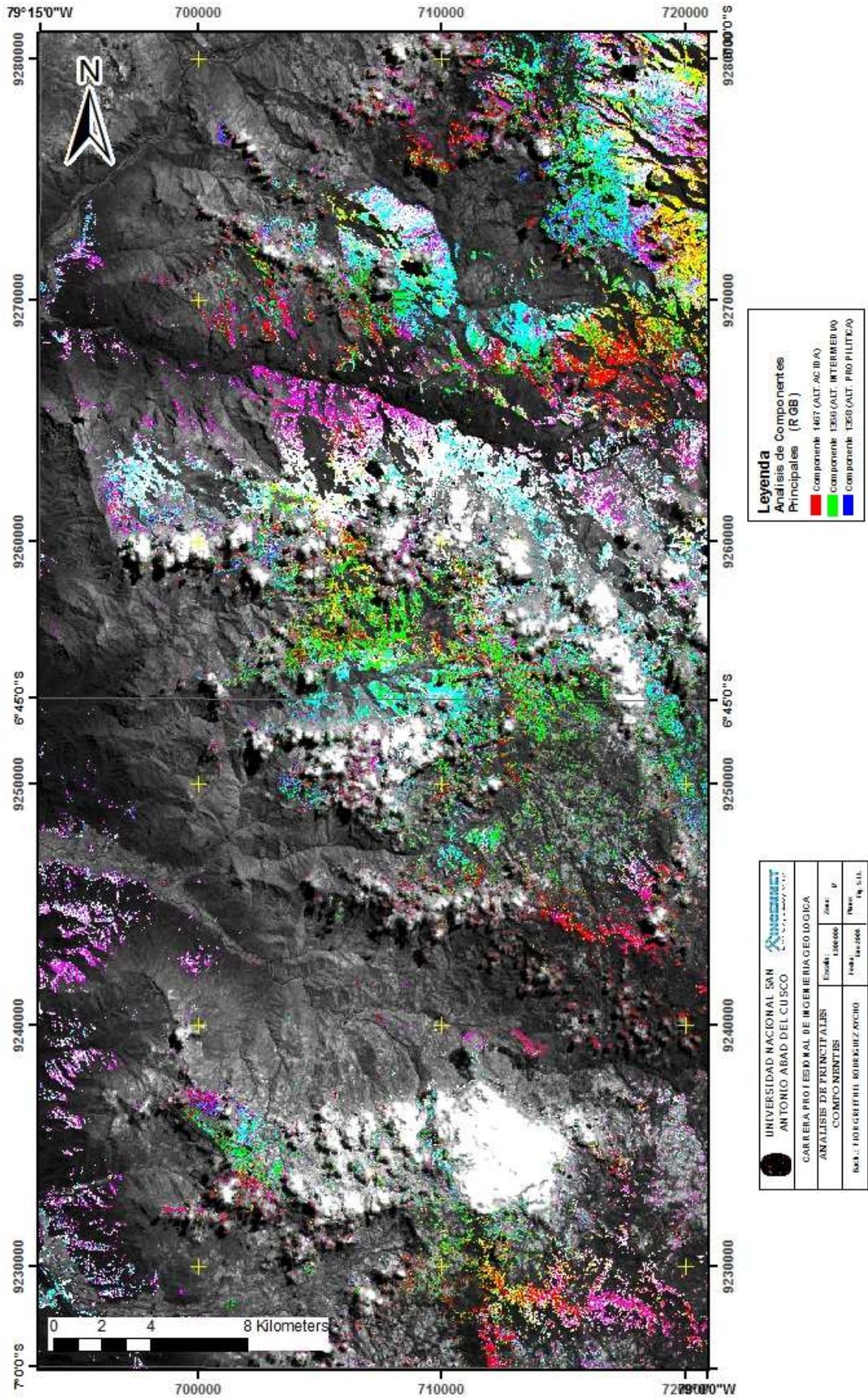
Representa la alteración básica y resulta como componente principal a la componente 8, es decir distingue a los minerales carbonatados.

Cuadro 5.3. Cálculo de las componentes principales 1358

<b>Alteración Básica</b>	<b>PC1</b>	<b>PC3</b>	<b>PC5</b>	<b>PC8</b>
Banda 5	-0.639807	0.236507	0.43559	0.587344
Banda 8	0.054768	0.006527	-0.773862	0.630948

Con estos resultados se puede conseguir la imagen de la figura 5.13., donde resaltan los tres tipos de alteración a partir de estos cálculos estadísticos; estos sugieren que hacia el norte del área de estudio entre los Cerros Cunyac, La Fila, Yuraccaca y Los Pircos se presenta una combinación entre las alteraciones intermedia y propilítica de color cian, así como también la combinación entre las alteraciones ácida e intermedia de color amarillo. En la zona central en el Cerro Pajonal la combinación de las alteraciones ácida y propilítica de color magenta, en el Cerro La Luchilla presenta alteración propilítica y en el Cerro Las Astillas se presentan la alteración ácida, esta última alojada en un depósito piroclástico del Centro Volcánico San Pedro (Cereceda, C., Com verbal).

En la zona sur sobresalen dos áreas de alteración en el Cerro El Perol. La alteración intermedia y más al sur cerca al Centro Volcánico Niepos se distingue la combinación de las alteraciones intermedia, propilítica y ácida en los Cerros Cinegal y Señal Pongo la Mesa.



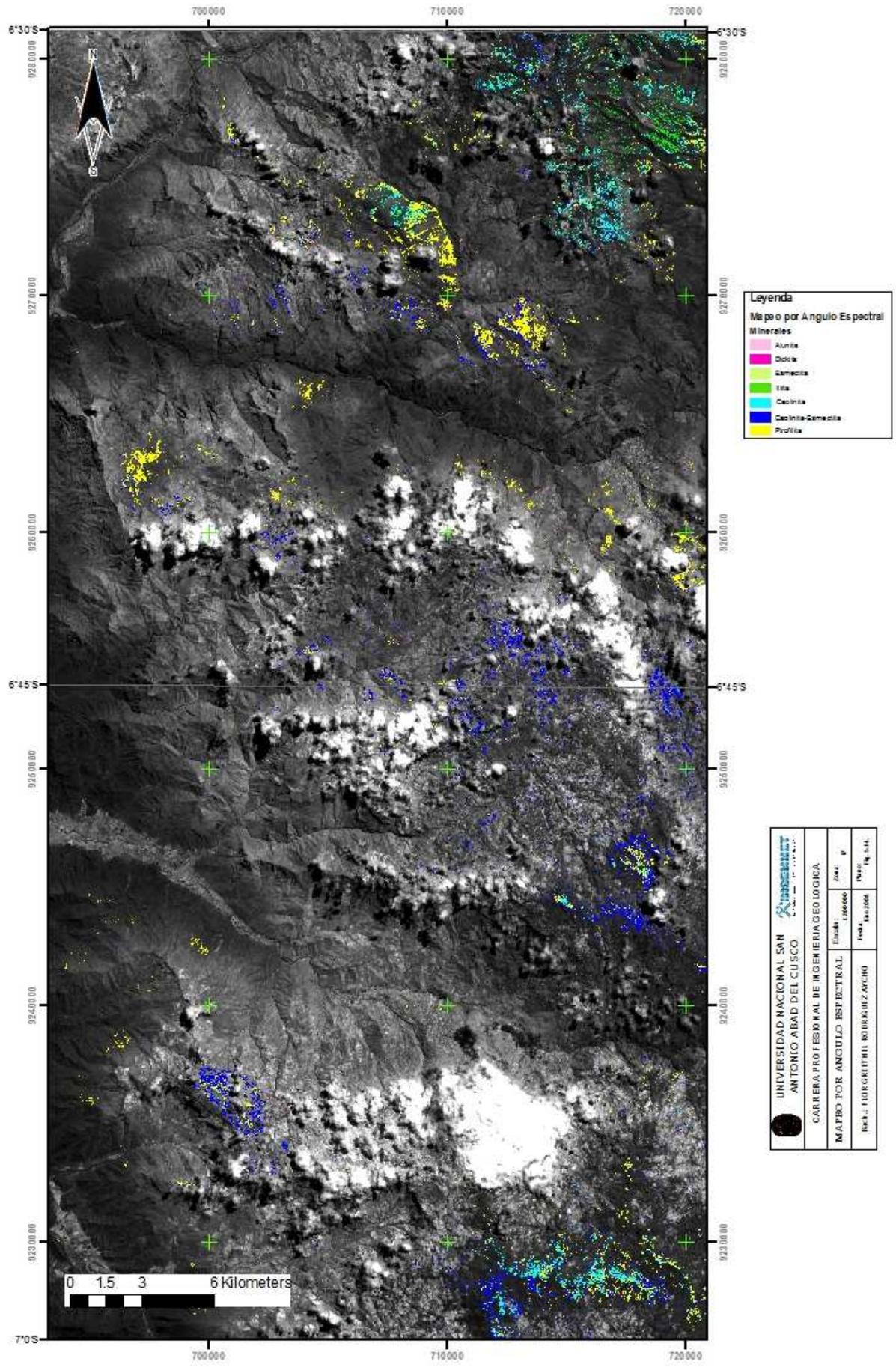
## **5.6. MAPEO POR EL ANGULO ESPECTRAL (SAM)**

Las siglas SAM proceden de su nombre en inglés SPECTRAL ANGLE MAPPER. A diferencia de las anteriores técnicas, a partir de esta veremos los algoritmos o método de análisis hiperespectral que nos servirán para la clasificación por minerales. Conocida como Spectral Angle Mapper (SAM), que viene a ser una clasificación supervisada que mide la similitud entre un espectro desconocido, con uno referencial  $r$ , en  $n$ -dimensiones. Estos espectros son tratados como vectores en  $n$ -espacios y el ángulo que forman entre sí se denomina "ángulo espectral"; este valor en radianes es asignado al píxel correspondiente en la imagen resultante SAM. Este método asume que los datos se han reducido a niveles de reflectancia aparente y utiliza sólo la dirección de los espectros, y no su longitud (Abrams & Hook, 2001).

Se cargó la librería con espectros de alunita tomados de las minas Yanacocha y Pierina con los cuales se obtienen resultados similares al de la comparación con la librería USGS, pero las firmas espectrales de las imágenes o los vectores tenían un parecido más cercano con los espectros de estos minerales.

En este caso se hizo la comparación del ángulo espectral entre los vectores de la imagen y la librería espectral de la USGS.

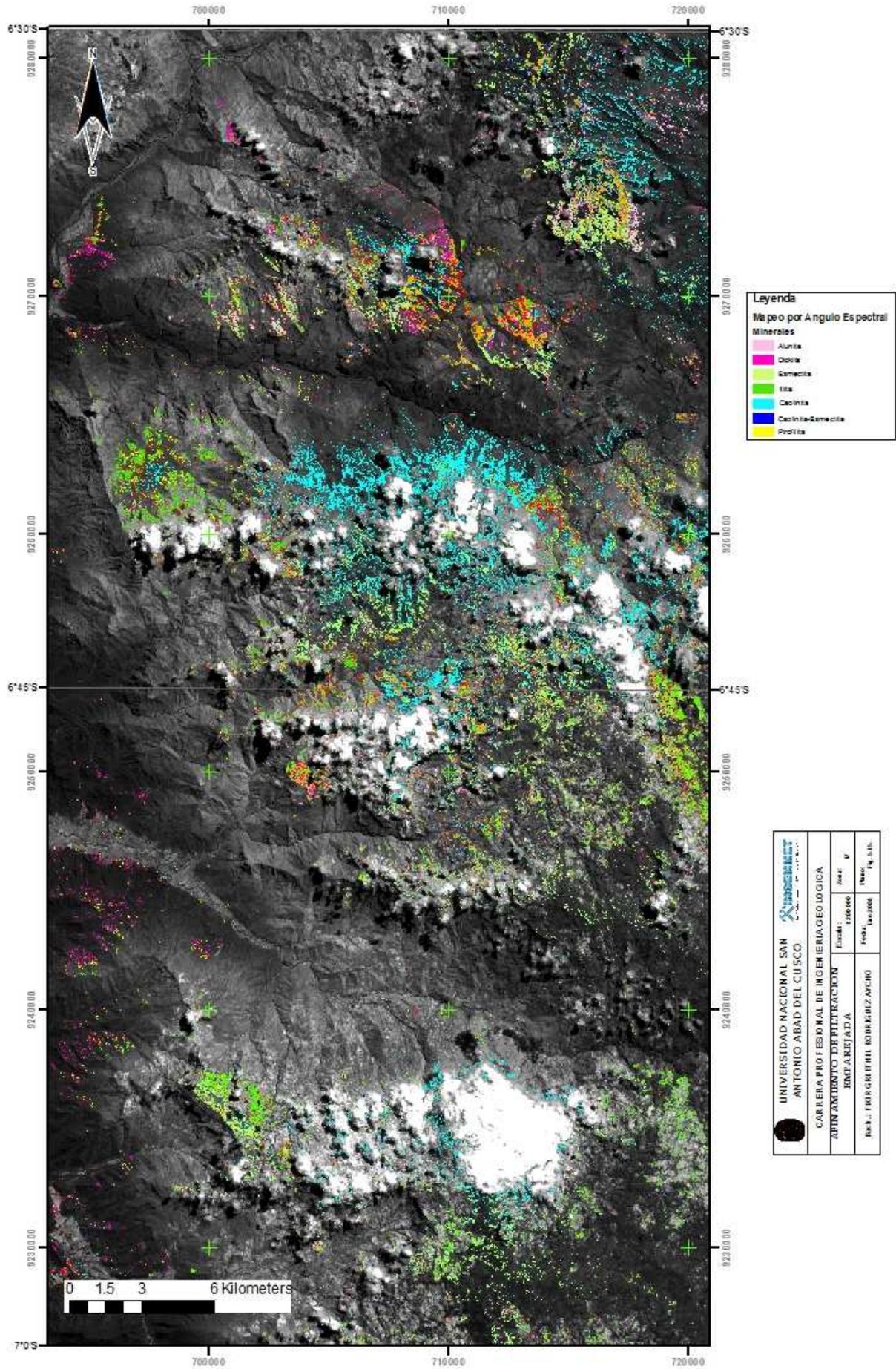
En el mapa de la figura 5.14. se resaltan minerales de alteración en la parte noreste de la zona de estudio como esmectita y caolinita en los Cerros de Cunyac y La Fila. En el cerro Yanaccaca se obtuvo esmectita-caolinita, mientras que en el cerro Los Pircos encontramos caolinita y esmectita. En el área central se encuentra en su mayoría minerales de esmectita, en el Cerro Las Astillas resaltaron minerales como caolinita. En el Cerro Pajonal también se distinguen minerales como esmectita y caolinita. Finalmente en la zona sur también se encuentran minerales como esmectita y caolinita.



## **5.7. AFINAMIENTO DE FILTRACIÓN EMPAREJADA (MTMF)**

Las siglas MTMF provienen de su nombre en inglés MIXTURE TUNED MATCHED FILTERING. Esta técnica es utilizada para la clasificación de minerales que consiste en un filtro que permite discriminar con mayor eficacia los valores extremos de los espectros, es decir emparejando los píxeles por un filtro (frecuencia intermedia) que no tienen mezclas con ruido. El MTMF ofrece una mejora en la frecuencia intermedia de los espectros, analiza una medida viable que se pueda utilizar para hacer la interpretación de las imágenes contando solo con la frecuencia intermedia más exacta.

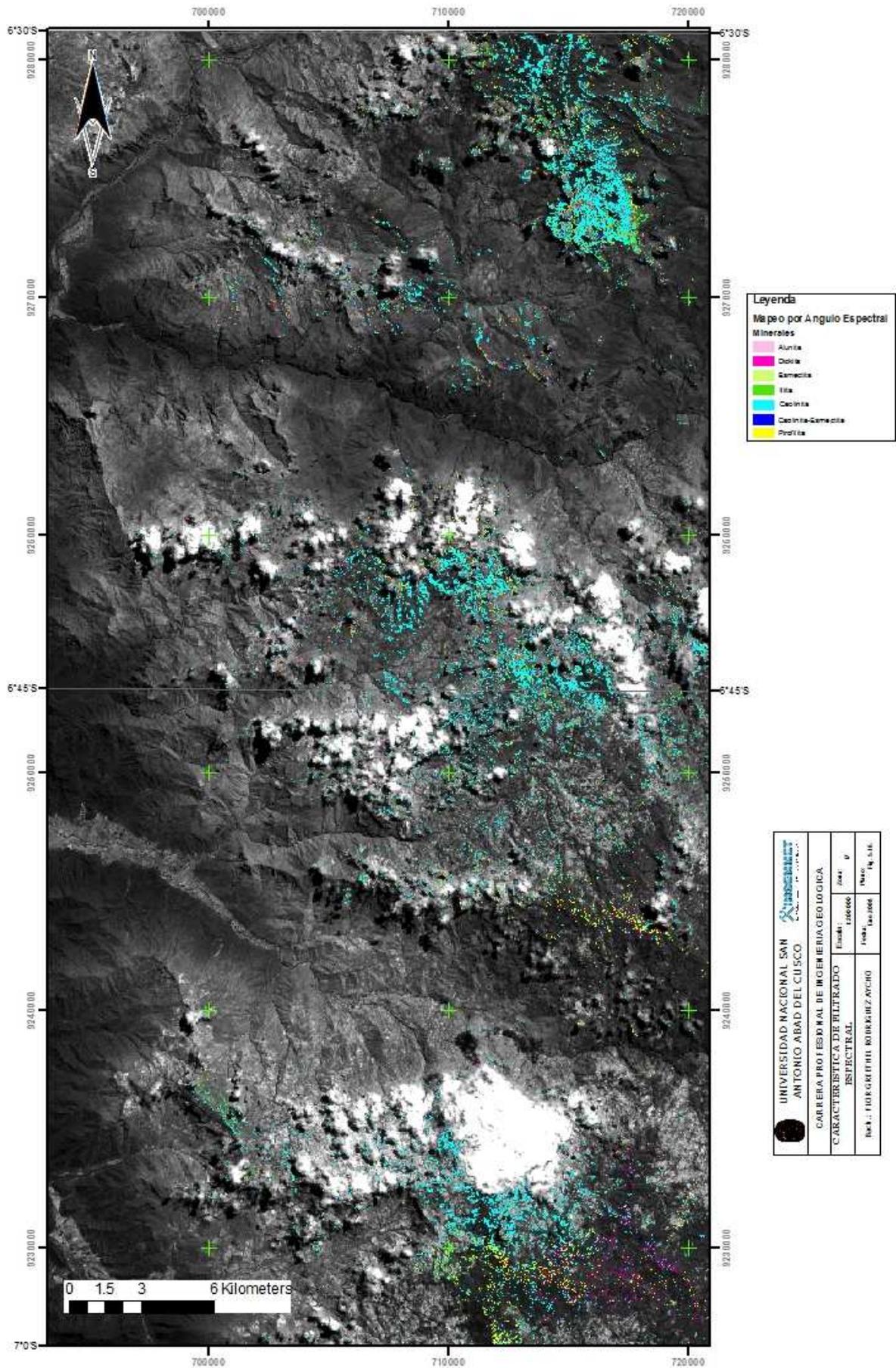
Resaltaron en el área de estudio (Fig. 5.15.), en la zona norte particularmente de los Cerros Cunyac y La Fila, donde en su mayoría la clasificación de minerales es de illita, esmectita y alunita. En el Cerro Los Pircos también se distinguen minerales como esmectita y caolinita, que pertenecen a la Secuencia Volcánica Chancay. También se puede resaltar en los Cerros Negro y Las Astillas, minerales como alunita y los ensambles de pirofilita, alunita y esmectita. En la zona sur, en el Cerro Señal Pongo La Mesa se observan minerales como alunita, illita, esmectita y dickita, mientras que en el Cerro El Perol resalta principalmente la illita.



## **5.8. CARACTERISTICA FILTRADO ESPECTRAL (SFF)**

Las siglas SFF provienen del nombre de esta técnica en inglés SPECTRAL FEATURE FILTERING (SFF). Este método de análisis hiperespectral, tiene el principio de la comparación de un material conocido y el desconocido de la imagen. Es un método característico basado en la absorción para emparejar espectros de la imagen a los espectros de referencia, este método requiere que los datos hayan sido corregidos por radiancia, de tal manera que quedaran una serie de características espectrales por absorción, habiendo removido previamente las curvas continuas. Utiliza la técnica de los mínimos cuadrados, generando una nueva imagen de clasificación.

Con menos resalte de zonas de alteración en comparación que las anteriores técnicas, se encuentran en la zona noreste del área de estudio. Este método resalta en el Cerro La Fila en su mayoría con minerales de esmectita e illita. En el Cerro Los Pircos resalta esmectita y pirofilita, mientras que en los Cerros Las Astillas y Cerro Negro resaltan minerales como diáspora, esmectita e illita. De la misma manera en la zona sur en el Cerro Señal Pongo La Mesa resaltan minerales principalmente como diáspora, esmectita e illita (Fig. 5.16.).



## **CAPITULO VI**

### **INTERPRETACION DE LAS ZONAS DE ALTERACION HIDROTERMAL**

---

#### **6.1. GENERALIDADES**

Para el análisis de áreas anómalas, se hizo uso también de una herramienta que ayudó con la identificación de los minerales de grano fino y/o definir sus variaciones de composición, que no pueden ser reconocidos a simple vista. En este caso se utilizó el Espectrómetro Portátil Infrarrojo de Onda Corta (PIMA), que específicamente se utilizó para la elaboración de una librería espectral a partir de las muestras de campo, esto para la etapa de validación de la técnica o técnicas de mapeo de zonas de alteración, motivo de estudio de la presente tesis.

Por consiguiente se determinará las zonas de alteración hidrotermal a partir de la interpretación de toda la información antes explicada como la geología, lineamientos, ocurrencias mineralógicas, prospectos, edades radiométricas y el mapeo de zonas determinadas por diferentes técnicas de clasificación de zonas anómalas mediante el uso de imágenes satelitales.

#### **6.2. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL ESPECTROMETRO PORTATIL INFRARROJO DE ONDA CORTA (PIMA)**

Este análisis es conocido como PIMA por sus siglas que provienen del inglés Portable Infrared Minerals Analyzer, es una herramienta de gran sustento para determinar minerales de grano fino o definir sus características en cuanto a composición con

exactitud, mediante el registro de sus firmas espectrales de los mismos. Este puede identificar tipo de arcillas, sulfatos y carbonatos de manera instantánea, convirtiendo a esta en un instrumento de gran ayuda a la hora de reconocer minerales de difícil determinación a simple vista, por lo que viene siendo utilizada en estos últimos años en la exploración minera. Este mide la reflectancia de los minerales solo en la región del infrarrojo de onda corta (SWIR) del espectro electromagnético, que abarca el intervalo de 1300 a 2500 nanómetros (1.3-2.5 micrómetros), teniendo como equivalente a las bandas B4, B5, B6, B7, B8 y B9 del sensor ASTER.

Por ser portátil tiene la ventaja de poder verificar en el mismo terreno, el contenido de minerales difíciles de identificar para su respectivo mapeo y poder definir las zonas de alteración.

El instrumento utilizado en el presente estudio para determinar los minerales de alteración es el fabricado por Integrated Spectronics Pty. Ltd de industria Australiana, posee una fuente de luz interna, permitiendo la obtención de datos de calidad. Posee un sistema de calibración interno que permite la adquisición de espectros confiables, cuyas características se resumen en el cuadro 6.1.

Cuadro 6.1. Características PIMA.

<b>Características</b>	<b>Contenido</b>
Intervalo de muestreo	2 nm
Resolución espectral	5-6 nm
Peso	3.5 Kg
Intervalo de medición	1300 - 2500 nanómetros
Capacidad de almacenaje	600 espectros
Señal/ Ruido	De 2500:1 (normal), 11500:1 (integraciones más altas)
Tiempo de adquisición	37seg (normal), 17seg (rápida) y 6 min (muestreos de calidad).

Los puntos de control definidos en gabinete como zonas de alteración hidrotermal fueron verificados en campo, tomando muestras respectivas en cada uno, las cuales se analizaron mediante el PIMA, este nos dará como resultado el espectro de cada muestra con el cual se descartara el tipo de arcilla o mineral muestreado.

Para el análisis con el PIMA, se deberá tener en cuenta que las rocas deben estar secas (Foto 6.1.), ya que este puede producir un error a la hora de definir el espectro ya que el espectro o firma espectral del agua también es definido por el PIMA, por lo que se recomienda secar las muestras antes del este análisis, para optimizar resultados.



Foto 6.1. Secado de muestras.

Para la toma de las firmas espectrales, fueron analizadas tomando varios puntos de captura de información en cada muestra y poder ponderar la muestra para dar un resultado promedio estableciendo el mineral o minerales que contienen cada una de las muestras.

### **6.3. ANÁLISIS DE REFLECTANCIA ESPECTRAL DE LAS ROCAS, MEDIANTE PIMA**

Como se menciona en el capítulo anterior, las bandas del SWIR son sensibles a ciertas moléculas y radicales incluyendo OH, H<sub>2</sub>O, NH<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub> y enlaces del catión OH tales como Al-OH, Mg-OH y Fe-OH.

Las variaciones químicas en la composición de los minerales pueden ser detectadas en tamaño y posición de las características de cada espectro, el cual cambia consistentemente por la sustitución de elementos. Estas son detectadas por cambios en la posición de las ondas o cambios en la forma del perfil o “hull” del espectro. Por ejemplo las variaciones químicas en el grupo de la alunita son manifestadas por cambios en la posición en esta parte de la región del espectro electromagnético, ya que tiene alta absorción en 1.480  $\mu\text{m}$ , variando sus valores picos según su composición, para el caso

del  $\text{NH}_4$  aproximadamente en 1.461  $\mu\text{m}$ , 1.478  $\mu\text{m}$  para K, 1.496  $\mu\text{m}$  para Na y 1.510  $\mu\text{m}$  para Ca.

La identificación de minerales se basa en la comparación espectral de los minerales de las muestras recolectadas en campo con la librería espectral base que se tiene, en este caso la librería MinDB, mediante el software PimaView 3.1 (Fig. 6.1.) que muestra los perfiles de las firmas espectrales identificados con el PIMA II, en el cual se evalúan sus características de intensidad de absorción y reflectancia. En la actualidad existen programas o software que realizan este análisis sin embargo los datos deben ser analizados afinadamente por el usuario, puesto que las ondas de diferentes minerales se superponen produciendo resultados inexactos basados en una sola característica de la curva del espectro; las cuales tendrán diferentes implicancias, en este caso en términos de la delimitación de las zonas de alteración hidrotermal, por errores de interpretación.



■ Firma Esmectita      ■ Firma Illita      ■ Firma Mineral Desconocido

Fig. 6.1. Determinación espectral de minerales, mediante comparación.

Los ensambles mineralógicos junto con otros datos de exploración son usados para establecer programas de exploración regional.

#### 6.4. MINERALES DE ALTERACIÓN HIDROTERMAL QUE CONTRIBUYEN EN LA REFLECTANCIA DE LAS ROCAS ALTERADAS

Los principales minerales que ayudan a la determinación de las zonas o aureolas de alteración hidrotermal, utilizados en el análisis de la presente investigación fueron: alunita, caolinita, dickita, esmectita, sericita, clorita, epidota e illita, cuyos espectros se pueden diferenciar gracias a la resolución espectral que cuenta el ASTER. Estas firmas espectrales son agrupadas debido a sus características de absorción y reflectancia, de acuerdo a las zonas de alteración, además de ser minerales guía para estas zonas de alteración, con los cuales se definen zonas de alteración ácida e intermedia. La nueva librería espectral conformada por firmas de minerales puros y ensambles de minerales, se muestran en la figura 6.2.

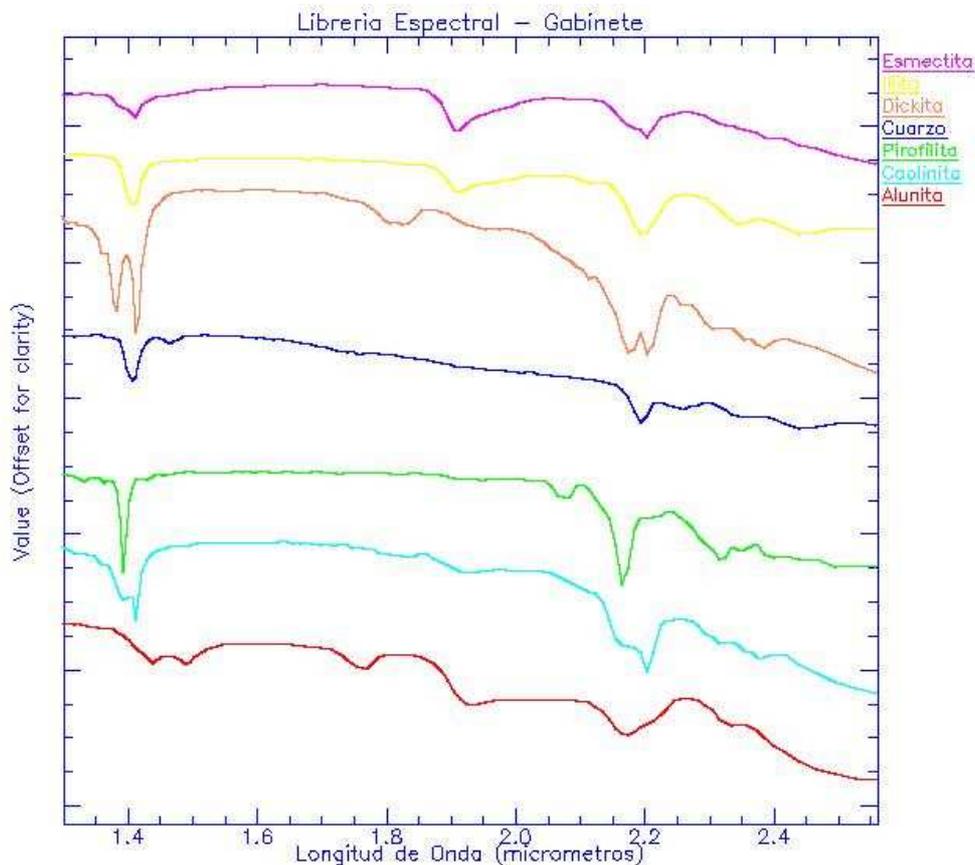


Fig. 6.2. Firmas espectrales de minerales de alteración hidrotermal, obtenidas a partir del PIMA.

#### 6.4.1. Alunita [ $KAl(OH)_6(SO_4)_2$ ]

Producto de alteración hidrotermal, la alunita se forma en presencia de vapores con soluciones de ácido sulfúrico, por lo cual es considerado un mineral guía de depósitos epitermales de alta sulfuración, sin embargo es posible encontrarla en yacimientos metalíferos epitermales de baja sulfuración. Presenta un pH de 2 a 4. Su reconocimiento espectral es único presentando fuertes absorciones entre la banda 5 y 6 y alta reflectancia en la banda 4 (Fig. 6.3.).

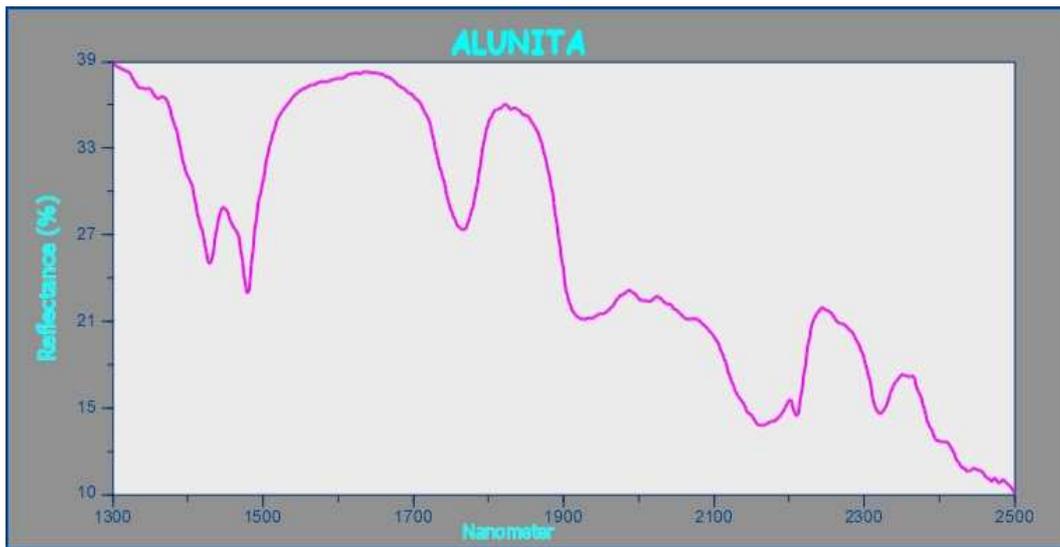


Fig. 6.3. Firma espectral de alunita tomada en campo.

#### 6.4.2. Caolinita [ $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ ]

Deriva de la acción de fluidos de pH moderadamente bajo (aproximadamente pH 4) y coexiste con la alunita en un rango de pH transicional (pH 3-4). La caolinita se forma a profundidades someras en condiciones de baja  $T^\circ$  (<150-200°C), mientras que la pirofilita se forma a profundidades mayores y a mayor temperatura. En un rango intermedio entre ambos se forma dickita. Sus valores de absorción se encuentran en la banda 6 y de máxima reflectancia en la banda 4 (Fig. 6.4.).

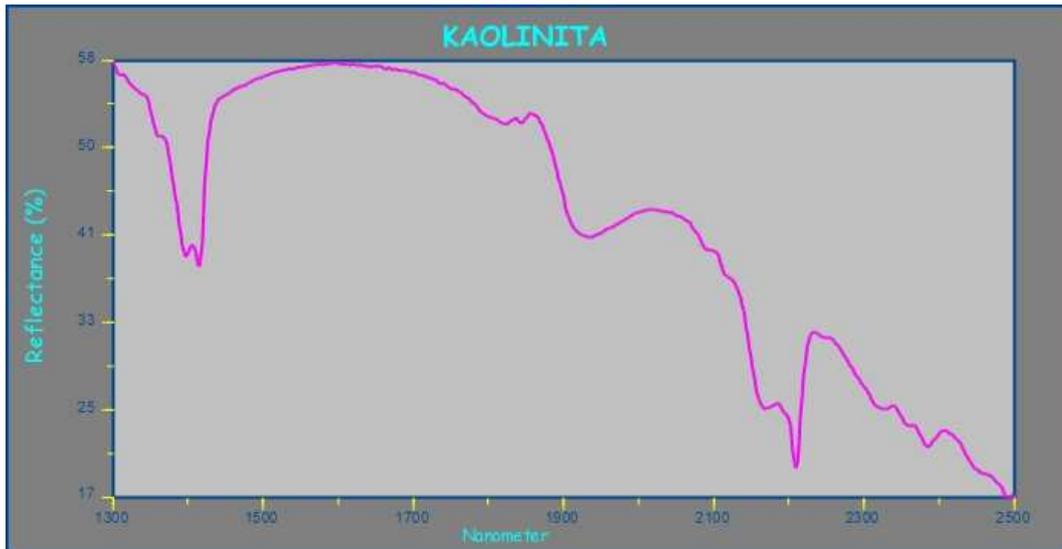


Fig. 6.4. Firma espectral de caolinita tomada en campo.

#### 6.4.3. Esmectita [(Na, Ca)<sub>3</sub>(Al, Mg)<sub>2</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>.nH<sub>2</sub>O]

Pertenece al grupo de las arcillas, es un mineral de baja temperatura que se forma entre 150°-200°C. Sus mayores valores de absorción se encuentran en 1.460 y 2.245 micrómetros (Fig. 6.5.), correspondiendo a las bandas 4 y 5.

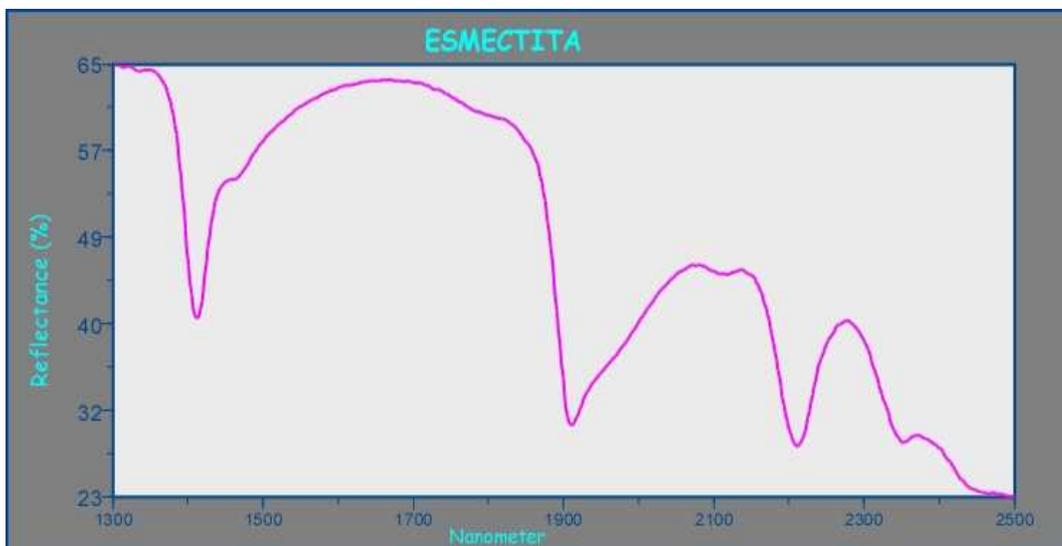


Fig. 6.5. Firma espectral de esmectita tomada en campo.

#### 6.4.4. Sericita [ $\text{K Al}_2 (\text{Si}_3\text{Al}) \text{O}_{10} (\text{OH},\text{Fe})_2$ ]

Es una moscovita de grano fino que puede contener algo de illita, en consecuencia es transicional entre la illita y la moscovita bien cristalizada. Los rasgos espectrales más importantes son la absorción entre 1.44 micrómetros y 2.2 micrómetros y 2.34 micrómetros y 2.42 micrómetros debido al radical oxidrilo ( $\text{OH}^-$ ), que corresponde a las bandas 5 y 6.

#### 6.4.5. Clorita [ $\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})_6\text{AlSi}_3 \text{O}_{10} (\text{OH})_8$ ]

Mineral que se forma como resultado de la alteración de los silicatos ferromagnesianos tales como biotitas. Su valor característico de absorción está en la banda 8 es decir entre 2.295-2.365 micrómetros, y su máxima reflectancia se da en la banda 5 que abarca la región entre los 2.145-2.185 micrómetros (Fig. 6.6.).

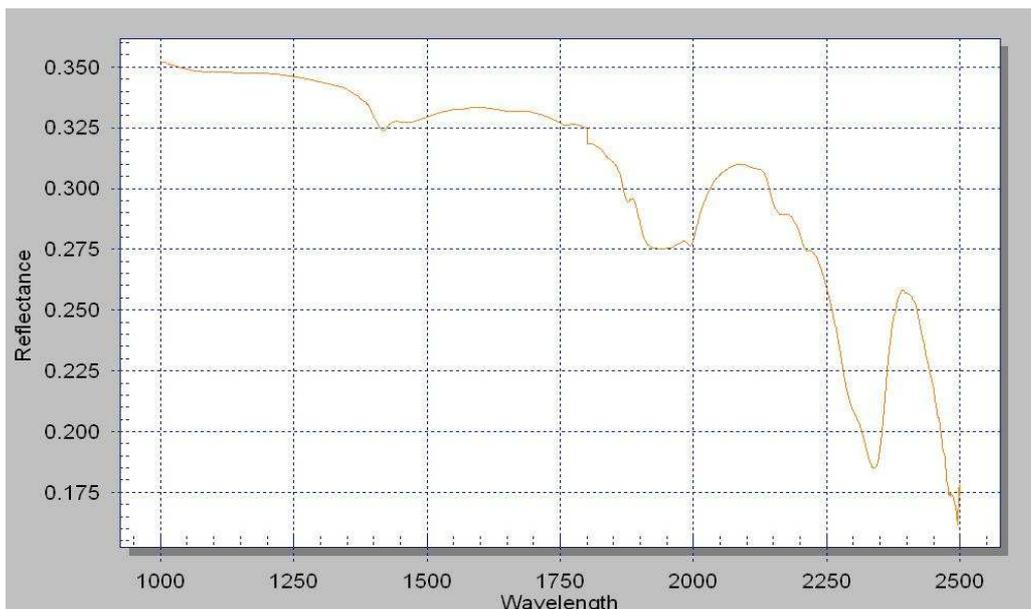


Fig. 6.6. Firma espectral de la clorita

#### 6.4.6. Epidota [ $\text{Ca}_2 (\text{Fe}^{3+}, \text{Al}) (\text{SiO}_4)_3 (\text{OH})$ ]

Mineral procedente de la alteración de silicatos aluminico cálcicos y también cristalizada directamente del magma. Al igual que la clorita presenta valores de reflectancia en la banda 5 y alta absorción en la banda 8.

#### 6.4.7. Illita [ $K_2 Al_4 (Si_7 Al_2 O_2 n(OH)_4)$ ]

Proporciona información acerca de ambientes de bajas temperaturas. Presenta absorciones debidas al contenido de Al-OH en 2.35 y 2.45 micrómetros (Fig. 6.7.), los cuales la diferencian de la montmorillonita.



Fig. 6.7. Firma espectral de la asociación illita colinita, tomadas en campo.

### 6.5. INTERPRETACIÓN ESPECTRAL DE ALTERACIONES HIDROTERMALES

Con los espectros obtenidos a partir de las muestras analizadas por el espectrómetro portátil (PIMA) y la posterior elaboración de la nueva librería espectral se analizaron nuevamente las imágenes mediante el software ENVI y la nueva librería espectral elaborada a partir de 220 muestras de campo (Cuadro 6.2.). Con este ajuste se obtuvieron los mapas de alteración por zonas determinando principalmente alteraciones ácidas e intermedias tanto con la técnica de ratios (Fig. 6.8.), como del Análisis de Componentes Principales (Fig. 6.9.). Los resultados de esta técnica con la nueva librería espectral, sugieren que hacia el norte del área de estudio entre los cerros Cunyac y La Fila se presenta una combinación entre las alteraciones intermedia y propilítica, así como también la combinación entre las alteraciones ácida e intermedia. En la zona central entre los Cerros Pircos y Astillas se presentan la combinación de las alteraciones intermedia, propilítica y ácida, esta última alojada en un depósito piroclástico del Centro

Volcánico San Pedro, más al sur cerca al Centro Volcánico Niepos se distingue la combinación de las alteraciones intermedia, propilítica y ácida en el cerro Cinegal.

Para las técnicas de clasificación por minerales se obtuvieron nuevos resultados por las técnicas: Mapeo por Angulo Espectral (Fig. 6.10.), Afinamiento de filtración emparejada (Fig. 6.11.) y finalmente con la técnica de filtrado por características espectrales (Fig. 6.12.).

Finalmente con los mapas de lineamientos, litología, dataciones, ocurrencias mineralógicas y datos de campo, se han establecido mediante las técnicas de mapeo como el Análisis de Componentes Principales (PCA) y las de mapeo de clasificación supervisada por mineral como Mapeo de Angulo Espectral (SAM) y Afinamiento de Filtración Emparejada (MTMF), como las técnicas validas para la determinación de las zonas de alteración.

## **6.6. ÁREAS QUE PRESENTAN ALTERACIÓN HIDROTERMAL**

A continuación se describen las zonas que fueron detectadas como zonas de alteración hidrotermal mediante el análisis de datos ASTER y que fueron corroboradas en campo.

Para la técnicas de clasificación por minerales no se logró separar los espectros por minerales individuales, realizando las clasificaciones por asociaciones de minerales de alteración que son importantes para entender y poder interpretar las zonas de alteración, logrando usar esta información en la exploración de depósitos mineros hidrotermales.

Cuadro 6.2. Relación de muestras analizadas con el PIMA.

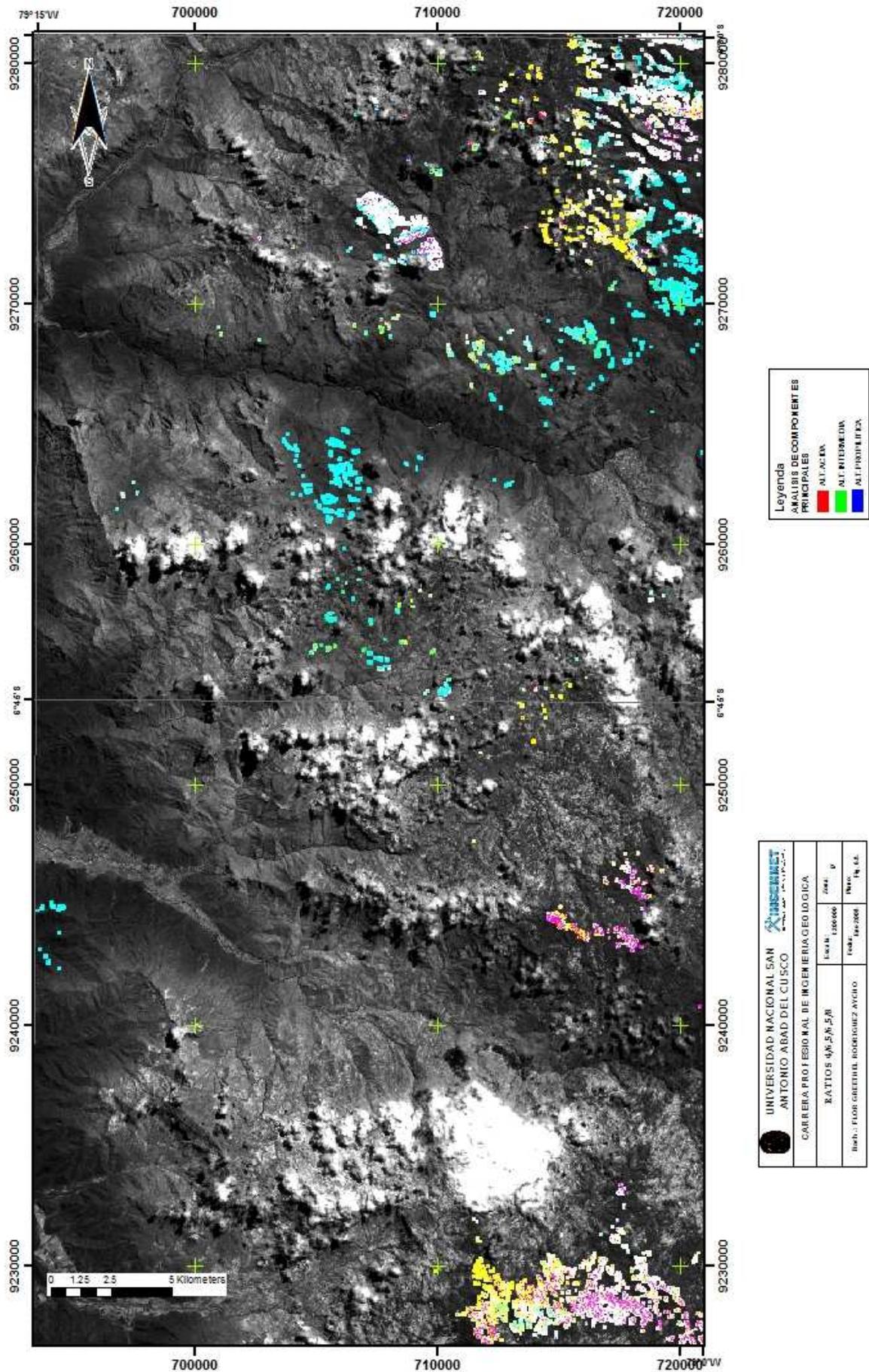
Sample_Id	qz	k-al	n-al	rfct	pyr	dias	kao	dk	ill	sm	ser	jar	cac	chl	ep	sc	FeOx	NH4	Other	ENSAMBLE	CONDICIONANTE	ALTERACION	ESTE	NORTE	
LI-0108-001										3										sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	716013	9273122	
LI-0108-002										3											sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	716041	9273136
LI-0108-003							3														kao-	ill-sm-kao-qz	Argilica	716189	9273100
LI-0108-004							3														kao-	ill-sm-kao-qz	Argilica	716195	9273105
LI-0108-005										3											sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	716191	9273110
LI-0108-007									1	2											sm-	ill-sm-kao-qz	ARGILICA	716557	9272776
LI-0108-008	1									3											qz-sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	716557	9272776
LI-0108-009										3											sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	716553	9272704
LI-0108-010										3											sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	716624	9272590
LI-0108-011	1									3											qz-sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	716743	9272606
LI-0108-012										3											sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	716961	9272600
LI-0108-013	1									3											qz-sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	717202	9272772
LI-0108-015										3											sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	716029	9274010
LI-0208-002										1											sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	713525	9275236
LI-0208-003							1			3											sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	713233	9275134
LI-0208-005	1									2											qz-sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	714460	9274305
LI-0308-001	1									3											sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	718778	9277753
LI-0308-002										3											sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	718742	9277672
LI-0308-003	1									3											kao-	ill-sm-kao-qz	Argilica	718768	9277516
LI-0308-004							1			3											kao-	ill-sm-kao-qz	Argilica	719529	9276589
LI-0308-005							1			3											sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	719725	9276479
LI-0308-007							1		3												ill-	ill-sm-kao-qz	Argilica	719844	9276646
LI-0308-008									1	3											qz-sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	719825	9276815
LI-0308-009										2											sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	719845	9276997
LI-0308-010										3											sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	719846	9277021
LI-0308-011									1	3											qz-sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	720203	9277162
LI-0308-012							3			1											sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	720193	9277438
LI-0308-013							3														qz-sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	720238	9277507
LI-0308-014							2			2											sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	720325	9277548
LI-0308-015										3											sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	719493	9278012
LI-0308-016										3											sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	719395	9278028
LI-0308-017										3											qz-sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	719193	9278154
LI-0308-018							3														kao-	ill-sm-kao-qz	Argilica	717318	9278267
LI-0308-019							3														kao-	ill-sm-kao-qz	Argilica	715797	9278850
LI-0408-001							3														kao-	ill-sm-kao-qz	Argilica	707740	9272949
LI-0408-002										2											sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	708075	9272952
LI-0408-003							3														kao-	ill-sm-kao-qz	Argilica	708135	9273072
LI-0408-004							3														kao-	ill-sm-kao-qz	Argilica	708327	9273269
LI-0408-006							3														kao-	ill-sm-kao-qz	Argilica	708539	9272667
LI-0408-007		3																			al-	qz-al-dk-pyr	Argilica Avanzada	708699	9273189
LI-0408-008							3														kao-	ill-sm-kao-qz	Argilica	708879	9273501
LI-0408-009			3																		al-	qz-al-dk-pyr	Argilica Avanzada	708648	9273834
LI-0408-010		3					1														al-	qz-al-dk-pyr	Argilica Avanzada	708400	9273908
LI-0408-011		3					1														al-	qz-al-dk-pyr	Argilica Avanzada	708378	9273917
LI-0408-012							3														kao-	ill-sm-kao-qz	Argilica	707919	9274187
LI-0408-013							3														kao-	ill-sm-kao-qz	Argilica	707298	9273500
LI-0408-014							2		2												kao-ill-	ill-sm-kao-qz	Argilica	707224	9273511
LI-0408-015		3		1478																	al-	qz-al-dk-pyr	Argilica Avanzada	707054	9273330
LI-0508-001										3											sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	714142	9279876
LI-0508-002							3			2											kao-sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	714714	9279846
LI-0508-003							3														kao-	ill-sm-kao-qz	Argilica	713997	9280013

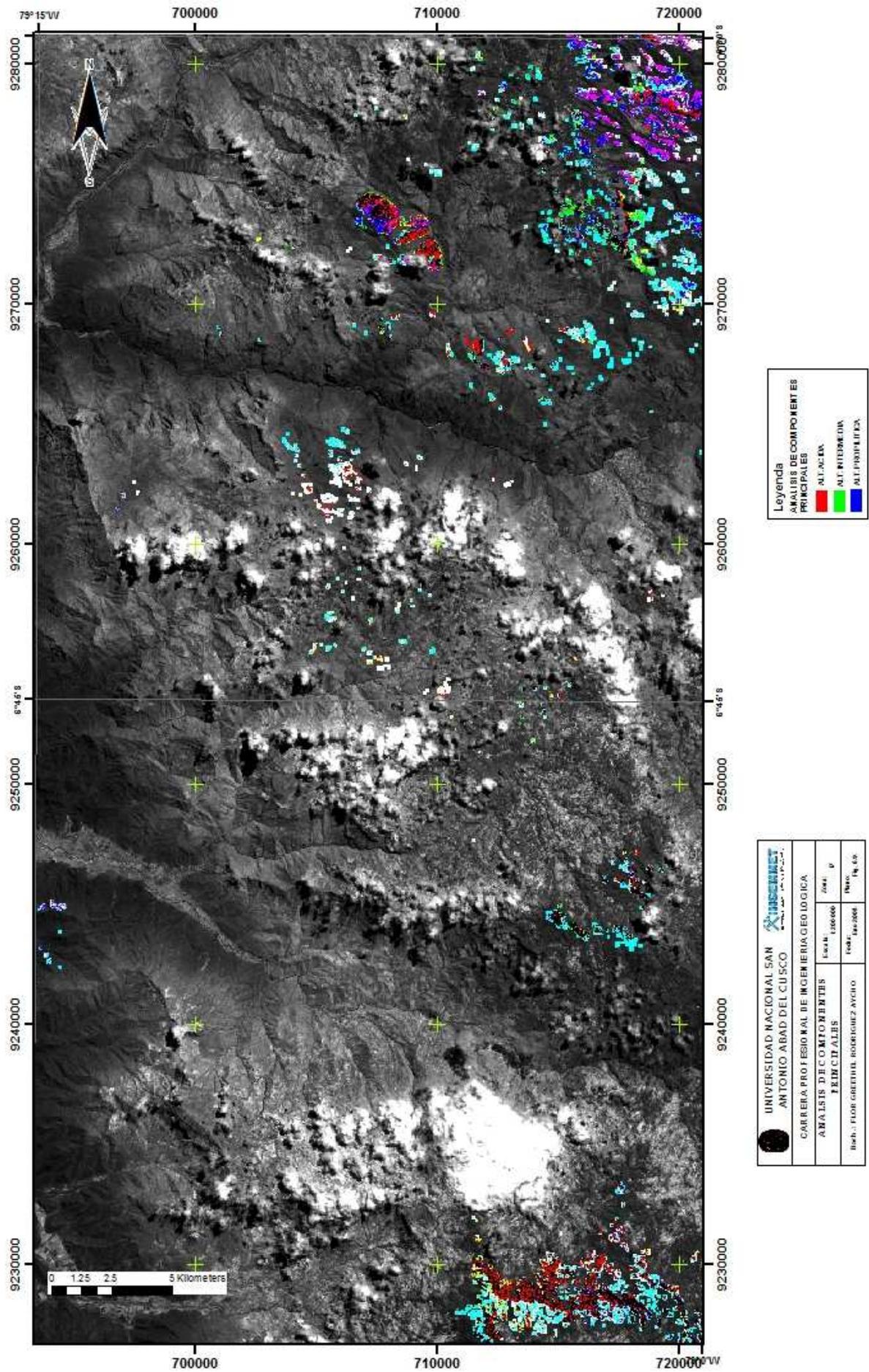




*Determinación de zonas de Alteración Hidrotermal mediante imágenes ASTER, oeste de Cajamarca*

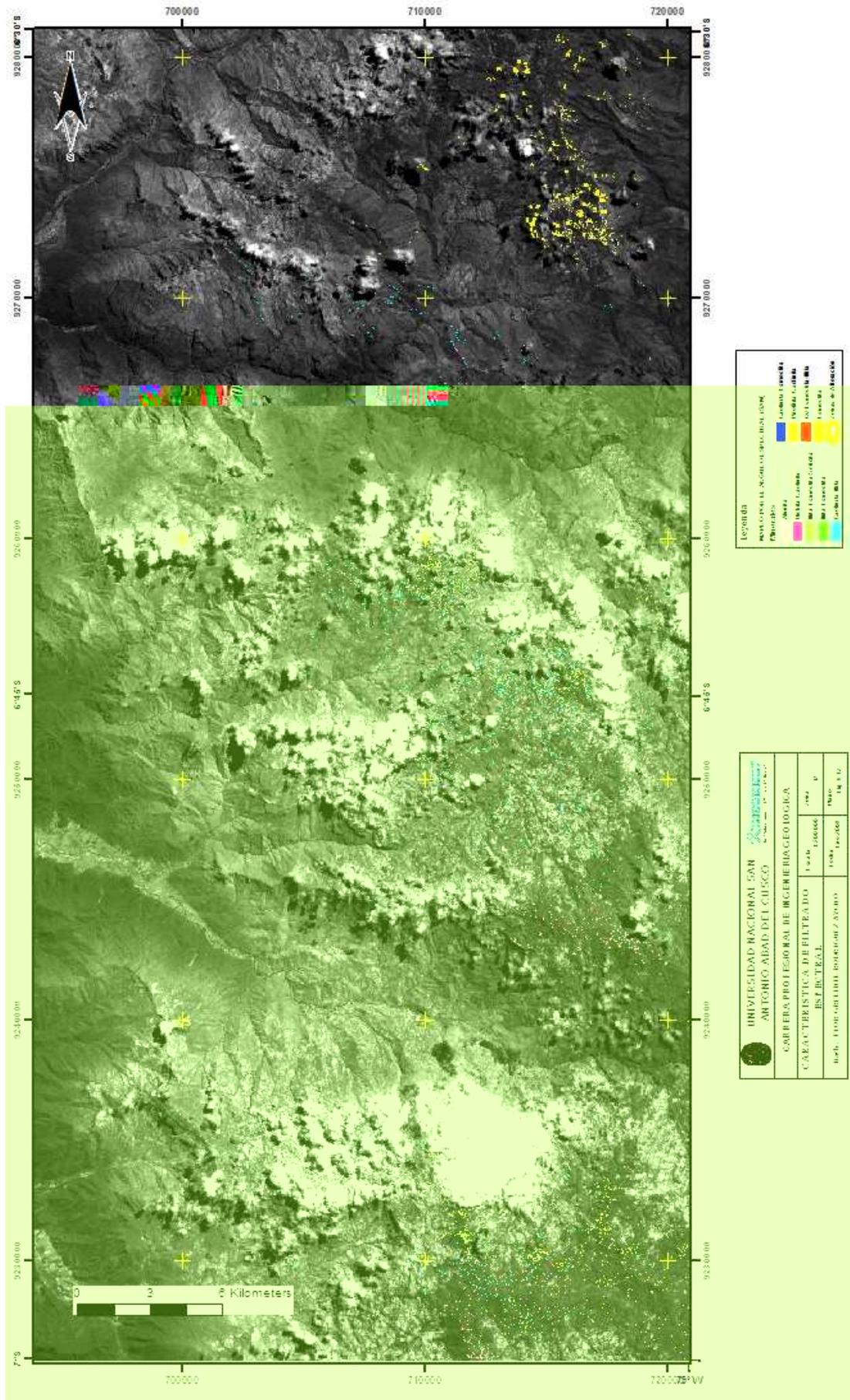
Ni-3107-010																			sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	711708	9267456
Ni-3107-011							1												sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	711821	9267398
Ni-3107-012								1											sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	711829	9267399
Ni-3107-013								2											ill-sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	711913	9267424
Ni-3107-014																			sm-ser	ill-sm-kao-qz	Argilica	711929	9267421
Ni-3107-015																			sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	712483	9267307
Ni-3107-017																			sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	713075	9267000
Ni-3107-018																			kao-	ill-sm-kao-qz	Argilica	713117	9266969
Ni-3107-019																			ill-sm-	ill-sm-kao-qz	Argilica	713262	9266911











### **6.6.1. Cerro Señal Pongo La Mesa**

El acceso a esta área (Foto 6.2.), es mediante la trocha carrozable Tembladera-El Prado-Agua Blanca-Niepos. Sus coordenadas UTM son: 9226766N, 712098E, donde afloran flujos piroclástico rico en cristales de plagioclasa y piroxenos de color gris verdoso los cuales están cerca de un domo andesítico porfirítico.

El área presenta alteración hidrotermal principalmente argílica a argílica avanzada (Foto 6.3. y 6.4.), las cuales fueron identificadas tanto en campo como en gabinete. Los principales ensambles en esta área son: alunita-caolinita; pirofilita-caolinita, caolinita-esmectita, illita-esmectita.

Se obtuvo el mapa de la figura 6.11. en el cual se puede apreciar los minerales y ensambles de minerales de alteración que se validaron en campo.



Foto 6.2. Cerro Señal Pongo La Mesa.



Foto 6.3. Vetillas tipo stockwork, cerro Señal Pongo la Mesa (Niepos).



Foto 6.4. Vetillas de cuarzo con pirita diseminada (Cerro Señal Pongo la Mesa).

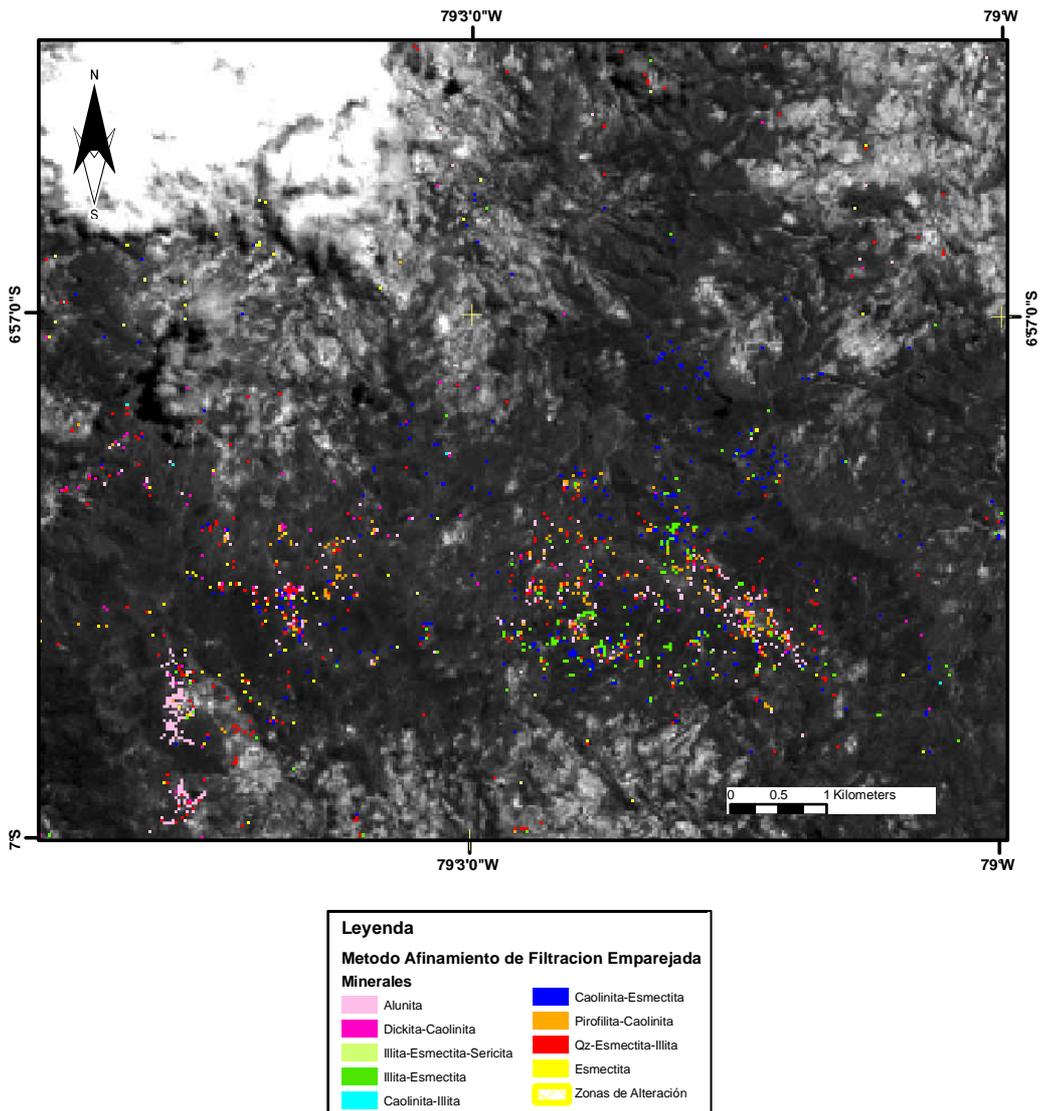


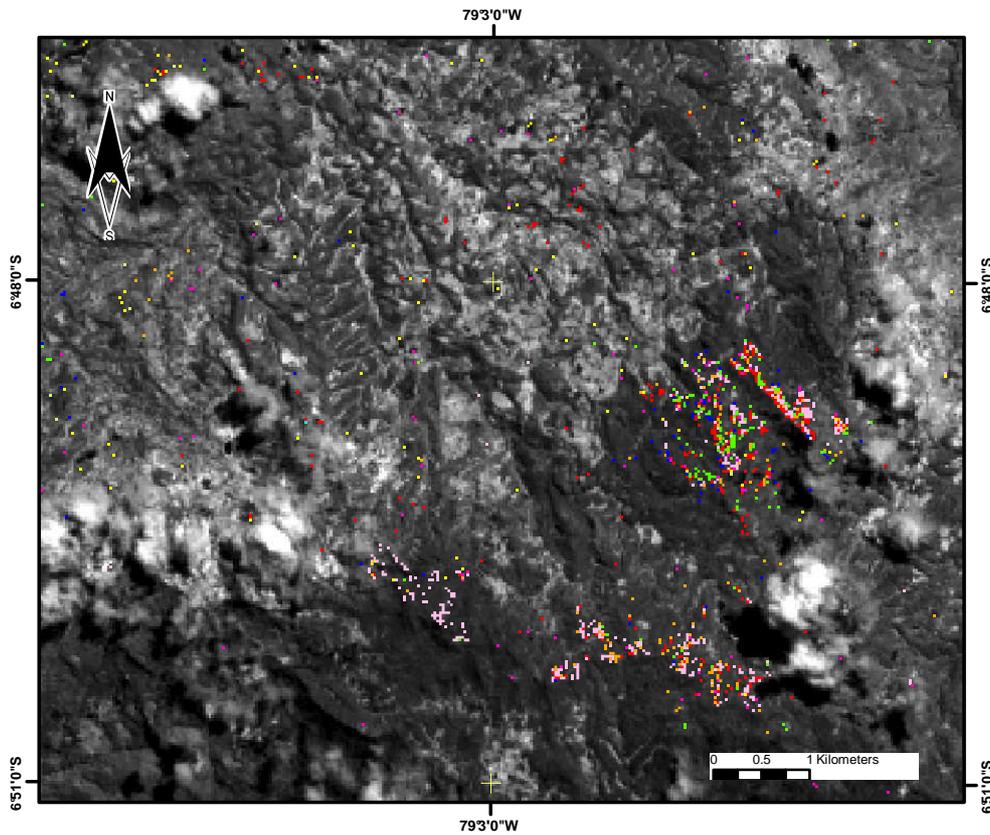
Fig. 6.11. Clasificación por minerales con técnica MTFM (Cerro Señal Pongo la Mesa).

### 6.6.2. CERRO LAS ASTILLAS

Para poder llegar a esta área se toma la carretera Chiclayo-El Espinal-Udima-Cerro Negro. Las principales alteraciones que se pudieron reconocer son las definidas como alteración ácida, que representan a las alteraciones argílica y argílica avanzada, representada por el ensamble alunita, caolinita-esmectita, resaltados en los Cerros Las Astillas (Foto 6.5.) y Negro (Fotos 6.5. y 6.6.) y minerales como alunita, y los ensambles de pirofilita-caolinita, illita-esmectita (Fig. 6.12.), los cuales se encuentran en estructuras de orientación N120°.



Foto 6.5. Cerro Las Astillas y Cerro Negro mostrando alteración hidrotermal. vista al sureste.



Leyenda	
Metodo Afinamiento de Filtracion Emparejada	
Minerales	
Alunita	Caolinita-Esmectita
Dickita-Caolinita	Pirofilita-Caolinita
Illita-Esmectita-Sericita	Qz-Esmectita-Illita
Illita-Esmectita	Esmectita
Caolinita-Illita	Zonas de Alteración

Fig. 6.12. Clasificación por minerales, por la técnica MTMF (Cerro Las Astillas).



Foto 6.6. Estructura con minerales de alteración, Cerro Negro.

### **6.6.3. CERRO LOS PIRCOS**

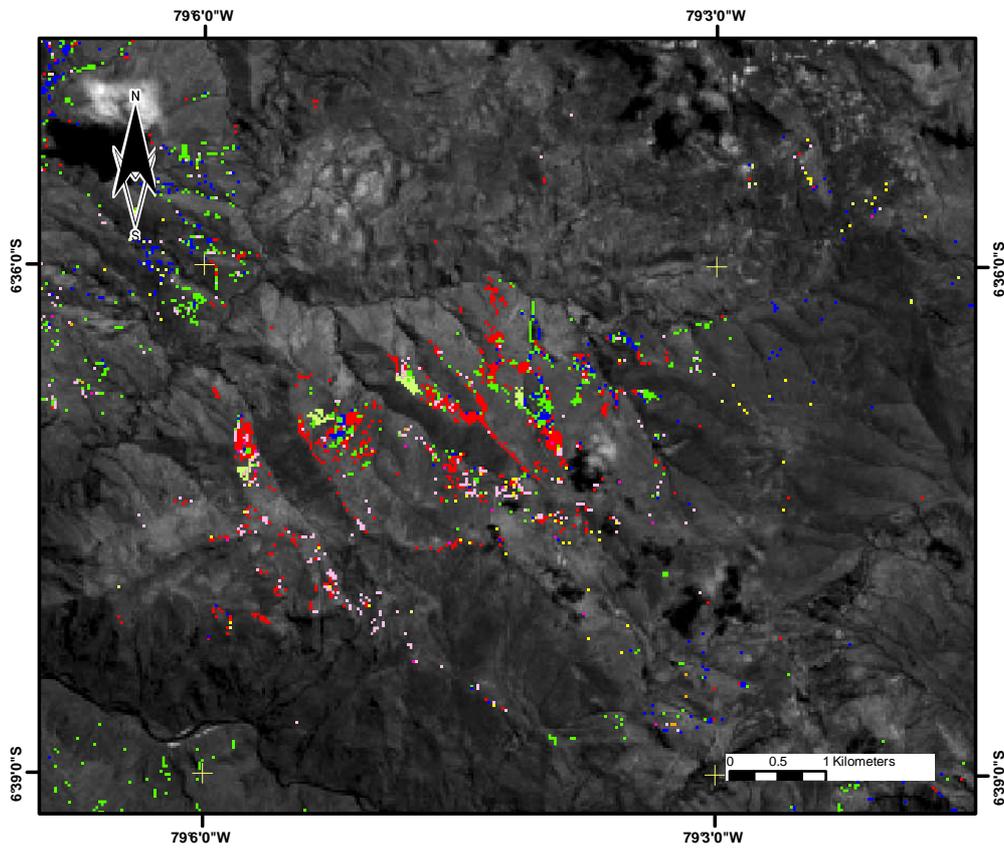
Para llegar al cerro Los Pircos, se toma la carretera Chiclayo-Santa Cruz y se sigue el desvío hacia el poblado de Corral Viejo, Sexi tomando el desvío hacia Proyecto Los Pircos por el puente Lipor.

Las anomalías espectrales que se determinaron en el Cerro Los Pircos (Foto 6.7.) coinciden con el proyecto minero del mismo nombre, tiene como ensamble mineralógico el cuarzo-sericita-adularia, de los cuales se pudieron definir en gabinete como una alteración intermedia y mediante la clasificación supervisada se obtuvieron minerales como la esmectita, caolinita y los ensambles illita-esmectita-sericita, cuarzo-esmectita-illita (Fig. 6.13.) que pertenecen a la Secuencia Volcánica Chancay.

El Proyecto Los Pircos está definido como un yacimiento epitermal del tipo baja sulfuración (LS) (Foto 6.8.), junto con otros prospectos como Las Astillas, Corrales, Diablo Rojo, Paredones, Coshuro, Huayquisongo, etc. El mayor número de yacimientos epitermales del tipo LS reconocidos se ubican a lo largo de una franja regional de mineralización relacionado al sistema estructural andino NO –SE (Enriquez, 2004), esta franja dominaría una parte del área de estudio encontrando a los prospectos Los Pircos y



Foto 6.7. Vista panorámica del Cerro Los Pircos, vista al norte.



Leyenda	
<b>Metodo Afinamiento de Filtracion Emparejada</b>	
<b>Minerales</b>	
Alunita	Caolinita-Esmectita
Dickita-Caolinita	Pirofilita-Caolinita
Illita-Esmectita-Sericita	Qz-Esmectita-Illita
Illita-Esmectita	Esmectita
Caolinita-Illita	Zonas de Alteración

Fig. 6.13. Clasificación por minerales determinada por la técnica MTFM (Cerro Los Pircos).

Las Astillas, cuyos lineamientos fueron definidos mediante las técnicas del modelo de sombras (Shade Relief) y pendientes (Aspect), concuerdan con las estructuras mineralizadas principales de orientación NO-SE (Vetas Diana Amelia, Lesly y Rosa Victoria).



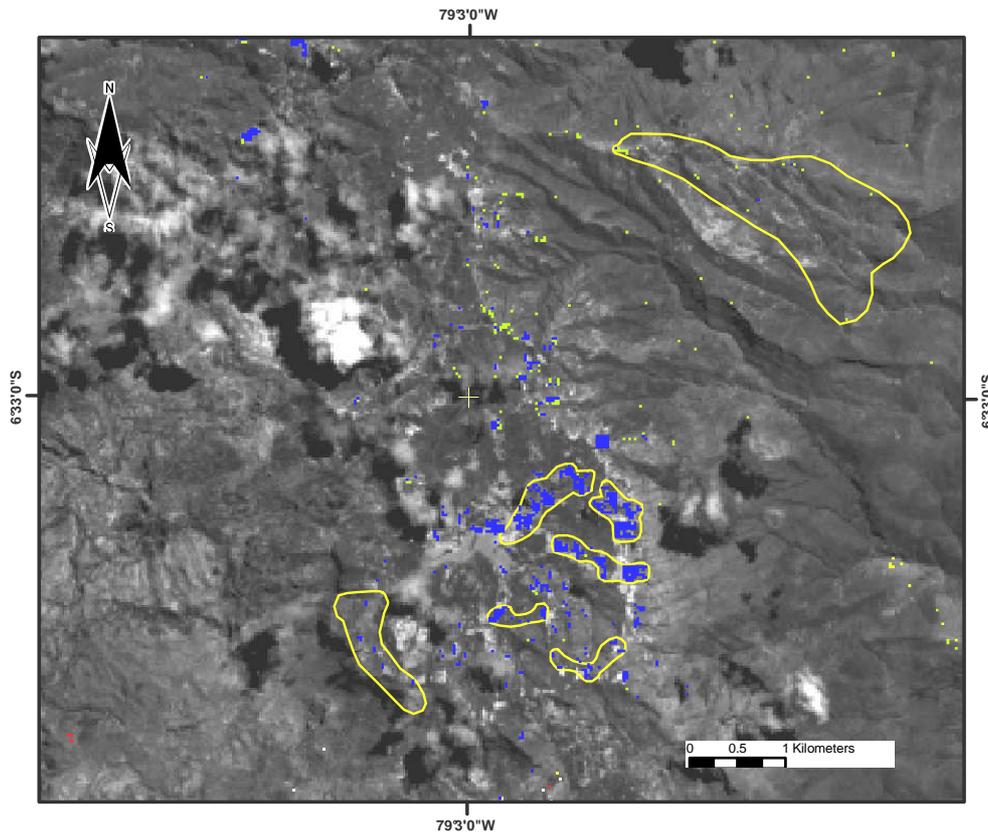
Foto 6.8. Veta mineralizada en el Proyecto Los Pircos, vista al noroeste.

#### **6.6.4. CERRO LA FILA**

En la zona norte del área de trabajo, particularmente en el Cerro Cunyac-poblado Sexi (Foto 6.9.), se distingue mayormente la clasificación de minerales de los ensambles de illita-esmectita, caolinita-esmectita (Fig. 6.14.), que concuerdan con la zona de alteración intermedia determinada por la técnica PCA.



Foto 6.9. Alteración hidrotermal en la localidad de Sexi, vista al sureste



Leyenda	
Metodo Afinamiento de Filtracion Emparejada	
Minerales	
Alunita	Caolinita-Esmectita
Dickita-Caolinita	Pirofilita-Caolinita
Illita-Esmectita-Sericita	Oz-Esmectita-Illita
Illita-Esmectita	Esmectita
Caolinita-Illita	Zonas de Alteración

Fig. 6.14. Clasificación por minerales, determinada por la técnica MTMF (Cerro La Fila).

## **CONCLUSIONES**

---

- En la zona de estudio se diferenciaron las unidades geomorfológicas locales como piso de valle, laderas, montañas y mesetas. Estas unidades se encuentran dentro de la gran unidad geomorfológica regional Cordillera Occidental.
- La estratigrafía del área de estudio presenta afloramientos desde el Mesozoico hasta el cuaternario. Las unidades estratigráficas comienzan con la Formación Tinajones, conformada por lutitas y cuarcitas; seguida del Grupo Goyllarisquizga, representado por intercalaciones de areniscas, lutitas y calizas; luego siguen las formaciones Chúlec, Pariatambo y grupos Pulluicana y Quilquiñan, que se caracterizan por presentar rocas carbonatadas como son las calizas mudstone, packstone y en la parte superior lutitas. Sobreyaciendo a las anteriores unidades se encuentran los volcánicos del Grupo Calipuy que fueron diferenciados según sus edades en Volcánicos del eoceno inferior y Volcánicos del eoceno superior. Cubriendo todas las unidades se encuentran los depósitos cuaternarios que principalmente se trata de materiales aluviales y fluviales.
- A partir de los modelos de elevación digital (DEM) y mediante las técnicas del Modelo de Sombras (Shade Relief) y el Modelo de Pendientes (Aspect), se pudo definir lineamientos principalmente con rumbo NO-SE y NE-SO, los cuales en campo se verificaron estructuras correspondientes a fallas, vetas y estratificación. Además se interpretaron lineamientos circulares con la técnica del Shade Relief, que junto con los datos de campo se pueden precisar los centros volcánicos existentes.
- Las imágenes ASTER, debido a su resolución espectral, cubre gran parte del espectro electromagnético, dando lugar a la posibilidad de utilizar técnicas de clasificación de minerales utilizadas por imágenes hiperespectrales.
- Al realizar las combinaciones de bandas se determina que para resaltar las zonas anómalas o de alteración hidrotermal, las mejores combinaciones de bandas son

468 y 467 (RGB); resaltando en color rosado a blanquecino a los píxeles de interés.

- Es a partir de estas combinaciones de bandas que se logra definir usar las técnicas de determinación de zonas de alteración como es la de ratios usando el coeficiente 4/6 para resaltar zonas de alteración ácidas, 5/6 resaltan zonas de alteración intermedia y 5/8 resaltan zonas básicas o propilíticas.
- Se logró construir una librería espectral del área de estudio con los principales minerales de alteración hidrotermal.
- En la determinación de zonas de alteración hidrotermal se pudo validar en campo que la mayor coincidencia de zonas de alteración es la obtenida mediante la técnica del Análisis de Principales Componentes.
- Mediante el uso de técnicas o métodos hiperespectrales es posible la clasificación por minerales en las zonas de alteración hidrotermal. En nuestra zona de estudio la clasificación de minerales la técnica del Afinamiento por Filtración Emparejada (MTMF ) que tuvo como resultados imágenes que fueron controladas y validadas en campo, destacando los minerales alunita, esmectita y ensamblajes como illita-esmectita-sericita, cuarzo-esmectita-illita, caolinita-esmectita, pirofilita-caolinita.
- Existen áreas que fueron resaltadas como zonas de alteración y no pertenecen a alteraciones hidrotermales, sino una alteración hipógena; son generalmente de grandes áreas, por lo tanto podemos concluir que no se puede discriminar mediante estos procesos entre estos dos tipos de alteración.
- Los resultados obtenidos con las imágenes satelitales ASTER, para el área de estudio tuvieron aproximadamente entre 75%-80% de validez
- Las áreas que fueron definidas como prospectables por presentar diferentes tipos de alteración hidrotermal son: Cerro Señal Pongo la Mesa, donde predomina la alteración argílica, Cerro Las Astillas que también presenta alteración argílica a argílica avanzada; Cerro Los Pircos que presenta la alteración argílica y filica y finalmente el Cerro La Fila en el que predomina la alteración argílica.

## **RECOMENDACIONES**

- Continuar con la colección de muestras para la ampliación de la librería espectral, ya que mientras más firmas espectrales se consiga, mejores resultados obtendremos al realizar estos procedimientos.
- Se recomienda la utilización de la técnica del modelo de sombras (Shade relief), para la interpretación de estructuras circulares.
- Al contar con la nueva librería espectral, se recomienda el uso de esta metodología para determinar zonas de alteración hidrotermal, con el fin de utilizar en zonas aledañas a la zona de estudio, donde se podrían obtener resultados de mejor calidad.
- Por existir un 20% a 25 % de imprecisión o error en los resultados en la determinación de zonas de alteración hidrotermal, se recomienda siempre la verificación en campo.
- El análisis, procesamiento e interpretación de las imágenes satelitales, pueden tener mayor precisión en la determinación de las zonas de alteración hidrotermal, con los análisis geoquímicos y de geofísica. Estos estudios complementarios ayudarían a reducir las zonas de exploración.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ACOSTA ALE, J. G. 1999. Correlación de Imágenes Landsat y Espectrometría con Alteraciones hidrotermales del Pórfido de cobre de Quellaveco. Tesis Ingeniero Geólogo. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.
- ACUÑA AZARTE, N. G. 2001. Aplicación de las Imágenes de Satélite Landsat tm 5 y Espectrometría Pima II en la Prospección Geoquímica en los cuadrángulos de Palpa (30-m) y Nazca (30-n). Tesis para optar título de Ingeniero Geóloga. Universidad Nacional mayor de San Marcos. 112 p.
- AGUILERA, EMILIA & ARAGÓN, EUGENIO. 1998. Mapeo de Unidades Volcánicas Terciarias, en la Patagonia Andina, con Imágenes Satelitarias. IX Simposium Brasileiro Sensores Remotos. p. 327-337
- AZCURRA, D. & CASTRO GODOY, S. 2003. Procesamiento y productos aster del área de sierra de Famatina, provincia de la Rioja, República Argentina. XI Simposium Brasileiro Sensores Remotos. p. 518-529.
- BAUGH, W. M. & KRUSE, F. A. “Quantitative remote sensing of ammonium minerals, cedar mountains, Esmeralda county, Nevada”, paper p.11-14.
- BIGNELLI, PEDRO ALBERTO. 1996. Avaliação dos Dados Radar (SAR) ERS-1 no Mapeamento Geológico da Região de Salobo, Província Mineral de Carajás. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. VIII Simposium Brasileiro Sensores Remotos. p. 607-613.
- CHUVIECO, E. 2000. Fundamentos de Teledetección.
- CRÓSTA, A. P. 1996. Sensoriamento Remoto Hiperespectral Aplicado ao Mapeamento de Minerais de Alteração Hidrotermal nos Distritos Mineiros de Bodie e Paramount, Califórnia. Instituto de Geociências – UNICAMP. P 623-628.
- DE MELO MELGAÇO, L.; & DE SOUZA FILHO C. R. 2003. Detección de ocurrencias de Zn-Pb con los sensores remotos y los SIG's. XI Simposium Brasileiro Sensores Remotos. p. 312-325.
- ENRÍQUEZ, J. A., VALER, R. & PAULLO, J. P. 2004. Características mineralógicas, estructurales y niveles de mineralización Au-Ag tipo bonanza en el prospecto epitermal de baja sulfuración Los Pircos – norte del Perú. XII Congreso Nacional Geología, p. 82.
- ENRÍQUEZ, J. A. & RODRÍGUEZ, O. 2005. Características Geológicas de los yacimientos epitermales de baja sulfuración en el corredor estructural San pablo –Porculla. Revista Minería, N° 339 año LIII, p. 10,11.
- FELZER, B., HAUFF P. 1994. Quantitative reflectance spectroscopy of buddingtonite from the Cuprite mining district, Nevada. Journal of Geophysical Research, Vol. 99, p 2887–2896.
- JEFFRE W. HEDENSQUIST, EIJI IZAGUA. 2001. “Yacimientos Epitermales de Oro: Tipos de Mineralización, Características y Exploración”, p. 1-21
- MARQUETTI, C. & MARÍN, G. 2003. Procesamiento y Análisis de Imágenes ASTER para el estudio metalogenético de Maliman, San Juan, Argentina. XI Simposium Brasileiro Sensores Remotos. p. 6112-6123.
- MARQUETTI, C.; DI TOMMASO, I. & HERRMANN, C. 2005. Datos Aster en la quebrada de Alcaparrosa, Calingasta, provincia de San Juan, Argentina. XII Simposium Brasileiro Sensores Remotos. p. 1823-1830.

- NOBLE D, Mc KEE E & MOURIER. 1998. Dataciones Radiométricas en el Perú.
- PEREZ D. J., AZCURRA D. & D'ODORICO P. 2007. Mapeo de Alteración Hidrotermal con datos ASTER, en la región de La Coipa, Cordillera Frontal (31°45'S), Provincia de San Juan, Argentina. XIII Simposium Brasileiro Sensores Remotos. p.2095-2102.
- RAINES, GARY L., GRAEME F. BONHAM-CARTER & LAURA KEMP. 2000. "Predictive Probabilistic Modeling Using ArcView GIS", *ArcUser* April—June p. 45-48.
- RIVERA M., MONJE R. & NAVARRO P. 2004. "Nuevos datos sobre el Volcanismo Cenozoico (Grupo Calipuy) en el norte del Perú: Departamentos. La Libertad y Ancash", Boletín de la Sociedad Geológica del Perú. p. 7-21
- ROWAN L. C.; SCHMIDT R. G & MARS J. C. 2006. Distribution of Hydrothermally altered rocks in the Reko Diq, Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data. *Remote Sensing of Environment*. p.74-87.
- SABINS FLOYD F. 1999. Remote Sensing principles and interpretation; mapping hydrothermally altered rocks; p 366-377.
- SILLITOE, R. H. 1979. Andean Mineralization: A model for the Metallogeny of Convergent Plate Margins. Traducido por Nestor Chacon A. 57 p.
- SOARES GALVÃO, L., ALMEIDA FILHO, R. & VITORELLO, Í. 2005. Use of ASTER short-wave infrared bands for the spectral discrimination of hydrothermally altered-materials: evaluation in a tropical savannah environment. XII Simposium Brasileiro Sensores Remotos. p.777-787.
- TIRIBA APPI V. 1996. Características Multiespectrais de Rochas Metamórficas em Imagens Landsat Thematic Mapper: Análise de uma Área em Madagascar. PETROBRAS/CENPES – DIVEX. VIII Simposium Brasileiro Sensores Remotos p. 607-604.
- TORRES-VERA, M. A & PROL-LEDESMA R. M Spectral enhancement of selected pixels in Thematic Mapper images of the Guanajuato district (Mexico) to identify hydrothermally altered rocks paper 4358-4373.
- VENERANDO EUSTÁQUIO AMARO & GILBERTO AMARAL (1998) .A Espectrometria de Reflectância Aplicada ao Mapeamento Geológico da Porção Extremo Nordeste da Província Borborema, Nordeste do Brasil". IX Simposium Brasileiro Sensores Remotos. p. 338-353.
- VILLANUEVA, R. 2002. Procesamiento de Datos Multiespectrales usando Herramientas Hiperespectrales. XI Congreso Peruano de Geología, p. 975-989.

## ANEXO 1

### GLOSARIO

**Análisis multitemporal:** Análisis de tipo espacial que se realiza mediante la comparación de las de coberturas interpretadas en dos imágenes de satélite o mapas de un mismo lugar en diferentes fechas.

**Bandas:** El pequeño rango de longitudes de onda que cada sensor capta, normalmente se le asigna un número.

**Corrección geométrica:** Las imágenes crudas recogidas por los satélites o aeronaves son representaciones de la superficie irregular de La Tierra. Incluso imágenes de áreas que parecen ser planas se ven distorsionadas por la curvatura de La Tierra y por el sensor utilizado. Una corrección geométrica implica realiza el ajuste de las propiedades geométricas de la imagen para definir la escala, rotación, y corrección de otras distorsiones espaciales, de tal manera que esté de acuerdo con un determinado sistema de coordenadas.

**Corrección radiométrica:** Proceso que consiste en reducir los efectos de la iluminación del sol, la topografía del terreno y las condiciones atmosféricas que han modificado los valores de energía radiante emitidos por la superficie terrestre y los que han sido capturados por el sensor.

**Datum:** Punto de referencia para la realización de mediciones de posición horizontal y/o vertical, y que de acuerdo a un conjunto de parámetros geométricos y geodésicos que lo definen permite asociar las mediciones realizadas con un modelo de representación de la superficie terrestre.

**Elipsoide:** Superficie sólida de revolución generada al hacer girar una elipse sobre su eje menor. Ya que la forma de la Tierra es distinta de un área a otra, y para fines prácticos, se utiliza un elipsoide para representar la superficie de una determinada región para así para obtener un mejor ajuste en los cálculos y mediciones geodésicas realizadas.

**Escala:** Relación entre la distancia en la fotografía, carta o mapa u otro elemento gráfico, y su distancia correspondiente en el terreno.

**Espectro electromagnético:** Cada tipo de energía radiante tiene parámetros, como son la frecuencia y la longitud de onda. Las longitudes de onda posibles varían entre 0.01 angstroms hasta los 10 metros aproximadamente, a toda esa gama de radiaciones con diversas características se lo denomina espectro electromagnético.

**Georeferenciación:** Proceso de asignar coordenadas de mapa a los datos de la imagen. Los datos de la imagen son proyectados en el plano coordenado deseado, pero no referenciados al sistema de coordenadas. La rectificación por definición involucra georeferenciación puesto que los sistemas de proyección de mapas se asocian con coordenadas de mapa.

**Metadatos geográficos:** Los metadatos son datos sobre los datos, es decir, información sobre la información misma. En esencia, los metadatos geográficos intentan responder a las preguntas quién, qué, cuándo, cómo, dónde y porqué, sobre cada una de las características relativas a los datos que se documentan. Los metadatos geográficos permiten a un productor de información espacial describir totalmente los datos geográficos de manera que los usuarios puedan entender las presunciones y limitaciones y puedan evaluar la aplicabilidad de los datos para el uso específico de su interés.

**Modelo digital de elevación (MDE) o modelo digital del terreno (MDT):** Es una representación digital de la distribución espacial de la elevación de la superficie del terreno. La unidad básica de información es un valor de elevación, altura o posición vertical (coordenada Z), al que acompañan los valores correspondientes de posición horizontal (coordenadas X e Y,) expresados en un sistema de proyección, para cada uno de los puntos del terreno.

**Mosaico:** Composición de distintas imágenes que cubren partes del mismo territorio. Para realizar un mosaico se aplica una técnica donde múltiples imágenes de sensores remotos son digitalmente empalmadas para crear un único producto de imagen.

**Multiespectral:** Una imagen satelital multiespectral es aquella que es generada a partir de los datos recolectados por un mismo sensor en más de una banda.

**Path y Row:** El path row está compuesto por dos números (fila y columna) que sirven para conocer la ubicación de una imagen satelital. Es el “nombre” de la imagen.

**Píxel:** Término derivado de "Picture Element" en una representación digital para indicar la posición espacial de una muestra en un archivo de imagen, el cual consiste en un arreglo espacial de números digitales y corresponde a la unidad fundamental e indivisible de representación raster. El parámetro fundamental que describe dicha cuadrícula es el espaciamiento entre píxeles en cada una de las dos direcciones de la imagen. El espaciamiento de píxel, se refiere a menudo como píxel o tamaño de píxel.

**Raster:** Modelo de datos para el almacenamiento de imágenes constituido por una matriz de columnas y filas, donde cada celda de la matriz (píxel) es referenciada por sus coordenadas y se une a uno o más valores de atributos.

**Sensores remotos:** Sistemas de detección y medida a distancia, generalmente empleados desde aeronaves o satélites, con los que se obtiene información meteorológica, oceanográfica, la cubierta vegetal, etc.