



# BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

COLEGIO DE INGENIERÍA GEOFÍSICA

Metodología para la adquisición de datos hiperespectrales  
con la cámara HySpex-320m-e en muestras de roca de  
interés petrolero

**T E S I S**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO GEOFÍSICO

PRESENTA

ADRIÁN LÓPEZ FLORES

Director: Dr. Luis Germán Velasquillo Martínez

Codirector: M.C. José Castillo Román

# Contenido

<b>Agradecimientos .....</b>	<b>4</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>5</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>6</b>
1.1    Objetivos .....	6
1.2    Antecedentes .....	6
1.3    Estructura de la tesis .....	7
<b>2. Tecnología infrarroja .....</b>	<b>8</b>
2.1    Aspectos generales .....	8
2.2    Fundamentos de la radiación infrarroja .....	11
2.3    El espectro electromagnético .....	12
2.4    Sistemas de adquisición en el infrarrojo.....	14
2.5    Fuentes de radiación.....	19
2.6    Conceptos básicos de radiometría .....	21
<b>3. Software para la visualización y procesamiento de datos hiperespectrales.....</b>	<b>24</b>
3.1    Software comercial .....	25
3.1.1    ENVI (Environment for Visualizing Images) .....	25
3.1.2    ERDAS IMAGINE.....	26
3.1.3    PCI GEOMATIC .....	27
3.2    Software libre .....	28
3.2.1    ORFEO Toolbox (OTB).....	28
3.2.2    Matlab HIAT (Hyperspectral Image Analysis Toolbox) .....	29
3.2.3    MultispecW32 .....	29
<b>4. Base de datos de firmas espectrales de libre acceso .....</b>	<b>31</b>
4.1    Servicio Geológico de Estados Unidos (United States Geological Survey, USGS) .....	31
<b>5. Sistema de adquisición HySpex 320m-e.....</b>	<b>35</b>
5.1    Especificaciones técnicas.....	35
5.2    Instalación de la cámara HySpex 320m-e en el laboratorio .....	36
<b>6. Adquisición y procesado de datos hiperespectrales .....</b>	<b>40</b>
6.1    Distancias óptimas de medición .....	40
6.1.1    Longitud focal del lente para mediciones a 1 m de distancia.....	40
6.1.2    Distancia de las lámparas .....	45

<b>6.2</b>	<b>Procesamiento de datos</b> .....	<b>54</b>
6.2.1	Corrección Radiométrica .....	54
6.2.2	Método del campo plano (Flat Field) .....	56
6.2.3	Método de la línea empírica.....	56
<b>6.3</b>	<b>Selección de materiales para la corrección de datos</b> .....	<b>57</b>
6.3.1	Cuarzo.....	57
6.3.2	Teflón (PTFE).....	59
<b>6.4</b>	<b>Medición de datos</b> .....	<b>61</b>
6.4.1	Medición de minerales puros .....	62
6.4.2	Medición de materiales artificiales.....	67
<b>7.</b>	<b><i>Clasificación de imágenes de las muestras de estudio</i></b> .....	<b>68</b>
<b>7.1</b>	<b>Introducción a los métodos de clasificación</b> .....	<b>68</b>
7.1.1	Métodos supervisados.....	69
7.1.2	Métodos no supervisados .....	73
<b>7.2</b>	<b>Mapeo mineralógico de muestras de roca</b> .....	<b>73</b>
7.2.1	Muestras de afloramiento .....	73
7.2.2	Muestras de canal .....	90
7.2.3	Laminas delgadas.....	93
<b>8.</b>	<b><i>Conclusiones</i></b> .....	<b>96</b>
<b>9.</b>	<b><i>Referencias</i></b> .....	<b>97</b>

## Agradecimientos

El presente trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo y facilidades de acceso a las distintas instalaciones que me proporciono el Instituto Mexicano del Petróleo. Asimismo, agradezco el gran apoyo al Gerente de Geología Predictiva el M. en C. Ricardo Torres Vargas y al Dr. Renato Castro Govea que me facilitaron el acceso al equipo HySpex SWIR320m-e con el cual se realizó la adquisición de datos de las muestras presentadas en esta tesis.

Un agradecimiento muy grande y especial al Dr. Luis German Velasquillo Martínez por brindarme su tiempo, sus consejos, múltiples enseñanzas y su paciencia al momento de realizar mi tesis.

Gracias a el Dr. Marcelo Aguilar Piña que me proporciono las muestras de canal y a la Geógrafa Marcela Rosaura Ugarte Hernández quien realizó el análisis de muestras mediante la técnica MEB-EDS (microscopia electrónica de barrido, MEB, y análisis elemental EDS, por sus siglas en inglés *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*).

Por otro lado, también quiero dar las gracias a todos mis profesores de mi querida Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, que me enseñaron a superarme y todos y cada uno de los consejos que me ayudaron a mejorar como persona y como estudiante.

A mi comité de tesis que me han apoyado durante esta última fase, con buenos consejos y opiniones importantes sobre todo mi trabajo hecho. Al M.C José Castillo Román, M.C Julio Cesar González Hernández y M.C José Serrano Ortiz, gracias por su tiempo y dedicación.

Mis padres y mis hermanos que estuvieron conmigo apoyándome y aconsejándome para que yo pudiera salir adelante en los momentos complicados, gracias los amo y esto también es de ustedes gracias por todo.

A ti Sandra que has estado para mí y conmigo aun estando lejos, apoyándome y dándome ánimos y consejos en los momentos más difíciles de estrés y desesperación, gracias amor sin ti no hubiera sido nada fácil, te amo.

Una mención muy especial a todos mis amigos y compañeros que me ayudaron directa e indirectamente a que sacara adelante este trabajo gracias, en especial a Juan Carlos Salazar Barrera, quien siempre estuvo ayudándome en todo momento cuando me sentía perdido gracias viejo.

## Resumen

Actualmente en México, en particular en el área de exploración de recursos naturales, la técnica de teledetección ha tenido mayor éxito y desarrollo en la exploración minera; sin embargo, no se ha evaluado su potencial para aplicarlo en la exploración petrolera. Por este motivo, este trabajo representa un primer esfuerzo para mostrar su aplicabilidad en la caracterización mineral de rocas carbonatadas, las cuales son de gran importancia en la industria petrolera nacional.

La caracterización mineral a distancia (teledetección) se realiza midiendo la radiación electromagnética que proviene de la interacción del objeto y una fuente de radiación natural o artificial. Esta radiación es captada por un sensor, la cual interactúa con cada tipo de material ya sea por reflexión, absorción o transmisión, de acuerdo a un patrón de respuesta espectral única conocida como “firma espectral”.

Los diferentes instrumentos y sensores capaces de medir las variaciones espectrales en diferentes longitudes de onda, se basan en el concepto de resolución espacial o tamaño del pixel, el cual está definido por un valor espacial único (x, y) (la separación entre los puntos coordenados definirá la resolución espacial, es decir el tamaño del pixel), y resolución espectral. Esta última está conformada por el número de bandas que el sensor puede captar. Las imágenes multiespectrales están constituidas normalmente de 3 a 20 bandas, si el número de bandas es mayor a 100, estas se denominan imágenes hiperespectrales. Estas últimas permiten definir firmas espectrales de los materiales existentes en la imagen con mayor precisión. En este trabajo utilizamos una cámara HySpex SWIR-320m-e, la cual puede captar energía electromagnética emitida por lámparas de luz infrarroja. Las imágenes hiperespectrales obtenidas con este equipo tienen una resolución espectral de 256 bandas dentro del infrarrojo de onda corta (SWIR; *Short Wave Infrared*, entre el rango de 1.0 y 2.5  $\mu\text{m}$  de longitud de onda) y una resolución espacial de 320 píxeles (alcanzando un tamaño mínimo de 0.9 mm por pixel). Con estas características del equipo se pudo obtener firmas espectrales de los minerales con mayor precisión.

La identificación de los minerales en función de sus características espectrales se denomina comúnmente clasificación. El objetivo principal de esta clasificación fue asignar a un conjunto de píxeles, en la imagen hiperespectral, un conjunto de clases predefinidas (firmas espectrales de minerales). Para documentar la aplicabilidad de las imágenes hiperespectrales en la caracterización mineralógica de rocas carbonatadas, las mediciones se realizaron a diferentes escalas: muestras de afloramiento, láminas delgadas y muestras de canal. Estas escalas se trabajan frecuentemente en la exploración petrolera para realizar estudios geológicos detallados. Los resultados obtenidos muestran que se puede obtener mapas de composiciones mineralógicas y sus variaciones composicionales, en el caso de las rocas carbonatadas estudiadas, las variaciones de calcio y magnesio. Los resultados obtenidos fueron calibrados con estudios de microscopía electrónica de barrido y el análisis elemental EDS (*Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*). Esto puede representar una técnica innovadora, práctica y de fácil manejo que aportaría información cuantitativa que se requiere en la caracterización geológica de yacimientos petroleros carbonatados.

# 1. Introducción

En la industria petrolera obtener la composición mineralógica de las rocas sedimentarias carbonatadas es crucial para poder establecer ambientes de depósito, modelos diagenéticos y las probables correlaciones que se requieran para la caracterización de yacimientos petroleros. La composición química y/o mineralógica de las rocas se puede obtener aplicando diferentes técnicas cualitativas (e.g., estudios petrográficos) y cuantitativas (estudios de espectroscopia de absorción atómica, microscopio electrónico de barrido con analizador de energías --SEM-EDS--, fluorescencia de rayos X, dispersión de rayos X, catodoluminiscencia, microsonda electrónica --EMP--), entre otros. Las técnicas cuantitativas son menos accesibles y mucho más costosas.

Este trabajo se realizó para mostrar las ventajas de aplicar el análisis de las imágenes hiperespectrales en la caracterización de la composición mineralógica de rocas carbonatadas de interés petrolero. La cual puede reducir los costos y los tiempos de análisis para obtener mapeos de composición mineralógica a diferentes escalas.

## 1.1 Objetivos

Los objetivos de este trabajo son, por un lado, documentar las condiciones óptimas de instalación de una cámara HySpex SWIR320m-e para realizar mediciones en muestras de roca a diferentes escalas: muestras de afloramiento (5 a 60 cm de longitud), láminas delgadas (5.0 x 7.5 cm) y muestras de canal (de 1 a 5 mm de longitud). Por otro lado, determinar las firmas espectrales de los minerales puros que constituyen las rocas carbonatadas de interés petrolero (calcita, dolomita) y sus variaciones composicionales (relación calcio-magnesio).

## 1.2 Antecedentes

Actualmente la técnica de teledetección ha tenido mayor éxito y desarrollo en la exploración minera; sin embargo, en México no se ha evaluado su potencial para aplicarlo en la exploración petrolera.

Hasta la fecha los avances tecnológicos y científicos permiten aprovechar al máximo el espectro electromagnético. Se ha pasado del análisis de la región del espectro visible al análisis del espectro en su totalidad. Esto ha implicado el desarrollo de nuevos algoritmos, técnicas y procesos para extraer la mayor cantidad de información acerca de la interacción de la materia con la radiación electromagnética.

La percepción remota de un objeto (teledetección) está basada en la medición, mediante un sensor, de la radiación electromagnética que proviene de la interacción del objeto y la fuente de radiación. La medición de esta radiación emitida o reflejada de una superficie está dada por la radiancia, la cual depende de distintos factores como: el brillo, reflectancia,

ángulos de observación, entre otros (Rojas,2009). Estas técnicas de teledetección se basan en el hecho de que todos y cada uno de los materiales presentes, reflejan, absorben y emiten energía electromagnética de manera distinta y con diferentes longitudes de onda (Rojas,2009).

Los diferentes instrumentos y sensores capaces de medir las variaciones espectrales en diferentes longitudes de onda, se basan en el concepto de resolución espacial o tamaño del pixel, el cual está definido por un valor espacial único (x, y) (la separación entre los puntos coordenados definirá la resolución espacial, es decir el tamaño del pixel), y la resolución espectral. Esta última está conformada por un conjunto de N valores, siendo N el número de bandas que el sensor puede medir. Las imágenes denominadas multispectrales están constituidas por un número de bandas reducidas (comúnmente entre 3 y 20), pero si el número de bandas es mayor a 100, estamos hablando de imágenes hiperespectrales. Estas últimas permiten definir firmas espectrales de los minerales existentes en la imagen con mayor precisión.

A la identificación de los minerales en función de sus características espectrales se le denomina comúnmente clasificación. El objetivo general de la clasificación es asignar un conjunto de objetos (conjunto de píxeles) en la imagen digital, a un conjunto de clases predefinidas (firmas espectrales de minerales, vegetales o materiales artificiales). Desde este punto de vista, la clasificación puede considerarse como un problema de etiquetación de píxeles que presentan un patrón espectral similar.

### 1.3 Estructura de la tesis

El trabajo realizado en la presente tesis se estructuró de la siguiente manera:

En el capítulo 2, se describen los principios teóricos básicos en los cuales se sustenta la técnica de imágenes hiperespectrales.

En el capítulo 3, se presenta de manera sucinta el software (comercial y algunos de dominio público) que se requiere para el procesamiento y visualización de imágenes hiperespectrales.

En el capítulo 4, se presentan las firmas espectrales de libre acceso del servicio geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) de los principales minerales que conforman las rocas sedimentarias. Estas firmas espectrales se tomaron como referencia para comparar y verificar que el equipo utilizado podría diferenciar correctamente los minerales estudiados.

El capítulo 5, contiene la descripción de las especificaciones técnicas y los accesorios que se utilizaron para instalar y realizar mediciones, en condiciones de laboratorio, con la cámara HySpex SWIR320m-e.

En los capítulos 6 y 7, se muestran los diferentes experimentos realizados para la medición, el procesamiento y la clasificación de los datos hiperespectrales. Los experimentos realizados incluyen las distancias óptimas de medición y los materiales de referencia utilizados para el procesamiento de las imágenes. Se realizaron mediciones en muestras de afloramiento (muestras de mano y barrenos), en minerales puros y en materiales sintéticos.

Finalmente, las conclusiones se presentan en el capítulo 8.

## 2. Tecnología infrarroja

### 2.1 Aspectos generales

El infrarrojo es parte de la radiación electromagnética de mayor longitud de onda que la luz visible y no puede ser percibido por el ojo humano (Figura 1). Nos indica cuanto calor tiene un material y nos proporciona información de la temperatura del mismo. Todos los objetos o materiales emiten calor e irradian luz infrarroja. Incluso las cosas que pensamos que no podrían emitir calor lo hacen, por ejemplo, un cubo de hielo irradia menor calor que los objetos que se encuentran a su alrededor (Figura 2). Entre mayor temperatura tenga el material la radiación de calor será mayor y se detectan con mayor brillo o intensidad en el infrarrojo. Así mismo los contrastes de temperatura de los materiales podrán detectarse con diferentes brillos o intensidades en el infrarrojo (e.g., el agua derretida alrededor del cubo de hielo, Figura 2).

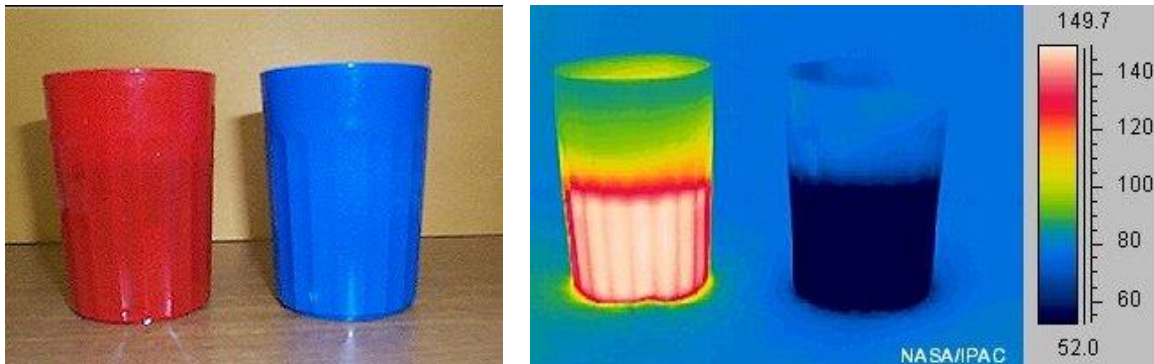


Figura 1. Fotografía de dos vasos con la luz visible (izquierda) e infrarroja (derecha). Un vaso contiene agua fría mientras que el otro contiene agua caliente. En la imagen infrarroja se puede observar mayor brillantez en el vaso de la izquierda que contiene agua caliente (colores en tonos rojos y blancos) que el agua fría en el vaso de la derecha (colores en tonos azules) (imágenes tomadas del sitio web del California Institute of Technology).

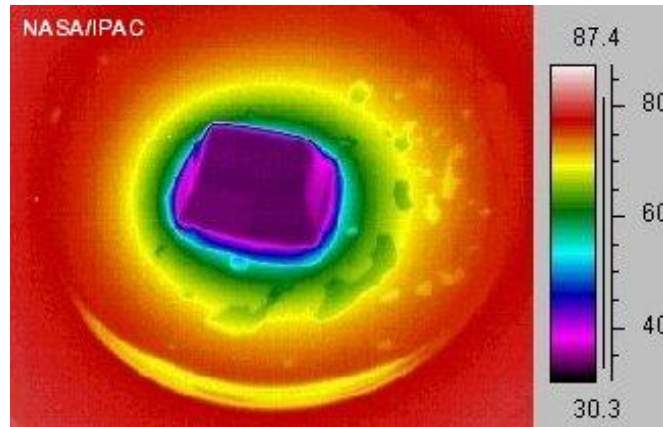


Figura 2. Imagen infrarroja de un cubo de hielo derritiéndose. La temperatura del hielo a 1 atmósfera de presión es de 32°F (colores magenta y gris). Las franjas que van del azul hasta el amarillo nos indican el agua derretida del cubo con diferencias significativas de temperaturas. La escala de colores indica la temperatura en grados Fahrenheit (°F) (imagen tomada del sitio web del California Institute of Technology).

La mayor parte de lo que perciben nuestros ojos es el resultado de radiación indirecta, esta radiación es generada por el sol (espectro electromagnético) o por luces artificiales. Si nuestros ojos pudieran captar la radiación infrarroja, un objeto o material sería visible incluso en la oscuridad (Figura 3).

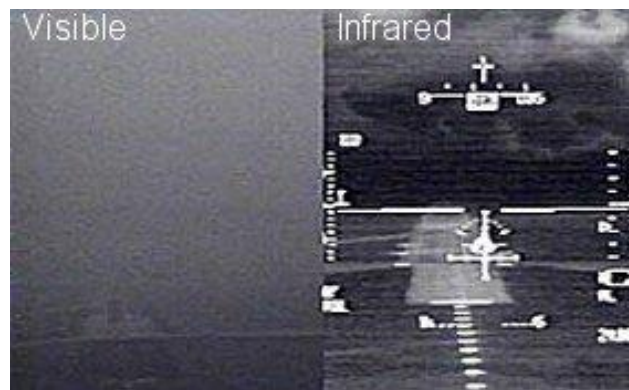


Figura 3. Imágenes de una pista de aterrizaje. La pista es captada con luz visible (izquierda) e infrarroja (derecha) de un avión mientras trata de aterrizar en la niebla espesa. La pista de aterrizaje no pudo ser vista con luz óptica ("luz visible"). La vista infrarroja, en cambio, permite al piloto ver la pista y aterrizar con seguridad (imágenes tomadas del sitio web del California Institute of Technology).

El desarrollo y la mejora de la tecnología infrarroja es el resultado conjunto de colaboraciones de empresas industriales, aeroespaciales, centros de investigación y universidades. Las distintas actividades desarrolladas se han concretado en diversas aplicaciones de gran utilidad, que han ayudado al desarrollo en distintas aéreas de la ciencia, la defensa y el espacio. Actualmente se aplica cotidianamente al prender la televisión con el control remoto, en las computadoras cuando insertamos un CD para tener acceso a su contenido; en los automóviles para abrir o cerrar las puertas a control remoto;

para determinar la temperatura en los océanos, estudiar el clima de la tierra y la luz proveniente del espacio (Figura 4).

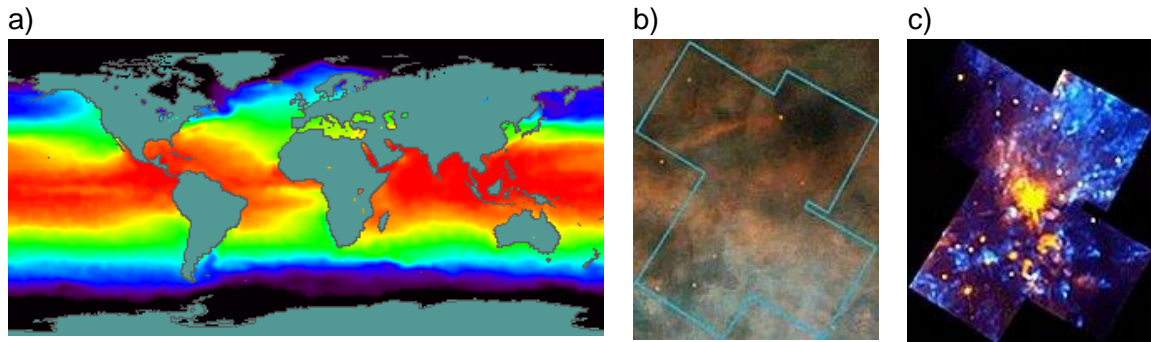


Figura 4. (a) mapa de distribución de temperaturas de la superficie de los océanos determinadas con tecnología infrarroja (en rojo las más calientes y en morado las más frías). Imágenes tomadas por telescopios de un área de gas y polvo espesos en el espacio: (b) luz visible e (c) infrarrojo. Usando telescopios con tecnología infrarroja los astrónomos pueden “ver” a través del polvo cósmico espeso (imágenes tomadas del sitio web del California Institute of Technology).

La aplicación de la tecnología infrarroja en geociencias se utiliza para determinar los diferentes minerales y tipos de rocas en la superficie terrestre (Figura 5). Esto es posible gracias a que los minerales generan y absorben radiación térmica, esta radiación permite identificar el tipo de mineral y cuantificar la cantidad de este.

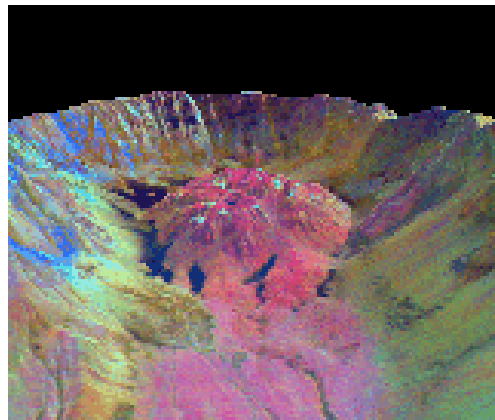


Figura 5. Mapa térmico infrarrojo del monte St. Helen (imagen tomada del sitio web del California Institute of Technology)

También la radiación infrarroja puede ser empleada para el estudio de volcanes, su temperatura y en la predicción de erupciones, para ello se genera un mapa de temperatura del suelo (Figura 6). De la misma manera se realiza el estudio de la lava que es expulsada y del dióxido sulfúrico expedido en forma de gases hacia la atmosfera. Todos estos datos son de gran importancia para el estudio de los volcanes.

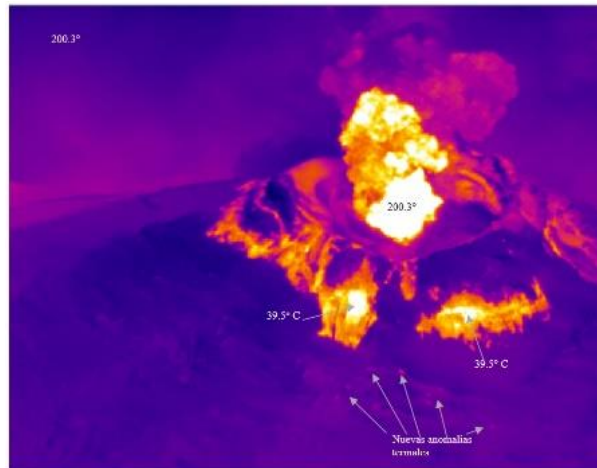


Figura 6. Imagen del sector SE del volcán Cotopaxi con los valores de temperatura obtenidos con la cámara infrarroja (imagen tomada del sitio web de la Actualización de la Actividad Eruptiva--Volcán Cotopaxi N°14-2015, Perú).

Por otro lado, la tecnología infrarroja también se emplea para estudiar las distribuciones geográficas de los recursos naturales existentes y con ello generar una mejor planificación para aprovechar de manera eficiente todos esos recursos y preservar el medio ambiente. Por ejemplo, se pueden generar mapas térmicos que ayuden al estudio del suelo, la irrigación y cultivos propensos a enfermedad, y con ello se puede hacer una planificación de los cultivos.

En resumen, la radiación infrarroja nos permite medir de forma precisa las propiedades de algún material u objeto sin la necesidad entrar en contacto con éstos.

## 2.2 Fundamentos de la radiación infrarroja

La radiación infrarroja es un tipo de radiación electromagnética y térmica, con un rango de longitudes que van desde los 0.7 micrómetros hasta 1000 micrómetros, es decir de mayor longitud de onda que la luz visible, pero menor que las microondas. La radiación infrarroja se subdivide a su vez en tres, el infrarrojo cercano, que es la más próxima al visible (0.78-2.5  $\mu m$ ), el infrarrojo medio (2.5-50  $\mu m$ ) y el infrarrojo lejano (50-1000  $\mu m$ ). En esta tesis trabajaremos en el rango de 1.0 a 2.5  $\mu m$ , es decir en el rango del infrarrojo cercano.

La materia al poseer energía, emite radiación, por esta razón cualquier cuerpo emite y absorbe radiación de su entorno. La longitud de onda donde un cuerpo emite su máxima radiación es inversamente proporcional a su temperatura (Ley de Wien). De esta manera los objetos a temperaturas ambientales tienen su máxima emisión en el infrarrojo (Goosse et al., 2010).

Una de las características más importantes de la radiación infrarroja es que es absorbida con facilidad, esto depende del grado de absorción de la sustancia en cuestión y de la

frecuencia de la radiación. Las velocidades de los rayos de luz (o radiación) cambian al pasar de medios densos a otros de mayor densidad o viceversa (Montalvo, 2010; Figura 7).

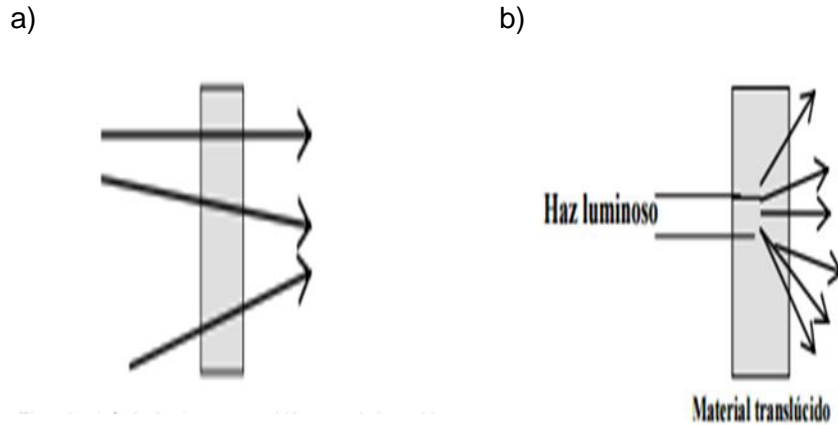


Figura 7. a) Onda luminosa transmitida a través de un objeto transparente. b) Recorrido de rayos luminosos en un material traslucido (Montalvo, 2010).

## 2.3 El espectro electromagnético

A la cantidad de energía almacenada en una región del espacio se le conoce como energía electromagnética, la cual resulta de la combinación de campos eléctricos y magnéticos que se propagan a través del espacio. La combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes se le conoce como radiación electromagnética. Es decir, es un tipo de campo electromagnético variable que se propaga mediante ondas electromagnéticas a través del espacio, transportando energía de un lugar a otro. El comportamiento de la radiación electromagnética depende de su longitud de onda y de la cantidad de energía que contenga (espectro electromagnético, Tabla 1).

Por este motivo, el espectro electromagnético puede expresarse en términos de longitud de onda o energía. Este dato es importante cuando se analiza la influencia de las ondas electromagnéticas producidas por un microondas, por lámparas de luz infrarroja, por las antenas de telefonía celular o por los cables de alta tensión.

Tabla 1.-El espectro electromagnético está conformado por ondas con diferentes frecuencias y longitudes de onda y desde un punto de vista teórico es infinito y continuo. El cual se clasifica en diferentes rangos de frecuencias o longitudes de onda. (Tabla tomada del sitio web Radiaciones electromagnéticas)

Banda	Longitud de onda	Frecuencia en Herzios	en	Energía en Julios
Rayos gamma	10 picómetros = $10 \times 10^{-12}$ m	30 ExaHz $30 \times 10^{18}$ Hz	=	$20 \times 10^{-15}$ J
Rayos X	10 nanómetros = $10 \times 10^{-9}$ m	30 PetaHz $30 \times 10^{15}$ Hz	=	$20 \times 10^{-18}$ J
Ultravioleta extremo	200 nanómetros = $200 \times 10^{-9}$ m	1.5 PetaHz $1,5 \times 10^{15}$ Hz	=	$993 \times 10^{-21}$ J
Ultravioleta cercano	380 nanómetros = $380 \times 10^{-9}$ m	789 TeraHz $789 \times 10^{12}$ Hz	=	$523 \times 10^{-21}$ J
Luz visible	780 nanómetros = $780 \times 10^{-9}$ m	384 TeraHz $789 \times 10^{12}$ Hz	=	$255 \times 10^{-21}$ J
Infrarrojo cercano	2.5 micrómetros = $2,5 \times 10^{-9}$ m	120 TeraHz $789 \times 10^{12}$ Hz	=	$79 \times 10^{-21}$ J
Infrarrojo medio	50 micrómetros = $50 \times 10^{-9}$ m	6.0 TeraHz $789 \times 10^{12}$ Hz	=	$4 \times 10^{-21}$ J
Infrarrojo lejano	1 milímetro	300 GigaHz $300 \times 10^9$ Hz	=	$200 \times 10^{-24}$ J
Microondas	30 cm	1 GigaHz = $1 \times 10^9$ Hz		$2 \times 10^{-24}$ J
Ultra alta frecuencia	1 metro	300 MegaHz $300 \times 10^6$ Hz	=	$19.8 \times 10^{-26}$ J
Muy alta frecuencia de radio	10 metros	30 MegaHz $300 \times 10^6$ Hz	=	$19.8 \times 10^{-28}$ J
Onda corta de radio	180 metros	1.7 MegaHz $300 \times 10^6$ Hz	=	$11.22 \times 10^{-28}$ J
Onda media de radio	650 metros	650 KiloHz		$42.9 \times 10^{-29}$ J
Onda larga de radio	10 kilómetros	30 KiloHz		$19.8 \times 10^{-30}$ J
Muy baja frecuencia de radio	10 kilómetros	30 KiloHz		$19.8 \times 10^{-30}$ J

En la Tabla 1 puede observar que ondas electromagnéticas de alta frecuencia tienen una longitud de onda corta y mayor energía, a diferencia de las ondas de baja frecuencia que tienen grandes longitudes de onda y menor energía.

En la práctica el espectro electromagnético se clasifica de menor longitud de onda (rayos gamma y rayos X), pasando por radiación intermedia (luz ultravioleta, luz visible e infrarrojo) y termina con mayor longitud de onda (ondas de radio; Figura 8). Para este trabajo de tesis nos enfocaremos en la radiación infrarroja y sus diferentes variaciones. Es importante resaltar que, si bien todas las ondas electromagnéticas son de la misma naturaleza, los efectos que provocan en los materiales son diferentes (Estrada, 2011).

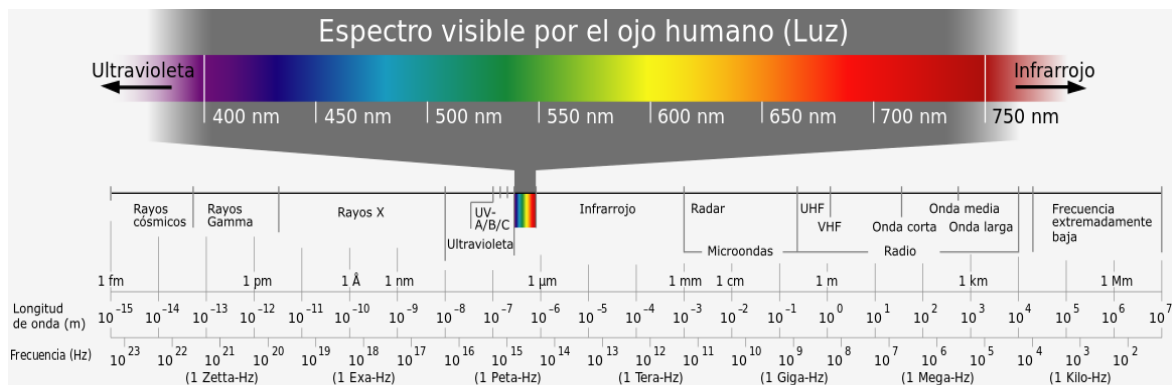


Figura 8. Diagrama del espectro electromagnético, mostrando las diferentes clasificaciones en función de su longitud de onda o frecuencia (Imagen obtenida del sitio web ¿Cómo el ojo percibe el color?)

## 2.4 Sistemas de adquisición en el infrarrojo

A continuación, se describe de manera cualitativa y simplificada las partes que conforman un sistema de adquisición de radiación infrarroja. La primera es una fuente de emisión infrarroja (natural o artificial), la segunda es el canal o medio por el cual se propagará, y por último un sensor que captará y registrará la radiación. El análisis de esta radiación será el tema central a estudiar en este trabajo.

El sensor está formado por varios elementos configurados de forma precisa para crear un conjunto de imágenes bidimensionales. Cada uno de los puntos que las conforman están definidos por un valor digital (Rodríguez, 2010). El valor digital obtenido corresponde a un conjunto de coordenadas x e y (resolución espacial) y una longitud de onda en particular (Figura 9). El conjunto de longitudes de onda define la resolución espectral.

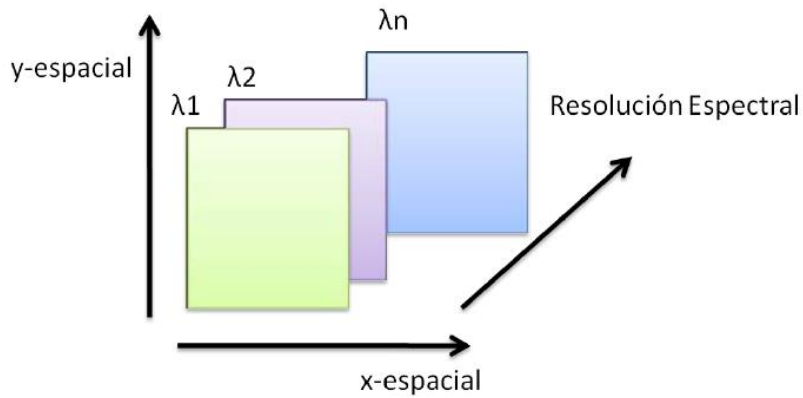


Figura 9. Resolución espacial y espectral en un sistema de adquisición (Rodríguez, 2010)

Se utiliza el término “sistema de imagen” cuando hablamos de dispositivos que solo nos brindan resolución espacial, para diferenciarlos de aquellos que nos proporcionan resolución espectral, conocidos como “sistemas espectro radiométricos”. Asimismo, existen sistemas que unen ambas resoluciones, tanto la espectral como la espacial, formando un mismo instrumento llamado espectrómetro de imagen (Rodríguez, 2010).

La adquisición de imágenes infrarrojas ha tenido un gran avance debido a la llegada de la tecnología digital y con ello la mejora en los dispositivos de captura. Al realizar la captura de imágenes infrarrojas, es necesario tener una fuente de radiación infrarroja (lámpara o luz infrarroja) (Figura 10). Esta última es necesaria para que las imágenes infrarrojas capturadas sean de buena calidad y obtener buenos resultados en su visualización.



Figura 10. Ejemplo de lámpara de radiación infrarroja. Esta consiste en una fuente de luz, que contiene un filtro infrarrojo (bloquea el espectro visible) y un ventilador para mantener la temperatura de la lámpara.

## Teledetección (*remote sensing*)

La teledetección es la técnica que permite obtener información sobre la composición química de objetos sin tener contacto con ellos (Simonett, 1983). Esta técnica se basa en el hecho de que todos los materiales existentes (artificiales y naturales), reflejan, absorben y/o emiten energía electromagnética de manera distinta y en diferentes longitudes de onda (Rojas, 2009). En el caso la teledetección, la interacción que se produce va a ser un flujo de radiación que parte de los objetos y es captada por un sensor. Este flujo se clasifica en cuanto a su origen en tres tipos:

- Radiación solar reflejada por cualquier objeto (luz visible e infrarrojo reflejado).
- Radiación terrestre emitida por los objetos (infrarrojo térmico).
- Radiación emitida por el sensor y reflejada por los objetos (radar).

Las técnicas basadas en los dos primeros tipos se conocen como teledetección pasiva y la última como teledetección activa. En este trabajo se trabajará en la radiación reflejada por muestras de roca que son expuestas a una fuente artificial infrarroja (Figura 10); es decir, aplicaremos los conceptos de la técnica de teledetección pasiva.

Los principales conceptos que se utilizan en la técnica de teledetección son (Román e Indira, 2013):

- **Resolución espacial.** Nos indica el tamaño del pixel de una imagen que es captada sobre la superficie terrestre, de un material u objeto de estudio. Es la característica mínima que puede ser captada por un sensor.
- **Resolución espectral.** Nos indica el número de bandas espectrales que puede detectar el sensor.
- **Resolución radiométrica.** Se refiere el número de bits necesarios para representar un valor numérico. Esta característica define la sensibilidad del sensor, y se refiere a la mínima cantidad de energía electromagnética que puede medirse.
- **Resolución temporal.** Es el tiempo que tarda el sensor en volver a medir el mismo punto, esto depende de la altura, inclinación y velocidad del objeto que contiene un sensor.

## Imágenes multiespectrales

Una imagen digital está compuesta por píxeles, cada píxel tiene un valor para cada banda espectral, este valor es la representación numérica de la cantidad de energía electromagnética reflejada y captada por un sensor. La cantidad de energía se registra numéricamente en bits por un sistema de adquisición (Román e Indira, 2013).

Los sensores multiespectrales tienen la capacidad de captar la información en un número de bandas reducidas (3 a 30 bandas), generando imágenes en dos dimensiones x e y (Figura 11).

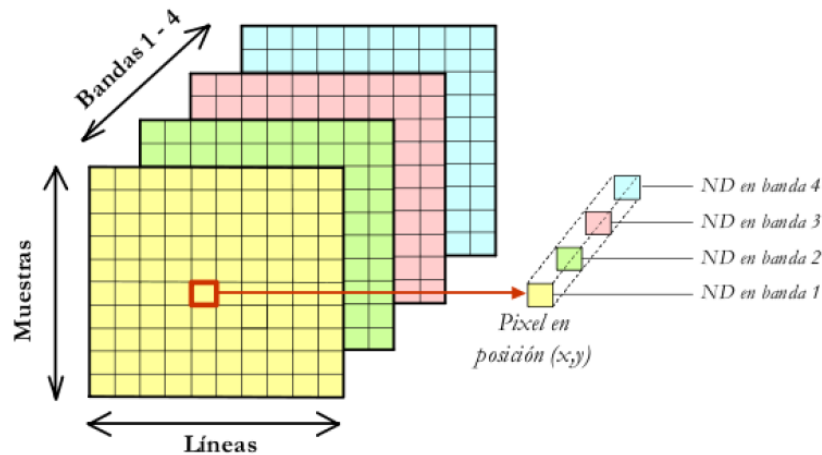


Figura 11. Imagen multiespectral en 4 bandas (Rojas, 2009).

Los elementos que conforman un sistema de adquisición para registrar una sola banda son (Rodríguez, 2010):

- **Óptica.** Es un elemento o sistema diseñado para captar la radiación que incide en el detector. Este nos proporciona la resolución espacial de nuestro sistema.
- **Detector.** Es la parte fundamental de todo sistema de adquisición, ya que se encarga de convertir la radiación electromagnética que incide en el sistema en una respuesta electrónica, la cual se puede cuantificar y procesar.
- **Electrónica de acondicionamiento.** Diseñada para acondicionar y amplificar la respuesta electrónica medida por el detector, y nos ayudan a:
  - Eliminar fuentes de error constantes.
  - Disminuir la potencia de ruido mediante un filtro electrónico.
  - Varía el ancho de banda o el tiempo de respuesta del circuito.
- **Conversión A/D.** Para convertir la respuesta electrónica en unidades digitales que pueden ser procesadas y cuantificadas.
- **Funciones de procesamiento y visualización.** Los cuales se resumen en los siguientes elementos:
  - Control automático de ganancia (*Automatic gain control*), que permite variar los datos globales de ganancia y *offset*. Con esto se mejora el contraste de la imagen, pero se pierde información radiométrica. Este solo se emplea en la parte central de la imagen, llamada ROI (por sus siglas en inglés *Region of interest*).
  - Paleta de niveles de gris o color falso empleada para codificar la imagen
  - Codificador de video para generar señales compatibles con los estándares de videos comunes.

## Imágenes hiperespectrales

Los sensores hiperespectrales permiten muestrear el espectro electromagnético en intervalos 5 a 10 nm. Este muestreo permite generar imágenes que contienen cientos de bandas espectrales del espectro electromagnético (Román e Indira, 2013), permitiendo definir firmas espectrales más definidas y “continuas” (Figura 12). Estas firmas espectrales nos proporcionan mayor información sobre el espectro electromagnético reflejado y por tanto una descripción más detallada sobre el material u objeto estudiado (Rodríguez, 2015).

Tabla 2. Clasificación del espectro electromagnético por rangos de longitud de onda. El rango que nos interesa y vamos a trabajar va de 1.0 a 2.5  $\mu m$  (SWIR).

<i>Radiación electromagnética</i>	<i>Longitud de onda</i>
Ultravioleta	0.001-0.400 $\mu m$
Visible	0.400-0.700 $\mu m$
NIR( <i>Near Infrared</i> )	0.700- 1.000 $\mu m$
SWIR ( <i>Short Wavelength Infrared</i> )	1.000-2.500 $\mu m$
MIR ( <i>Medium Wavelength Infrared</i> )	3.000-5.000 $\mu m$
LWIR ( <i>Long Wavelength Infrared</i> )	8.000-14.000 $\mu m$

Dentro del infrarrojo, el NIR y el SWIR se conocen como el infrarrojo reflejado, ya que la radiación es reflejada y no emitida por los objetos.

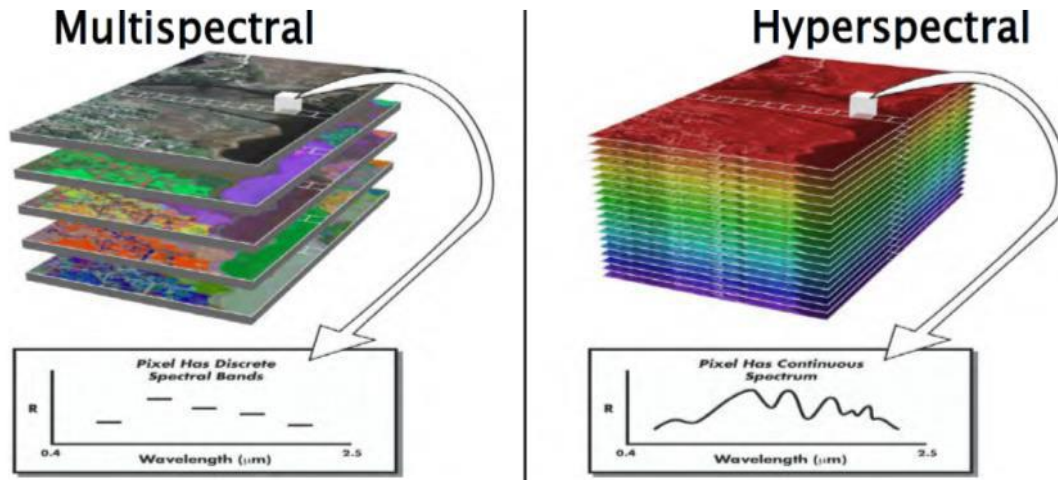


Figura 12. Diferencias entre una imagen multiespectral e hiperspectral. Como se puede ver el sensor multiespectral registra en un número de bandas reducido si se compara con el número de bandas en el que es capaz de registrar un sensor hiperspectral (Rodríguez, 2015).

## 2.5 Fuentes de radiación

La radiación es el transporte o propagación de energía en forma de partículas u ondas (González et al., 2011). Estas radiaciones pueden ser divididas en: radiaciones ionizantes y no ionizantes (Carrasco, 2003):

- Radiaciones ionizantes que se producen por la radiación de materiales radiactivos (ya sean naturales o artificiales),
- Radiaciones no ionizantes que engloban toda la radiación y los campos del espectro electromagnético.

La radiación Infrarroja (IR) se debe a cambios en los estados de energía de electrones orbitales en los átomos o en los estados vibracionales y rotacionales de los enlaces moleculares de los materiales. Todos los materiales a temperaturas superiores al cero absoluto (0 K o -273.15 °C) emiten radiación Infrarroja; por esta razón, la cantidad y longitud de onda de la radiación emitida dependerá de la temperatura y de su composición.

Existen fuentes naturales que emiten radiación electromagnética, una de ellas es el sol, el cual es la principal fuente de radiación infrarroja (Figura 13), la cual constituye el 59% del espectro de emisión solar. Asimismo, la superficie terrestre genera radiación debido a la gran cantidad de Uranio, Torio y otros elementos radiactivos (González et al., 2011), además existen fuentes artificiales que generan radiación infrarroja: emisores no luminosos y lámparas o emisores luminosos (infrarrojos proximales).

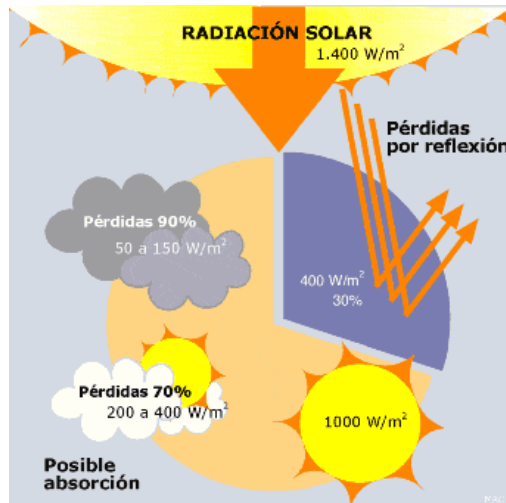


Figura 13. El Sol es la principal fuente de radiación electromagnética que incide en nuestro planeta. La Tierra recibe la radiación electromagnética del Sol y re-irradiada de nuevo al espacio una cantidad de calor igual a la radiación incidente. La radiación solar es una energía de baja concentración, ya que fuera de la atmósfera la intensidad de radiación solar que recibe la Tierra oscila entre los 1.300 y los 1.400  $\text{W/m}^2$  aproximadamente. (Imagen obtenida de Ambientum, portal profesional del medio ambiente).

Los emisores luminosos son lámparas que están compuestas por filamentos de tungsteno (o carbono) en forma de ampolla de cristal, esta contiene un gas a baja presión y a su vez posee un reflector para controlar la dirección del haz de luz generada.

Las lámparas se adquieren por separado y estas se montan en bases de diferentes materiales. Estas pueden ser combinadas con lámparas que generan luz ultravioleta, para una aplicación de luz ya sea parcial o total. Estas son llamadas lámparas solares (Figura 14). Se pueden emplear lámparas exclusivas para generar un baño de luz infrarroja cuando sea requerido.



Figura 14. Lámparas solares. Son utilizadas para diferentes propósitos, iluminación de una calle, una casa, estacionamiento, industria, hospitales etc. (Imagen obtenida de la web Green In)

## 2.6 Conceptos básicos de radiometría

A continuación, se presentan las definiciones básicas para entender el concepto de radiometría, y la interacción entre el sensor y el objeto de estudio (Gómez, 2006; Allaby, 2013):

- Radiometría: La medición de la radiación incidente por un radiómetro.
- Radiómetro: Instrumento para medir la radiación electromagnética (por lo general la radiación infrarroja). Puede ser ajustado de forma precisa para medir frecuencias específicas, por lo general tiene baja resolución espacial.
- Energía radiante ( $Q$ ): energía total radiada en todas direcciones por un cuerpo, se mide en Julios (J).

$$Q_\lambda = \frac{\partial Q}{\partial \lambda}$$

- Flujo radiante ( $\Phi$ ): es la energía radiante transferida por radiación de una superficie a otra por unidad de tiempo; es decir, es la cantidad de energía que se transmite por segundo, la cual se mide en w (W) (Figura 15).

$$\Phi = \frac{\partial Q}{\partial t}$$

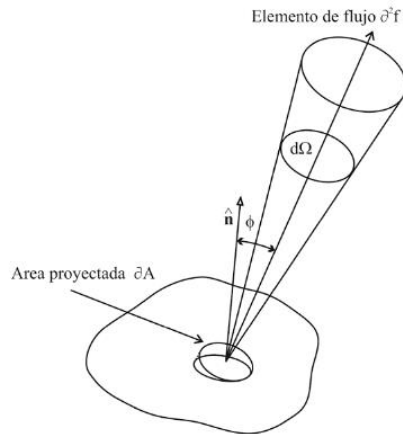


Figura 15. Flujo radiante se refiere a la razón a la cual la energía radiante pasa a través de un cierto lugar. También se le conoce como potencia radiante al ser medido en watts. (Lira, 2010)

- Emitancia o exitancia radiante ( $M$ ): Flujo radiante o luminoso emitido que se transmite cada segundo por cada metro cuadrado de la superficie emisora, se mide en watt por metro cuadrado ( $W/m^2$ )

$$M = \frac{\partial \Phi}{\partial s}$$

Otro término empleado es la emitancia espectral  $M_\lambda$  para hacer referencia a la emitancia en una longitud de onda específica, en cuyo caso las unidades son  $Js^{-1}m^{-2}\mu^{-2} = Wm^{-1}\mu^{-1}$

- Irradiancia ( $E$ ): concepto similar al de emitancia, pero referido a la energía que llega a un cuerpo a través del espacio procedente de otro (que la ha emitido). De igual forma se mide en watt metro cuadrado ( $W/m^2$ ). (Figura 16)

$$E = \frac{\partial \Phi}{\partial S_0}$$

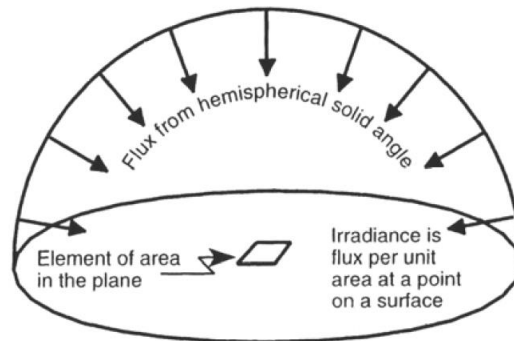


Figura 16. Irradiancia se refiere al flujo radiante por unidad de área incidente en un punto de una superficie de un ángulo sólido. (Gómez, 2006)

- Radiancia ( $L$ ): es el flujo radiante ( $\Phi$ ) que abandona una unidad de área en una dirección particular siguiendo un ángulo sólido particular (Figura 17). Su importancia estriba en que es la magnitud que capta el sensor. Las unidades en que se mide son  $W/(sr \cdot m^2)$ .

$$L = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \omega \partial s} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \omega \partial s_0 \cos \theta}$$

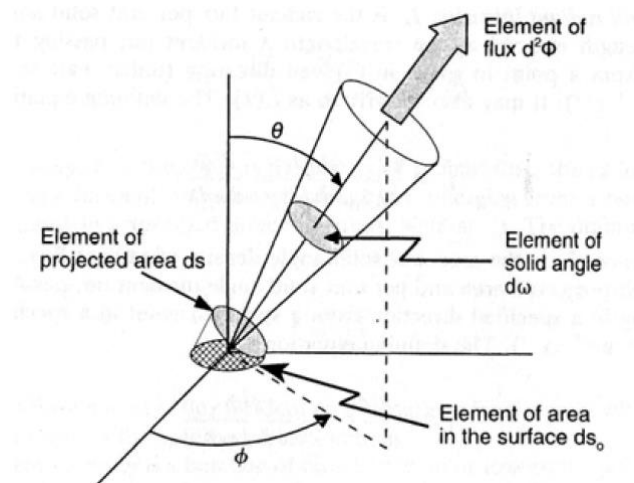


Figura 17. Radiancia es la intensidad por unidad de área que es proyectada. Es una función de la posición y la dirección. (Gómez, 2006)

- Radiancia espectral ( $L_\lambda$ ) : Indica el total de energía radiado en una longitud de onda específica por unidad de área y ángulo solido de medida. Se mide en  $W/(m^2 \cdot sr \cdot nm)$  (Figura 18)

$$L_\lambda = \frac{\partial L}{\partial \lambda} = \frac{\partial^3 \Phi}{\partial \omega \partial S_0 \cos \theta \partial \lambda}$$

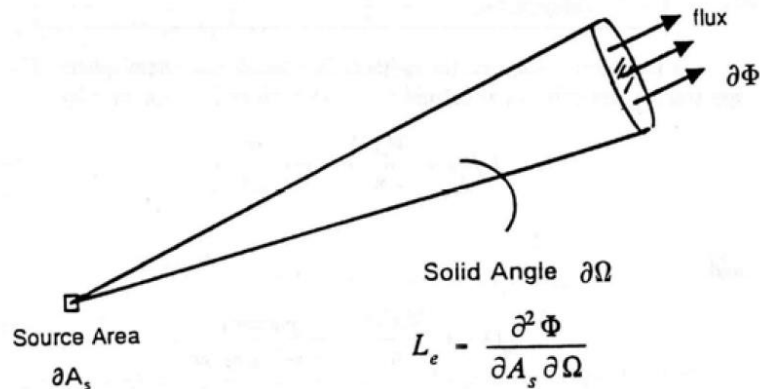


Figura 18. Radiancia espectral nos indica la cantidad de flujo radiante (energía por unidad de tiempo) por unidad de longitud de onda (micras) que es radiada en un cono por el ángulo solido (estereorradián) por una fuente que contiene un área determinada. (Gómez, 2006)

- Reflectancia, reflectividad, coeficiente de reflexión o albedo ( $\rho$ ): Es la relación entre el flujo incidente y el reflejado por una superficie, por tanto, se considera adimensional, es diferente para cada superficie receptora y para cada cuerpo.
- Absorción o coeficiente de absorción ( $\alpha$ ): Relaciona el flujo incidente y el que se absorbe la superficie, es adimensional.
- Ángulo solido ( $\omega$ ): Es el área del casquete esférico, en una esfera de radio unitario, abarcado por un cono cuyo vértice está en el centro de la esfera. La unidad es el SI (estereorradián), cuyo símbolo es sr. (Figura 19)

$$\omega = \frac{S}{r^2}$$

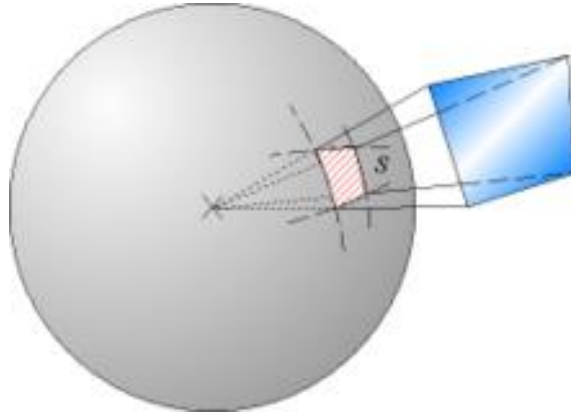


Figura 19. Ángulo sólido es el área del casquete esférico, es una esfera de radio unidad, abarcado por un cono cuyo vértice está en el centro de la esfera. Es una magnitud adimensional. (Imagen obtenida de la web *Magnitudes y unidades en radiometría y fotometría*)

### 3. Software para la visualización y procesamiento de datos hiperespectrales

El software es un conjunto de programas, tareas e instrucciones que permiten al usuario ejecutar distintas tareas o actividades deseadas en una computadora o dispositivo electrónico (Figura 20). Y los componentes físicos de una computadora o dispositivo se le conocen como hardware. (Prendes, y Amorós, 2001)



Figura 20. Software instrucciones que se ejecutan dentro de la computadora en forma de código para llevar a cabo una función específica. (Imagen obtenida de la web *¿Cuál es la diferencia entre Hardware y Software?*)

Podemos tener un equipo de tratamiento digital de imágenes que se caracteriza por ser un sistema cerrado, esto significa que tanto el software y el hardware se complementan en una serie de componentes estructurados, para resolver aplicaciones. Este tipo de sistemas tienen una estructura modular, lo que quiere decir que el usuario puede estar en contacto

con la configuración básica y posteriormente añadir otras funciones o aplicaciones si así lo requiere.

Cualquier sistema de tratamiento de imágenes, incluyen unidades que permiten al usuario la manipulación de archivos donde se encuentran las imágenes, así como las modificaciones que en ellas se apliquen.

Dentro de las unidades que ayudan a manipular las imágenes existentes, se encuentra una herramienta que ayuda a constituir una imagen a partir de una o más bandas distintas, con ello se obtienen una mezcla de información muy importante para una mejor visualización.

Las distintas operaciones que se pueden realizar en las imágenes, no serían posibles si el programa en turno no conociera con anterioridad la estructura de la imagen, como son las distintas bandas, nombre, columnas, líneas, coordenadas o formato en el que se graba. Una vez que el programa se familiariza con los distintos datos, el software empleado puede generar las dimensiones y formatos de la imagen, y esto facilita la visualización, la búsqueda de coordenadas y las variaciones lineales entre las distintas bandas.

En la actualidad existen distintos softwares encargados del tratamiento de imágenes hiperespectrales. A continuación, se analizarán dos tipos: los de origen comercial y los de uso gratuito.

### 3.1 Software comercial

#### 3.1.1 ENVI (Environment for Visualizing Images)

Es una aplicación informática utilizada para el procesamiento y el análisis de imágenes geoespaciales. Lo utilizan principalmente los profesionales en percepción remota y analistas de imágenes. ENVI es una asociación de algoritmos científicos para el procesamiento de imágenes, este posee un asistente que guía a los usuarios para la realización de tareas de tipo complejas (Jiménez, 2011). Fue desarrollado por *Better solutions consulting*, LLC, y en el año 2000 fue vendida a la empresa Kodak.

El programa está constituido por un lenguaje (IDL) especializado en manipular datos multidimensionales y su visualización. Se destaca del resto de programas similares debido a su contenido en funciones que adaptan información del territorio o geográficas. Este software se caracteriza por ser multiplataforma, existen versiones para Windows, LINUX y algunas versiones para Unix; y es totalmente compatible con ArcGis.

ENVI soporta imágenes geoespaciales de los actuales sensores aerotransportados o satélites. Como los sensores ASTER, AVIRIS, Landsat 8, etc. Los tipos de datos soportados son: hiperespectrales, multiespectrales, infrarrojo, térmicos, radar, ASCII, entre otros.

También incluye un conjunto de herramientas que nos ayudarán en el análisis de imágenes, y nos permitirán acceder de manera rápida y precisa a los algoritmos. Para las imágenes hiperespectrales ENVI nos permite realizar lo siguiente:

- Clasificación supervisada y no supervisada
- Identificar regiones de interés (ROI)
- Extracción de características
- Detección de anomalías
- Bandas espectrales índice
- Análisis espacio-tiempo
- Entre otras herramientas

Tiene una función que permite crear una inteligencia procesable mediante la herramienta THOR (*Tactical Hyperspectral Operational Resource*) esta es un conjunto de flujos de trabajo hiperespectrales automatizados, esta herramienta es desarrollada para la explotación y análisis de las imágenes hiperespectrales.

### 3.1.2 ERDAS IMAGINE

Es una aplicación de percepción remota con la capacidad de edición de gráficos tipo raster, fue diseñado por ERDAS para aplicaciones geoespaciales (Posada et al., 2012). Está dirigido principalmente para el procesamiento de datos tipo raster y permite al usuario preparar, mostrar y mejorar las imágenes digitales y ser usadas para el mapeo de información geográfica (SIG) o en el diseño (CAD).

Posee distintas herramientas que permite la realización de diversas operaciones en una imagen y generar una respuesta a cuestiones geográficas específicas.

Te permite una manipulación de los valores y las posiciones de datos de imágenes, y con ello es posible ver las características que a simple vista serían imposibles de detectar y la localización de diversas geo-posiciones de características que en otro modo serían solo gráficos.

Mediante el brillo o reflectancia de la luz de las superficies en la imagen nos pueden ayudar para analizar la vegetación en la zona, prospección minera, etc.

Para el análisis hiperespectral ERDAS IMAGINE nos ofrece:

#### 1.- Análisis espectral

Extrae información de asignación de material con un mínimo esfuerzo y conocimiento de imagen hiperespectral. Las herramientas que utiliza son:

- Detección de anomalías y objetivos
- Mapeo e identificación de materiales

#### 2.- Análisis hiperespectral

- Detección de anomalías
- Detección de objetivos
- Asignación de materiales

- Identificación del material

### 3.- Pre procesado en el análisis hiperespectral

- Longitud de onda de la banda / especificación de ancho
- Identificación de mala banda
- Subconjunto espectral y espacial
- Ajuste atmosférico
- Fracción mínima de ruido

### 4.- Librería espectral

- ASTER
- JPL
- USGS V4
- SGS V6
- Importar nuevas versiones de librerías

### 5.- Análisis espectral de estación de trabajo

- Espacio de trabajo multipanel proporciona acceso a todas las herramientas y permiten el análisis interactivo de imágenes hiperespectrales, firmas espectrales y otras pantallas de datos
- Tres vistas geoespacialmente vinculadas
- Vista principal
- Vista general de la imagen
- Vista zoom
- Herramientas argumentales espectrales
- Accesos a todos los procesos y tareas
- Metodologías de análisis espectral
- *Orthogonal Subspace projection (OSP)*
- *Spectral Angle Mapper (SAM)*
- *Spectral Correlation Mapper (SCM)*
- *Constrained Energy Minimization (CEM)*

### 3.1.3 PCI GEOMATIC

Es un software utilizado en teledetección, para el procesamiento de datos de observación de la tierra (Jiménez, 2011). Está dirigido principalmente el procesado rápido de datos y permite cargar imágenes satelitales y aéreas, donde se puede realizar el análisis avanzado.

Geomática para el procesado digital de imágenes satélites se ofrece con dos niveles de funciones:

- Geomática *Core* contiene todo lo necesario para clasificar imágenes hiperespectrales (paquete básico)

- Geomática *prime* ofrece funciones analíticas de geoprocésamiento raster (paquete ampliado)

Las capacidades hiperespectrales están diseñadas para procesar y analizar las imágenes adquiridas con espectrómetros de imágenes aéreas y de satélites. Este compuesto de un conjunto de programas específicos de aplicación hiperespectral, un conjunto de programas de visualización y bibliotecas espectrales.

Presenta los siguientes menús, para el procesado de datos hiperespectrales:

#### 1.- Pre procesamiento de datos

Preparan los datos para la interpretación visual, la eliminación de efectos atmosféricos o análisis automatizado, se pueden dividir en calibración relacionada con el sensor, corrección geométrica y la eliminación de ruido.

#### 2.- Corrección atmosférica simple

Permite la corrección atmosférica simple para datos hiperespectrales: calibración de línea empírica, corrección de campo plano.

#### 3.- Análisis local

Se pueden hacer análisis locales compatibles con: selección de *endmembers*, desmezclado espectral, clasificación SAM.

## 3.2 Software libre

### 3.2.1 ORFEO *Toolbox* (OTB)

Es una biblioteca para el procesamiento de imágenes de teledetección (Jiménez, 2011), proporciona usos potenciales de las imágenes de satélites con todas las herramientas para su utilización. Está dirigida inicialmente a las imágenes de alta resolución adquiridas.

ORFEO ofrece:

- Acceso a imágenes: acceso de lectura / escritura para la mayoría de formatos de teledetección de imágenes, acceso a metadatos y visualización.
- Acceso a los datos: acceso a datos de vector (*shapefile*, kml)
- Filtrado: eliminación de ruido
- Extracción de características: cálculos de textura incluyendo *haralick*, densidad de borde, puntos de interés, líneas
- Segmentación de imagen: región en crecimiento, cuencas, conjuntos de nivel
- Clasificación: *k-means*, SVM, Markov, campos aleatorios y el acceso a todos los algoritmos de aprendizaje.
- Reconstrucción estéreo a partir de imágenes
- Ortorectificación y proyecciones de mapa

- Índices radiométricos
- Segmentación y filtrado basado en objetos
- Visualización: un sistema de visualización flexible y personalizable a través de *plugins*

### 3.2.2 Matlab HIAT (Hyperspectral Image Analysis Toolbox)

La herramienta de Matlab HIAT es una colección de funciones que amplían las capacidades del entorno informático (Jiménez, 2011). Proporciona al usuario un entorno en el que se utilizan diferentes métodos de procesamiento de imágenes de datos hiperespectrales y multispectrales.

Hiat otorga métodos estándar de procesamiento de imágenes, como el análisis de discriminante, componentes principales, distancia euclídea y la máxima probabilidad.

Las características que incluyen son:

- Formatos de imagen para cargar y guardar: mat, bsq, bil, bip, .jpg, .tiff, con información y encabezado de ENVI
- Algoritmos de tratamiento previo: mejoras de resolución y análisis de componentes principales
- Extracción de características / algoritmos de selección: análisis de componentes principales, análisis discriminante, descomposición en valores singulares de banda

### 3.2.3 MultispecW32

Se basa en un sistema de procesamiento interactivo para el análisis de datos terrestres de imágenes multispectrales (Escuer y Segovia, 2005). Su principal objetivo es ayudar a exportar los resultados de investigación mediante buenos métodos para el análisis de imágenes hiperespectrales. También se pueden utilizar para imágenes médicas multibanda y en actividades educativas de nivel universitario.

*Multispec* cumple con los siguientes objetivos de diseño:

- Es una aplicación informática de fácil acceso con el poder de procesado adecuado, financieramente al alcance de cualquier investigador
- Su sistema es fácil de aprender y de utilizar, incluso para los usuarios poco habituales en cuanto al uso de este tipo de software
- El sistema proporciona una facilidad en la importación de datos, contiene una variedad en formatos y los resultados de fácil exportación

Tiene la capacidad de:

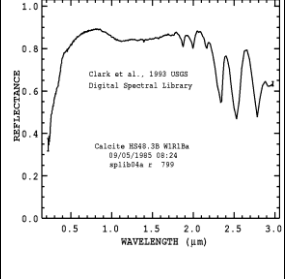
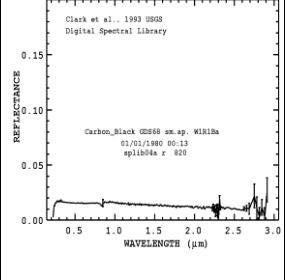
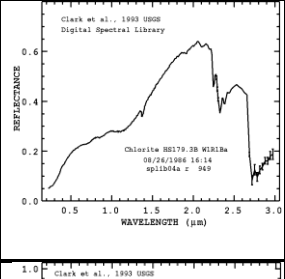
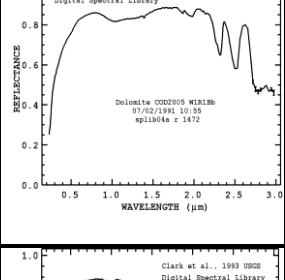
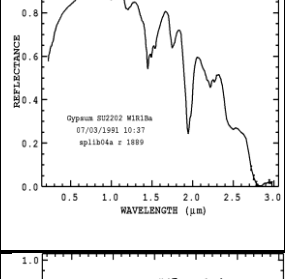
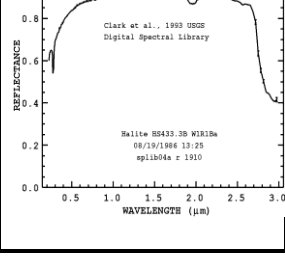
- Importar datos en formato binario o ASCII con o sin encabezado, y en banda intercalada por línea (BIL), banda secuencial (BSQ) o banda intercalada por muestra (BIS). Los valores de datos pueden ser de 8, 16 o 32 bits.
- Muestra imágenes multiespectrales en una variedad de formatos de blanco y negro o colores, imágenes temáticas en blanco y negro o color.
- Histograma de datos para la determinación del régimen de escala de grises para una pantalla o para incursión y representación gráfica.
- Formatear el archivo de datos en un gran número de formas
- Permite crear nuevos canales de datos de los canales ya existentes. Estos canales pueden ser por la transformación de componentes principales o por la extracción de los existentes.
- Ayuda a una determinación de las mejores características espectrales para usar una clasificación
- Clasificar una aérea designada en el archivo de datos. Proporciona seis algoritmos de clasificación: distancia mínima de medios, clasificador de correlación (SAM), filtro adaptado (CEM), discriminante lineal de *Fisher*, régimen de máxima probabilidad de pixeles de gauss o clasificador espectral / espacial
- Resultados de la clasificación en lista de zonas de formación o prueba, en forma de tabla, campos, clases o por grupos de clases base.
- Mostrar diagramas de dispersión de los datos de pares de bandas y elipses de concentración para los conjuntos de entrenamiento y aéreas seleccionadas.
- Mostrar una presentación a color de la matriz de correlación para un campo o clase como una herramienta de visualización
- Transferir los resultados intermedios o finales, ya sean en texto, imágenes blanco y negro o a color

## 4. Base de datos de firmas espectrales de libre acceso

### 4.1 Servicio Geológico de Estados Unidos (*United States Geological Survey, USGS*)

Tabla 3.- Tabla con descripción y espectro característico de algunos minerales. Obtenido de la página web USGS Digital splib04 Spectral Library. Sample Descriptions and Plots.

Nombre	Clasificación	Grupo Mineral	Mineral	Formula	Recolectada en la Localidad:	Espectro característico
Anhidrita	MINERAL	Sulfato	Anhidrita	CaSO <sub>4</sub>	Nuevo Mexico	
Barita	MINERAL	Sulfato	Barita (Grupo de la Barita)	BaSO <sub>4</sub>	Custer Estado de Colorado	
Biotita	MINERAL	Filosilicato	Biotita (Grupo de la Mica)	K(Mg, Fe <sup>2+</sup> ) <sub>3</sub> (Al, Fe <sup>3+</sup> )Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH, F) <sub>2</sub>	Ontario	
Calcita	MINERAL	Carbonato	Calcita (Grupo de la Calcita)	CaCO <sub>3</sub>	Mina de Nevada	

Calcita	MINERAL	Carbonato	Calcita (Grupo de la Calcita)	CaCO <sub>3</sub>	Cherokee Estado de Kansas	
Carbón Negro	Elemento	Elemento	Carbón	C	Sintético	
Clorita	MINERAL	Filosilicato	Clorita (Grupo de la Clorita)	(Mg, Fe) <sub>3</sub> (Si Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( OH) <sub>2</sub> - (Mg, Fe) <sub>3</sub> (O H) <sub>6</sub>	Colorado	
Dolomita	MINERAL	Carbonato	Dolomita (Grupo de la Dolomita)	CaMg( CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Montañas Grapevine, Nevada	
Yeso	MINERAL	Sulfuros complejos	Yeso	CaSO <sub>4</sub> • 2H <sub>2</sub> O	Desconocido	
Halita	MINERAL	Haluros	Halita	NaCl	Kansas	

Ilita	MINERAL	Filosilicato	Ilita (Grupo de la mica)	(K, H <sub>3</sub> O) (Al, Mg, Fe) <sub>2</sub> (Si, Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> [(O H) <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O]	Marble Head, WS	<p>Clark et al., 1993 USGS Digital Spectral Library Illite 0204 (Marblehead) WIR11b 06/30/1988 13:21 sp11b04a r 2302</p>
Caolinita	MINERAL	Filosilicato	Caolinita (Grupo de la caolinita-serpentina)	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	Lamar Pittsburgh, Bath S.C.	<p>Clark et al., 1993 USGS Digital Spectral Library Kaolinite 055 WIR11b 02/12/1988 13:20 sp11b04a r 2597</p>
Limonita	MINERAL	Hidróxido	Limonita (mezcla de hematita)	FeO•O H•nH <sub>2</sub> O	Tuscaloosa Estado de Alabama	<p>Clark et al., 1993 USGS Digital Spectral Library Limonite 0541.3 WIR11b 07/28/1987 14:17 sp11b04a r 2788</p>
Montmorillonita	MINERAL	Filosilicato	Montmorillonita (Grupo de la Montmorillonita)	(Na, Ca) <sub>0.33</sub> (Al, Mg) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> •n H <sub>2</sub> O	Mina Husband, Polkville, Mississippi	<p>Clark et al., 1993 USGS Digital Spectral Library Montmorillonite 0200 WIR11b 02/13/1988 10:23 sp11b04a r 2177</p>
Oligoclasa	MINERAL	Tectosilicato	Oligoclasa Grupo de las (Plagioclasas)(Feldspato)	(Na, Ca) Al(Al, Si) Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	Mitchell Co., New York	<p>Clark et al., 1993 USGS Digital Spectral Library Oligoclase 05110.39 WIR11b 11/14/1986 08:11 sp11b04a r 3538</p>

Ortoclasa	MINERAL	Tectosilicato	Ortoclasa (Grupo de los Feldespatos)	$KAlSi_3O_8$	Mina Ruggles, New Hampshire	<p>Clark et al., 1993 USGS Digital Spectral Library Orthoclase 0313.3B WIR18P 11/24/1986 14:17 sp11b04a v 3786</p>
Pirita	MINERAL	Sulfuros	Pirita (Grupo de la Pirita)	$FeS_2$	Rico, Colorado	<p>Clark et al., 1993 USGS Digital Spectral Library Pyrite 0333.3 WIR18P 06/10/1987 13:04 sp11b04a v 3999</p>
Cuarzo	MINERAL	Tectosilicato	Cuarzo	$SiO_2$	Brasil	<p>Clark et al., 1993 USGS Digital Spectral Library Quartz 0333.0-74um fr WIR18a 03/28/1989 10:30 sp11b04a v 4124</p>

La finalidad de la Tabla 3 es mostrar que las firmas espectrales de los minerales que podemos encontrar en las rocas carbonatadas son muy diferentes. Esta variación espectral permite diferenciar con seguridad y precisión el tipo de mineral sin ambigüedad. La base completa de todos los minerales y tipos de rocas de la USGS, entre otras dos bases de datos, se encuentran integradas en el *software* ENVI, esto permite tener control sobre las firmas obtenidas con el equipo HySpex SWIR320m-e, y mediante esta comparación asegurarnos, que tanto nuestras correcciones como las mediciones se hicieron de manera adecuada. Y con esto tener la certeza de que en los análisis posteriores el resultado arrojado será correcto.

## 5. Sistema de adquisición HySpex 320m-e

### 5.1 Especificaciones técnicas

El equipo utilizado en este trabajo una cámara HySpex SWIR 320m-e, la cual registra 256 bandas dentro del infrarrojo de onda corta (SWIR; *Short Wave Infrared*), con una resolución espectral de 6.25nm en cada banda que posee (Tabla 4). La cámara es un sensor de empuje (*pushbroom*), es decir, que la cámara o el objeto que se desea visualizar debe desplazarse para que se pueda generar una imagen. Por lo general, los sensores de empuje están conformados por una línea de pequeños sensores (en la cámara HySpex 320m-e son 320), cada uno de los cuales forma un pixel individual, cada uno con su propia resolución espectral (256 bandas espectrales).

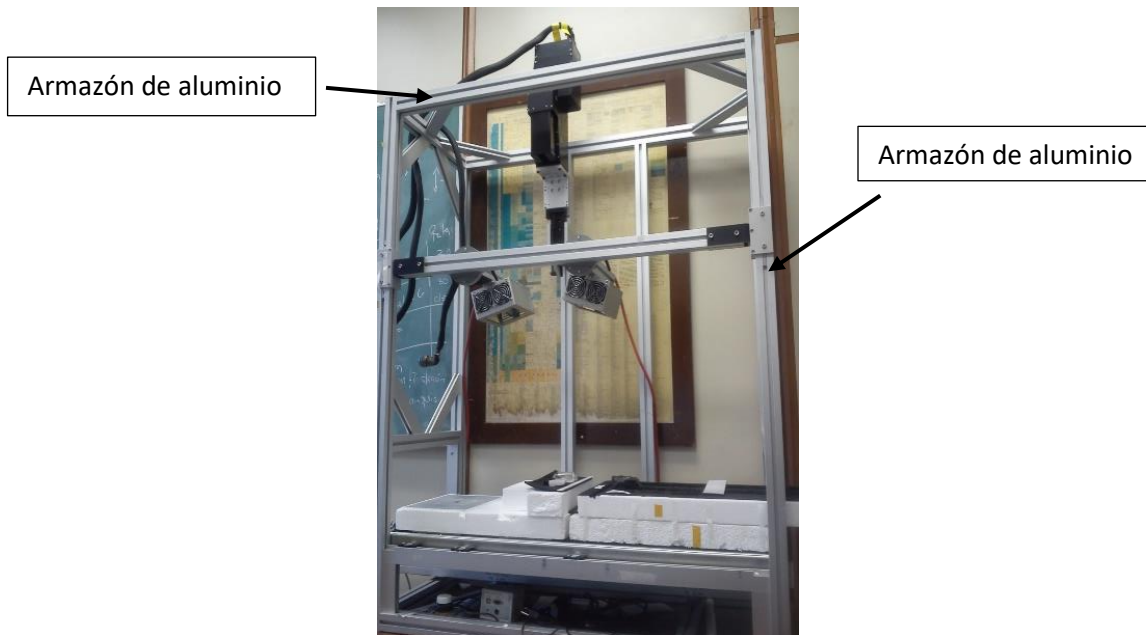
Tabla 4. Características de los diferentes modelos de cámaras hiperespectrales, prestándole más atención al modelo SWIR 320m-e que fue el modelo empleado en las adquisiciones (Tabla obtenida de NEO- HySpex Hyperspectral cameras description)

	VNIR-640	VNIR-1600	SWIR-320i	SWIR-320m	SWIR-320m-e
<b>Detector</b>	Si CCD 640 x 480	Si CCD 1600 x 1200	InGaAs 320 x 256	HgCdTe 320 x 256	HgCdTe 320 x 256
<b>Spectral range</b>	0.4 – 1.0 $\mu\text{m}$	0.4 – 1.0 $\mu\text{m}$	0.9 – 1.7 $\mu\text{m}$	1.3 – 2.5 $\mu\text{m}$	1.0 – 2.5 $\mu\text{m}$
<b>Spatial pixels</b>	640	1600	320	320	320
<b>FOV across track*</b>	18.4°	17°	14°	14°	14°
<b>Pixel FOV across/- along track*</b>	0.5 mrad/ 0.5 mrad	0.18 mrad/ 0.36 mrad	0.75 mrad/ 0.75 mrad	0.75 mrad/ 0.75 mrad	0.75 mrad/ 0.75 mrad
<b>Spectral sampl.</b>	5 nm	3.7 nm	5 nm	5 nm	6.25 nm
<b># of bands</b>	128	160	145	256	256
<b>Binning modes</b>	1, 2, 4	2, 4, 8	-	-	-
<b>Digitization</b>	12 bit	12 bit	12 bit	14 bit	14 bit
<b>Max frame rate**</b>	500 fps	135 fps	350 fps	100 fps	100 fps
<b>Sensor head wgt.</b>	3.5 kg	4.6 kg	6.8 kg	7.0 kg	7.5 kg
<b>Sensor head dim. (lwh in cm)</b>	31.5x8.4x13.8	31.5x8.4x13.8	32.0x14.0x15.2	36.0x14.0x15.2	36.0x14.0x15.2

## 5.2 Instalación de la cámara HySpex 320m-e en el laboratorio

La cámara está diseñada para realizar mediciones en campo o en laboratorio. Para realizar mediciones en laboratorio se instala y fija sobre un armazón de aluminio, el procedimiento se describe brevemente a continuación:

1. El armazón de aluminio se debe colocar sobre una base firme para evitar movimientos durante la adquisición de los datos (Figura 21).



*Figura 21. Armazón de aluminio que fue diseñada para fijar la cámara hiperespectral, las lámparas y la plataforma móvil.*

2. En la parte posterior del armazón se encuentran dos barras verticales, estas sirven de base para fijar la cámara en posición vertical con tornillos sobre soportes de aluminio (Figura 22).

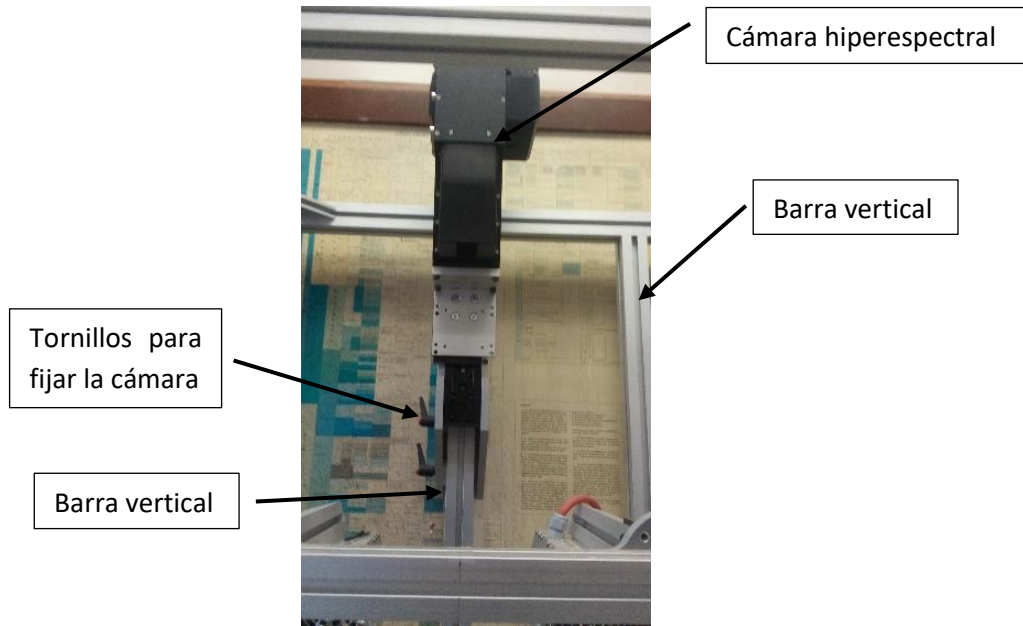


Figura 22. Barras verticales que sirve como soporte para la cámara HySpex SWIR 320m-e. Esta puede ser ajustada con tornillos para su movimiento dependiendo de la altura a la que se desee realizar las mediciones. El enfoque del objetivo de la cámara es hacia abajo.

3. En la parte frontal de la estructura se encuentra una barra horizontal móvil con dos soportes circulares, en estos soportes se fijan las lámparas que emiten la luz infrarroja necesaria para realizar las mediciones (Figura 23). Para regular la intensidad y enfocar el haz de luz emitida, se debe de ajustar verticalmente la barra y la inclinación de las lámparas, respectivamente.



Figura 23. Par de lámparas fundamentales en la adquisición. Estas pueden ser ajustadas a diferentes alturas dependiendo de las muestras colocadas en la plataforma.

4. En la parte inferior de la estructura fijamos un dispositivo de translación (*translation stage*), el cual se acopla a la plataforma móvil donde se colocarán las muestras que serán analizadas (Figura 24).

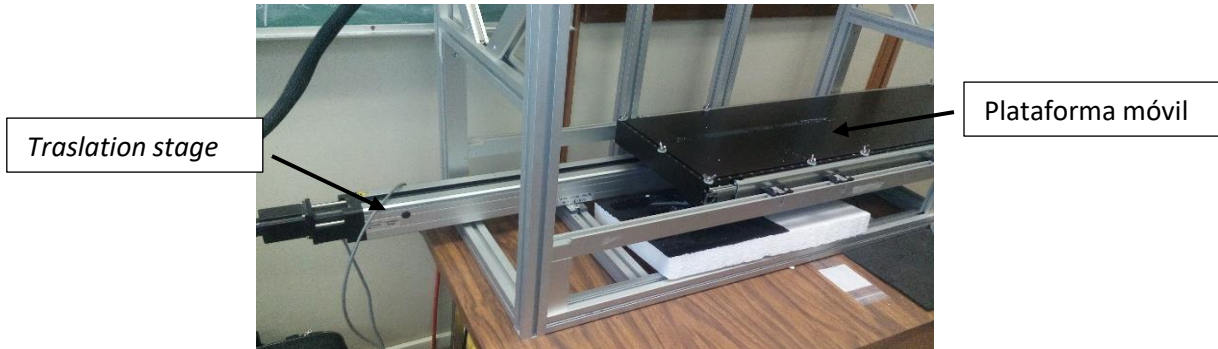


Figura 24. Translation stage y plataforma móvil. Estos son importantes porque la cámara posee un sensor push broom lo cual implica que para la adquisición de datos se debe mover las muestras hacia la izquierda o derecha.

5. La cámara se conecta a la computadora (la cual es la unidad de adquisición, manejo de la cámara, dispositivo de translación y plataforma móvil) mediante un cable con conectores circulares en ambos extremos (Figura 25).

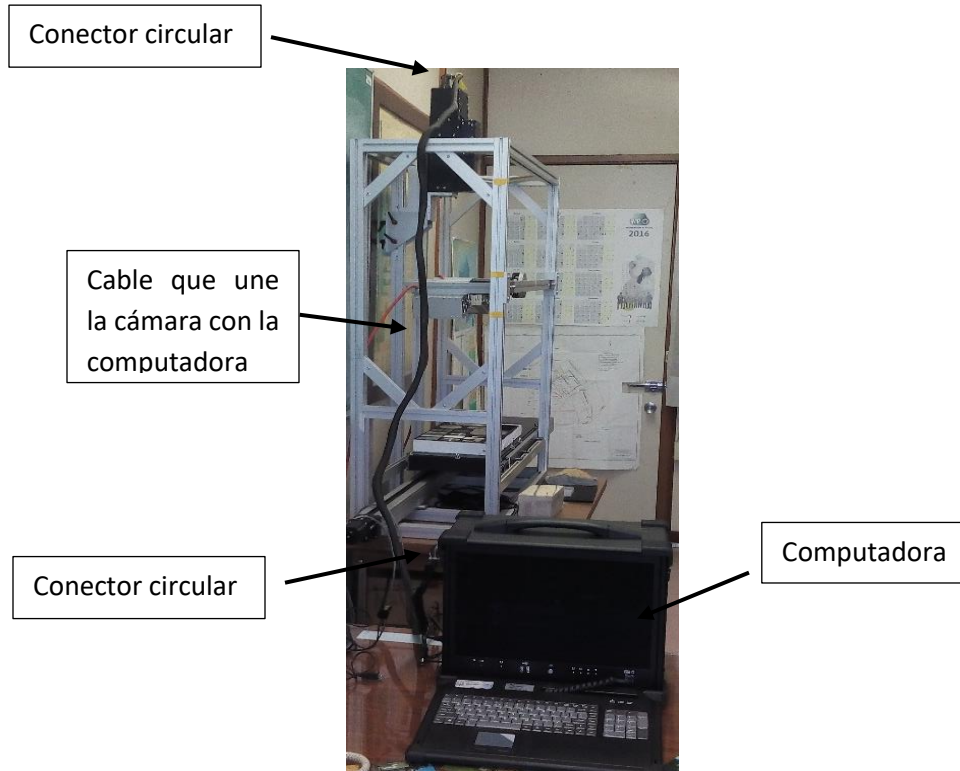


Figura 25. Computadora de campo. Este equipo está diseñado para controlar simultáneamente la cámara y la plataforma móvil. Se tiene instalado un software que permite la operación de la cámara, la plataforma móvil y

contiene los diferentes parámetros de medición. Adicionalmente, con este software se realizan las correcciones radiométricas que se requieren para procesar posteriormente las imágenes obtenidas.

6. Para contralar la plataforma móvil, se debe conectar el dispositivo de translación (*translation stage*) a un controlador al mediante un cable de puerto serial. Posteriormente, el controlador se conecta a la computadora mediante un cable tipo USB, por último, se conecta a la fuente de poder del controlador (Figura 26).

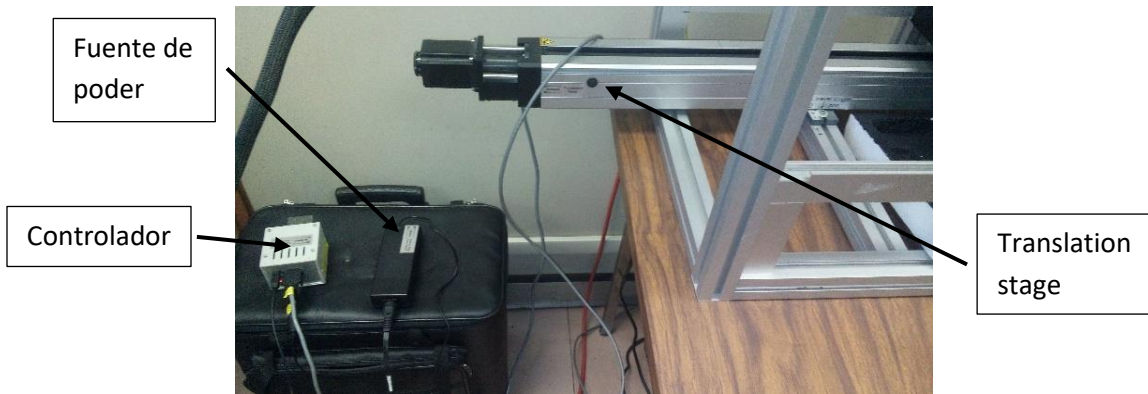


Figura 26. El controlador (caja de color gris) es una parte muy delicada y por ende muy importante para el funcionamiento total de la cámara, porque es el medio de transmisión de la computadora hacia la cámara y plataforma. Fuente de poder (caja de color negro) ayuda que el controlador siempre esté funcionando con corriente estable

7. Cada una de las lámparas de luz infrarroja tienen incluida una fuente de poder, para un mejor rendimiento (Figura 27).

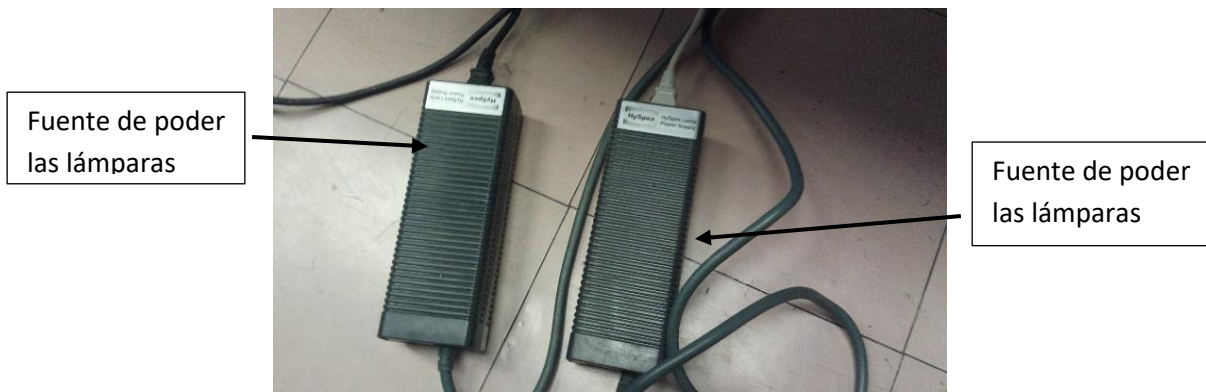


Figura 27. Fuentes de poder de las lámparas. Estas ayudan a las lámparas a mantener el flujo de corriente constante para su óptimo funcionamiento durante todo el tiempo de adquisición.

8. Finalmente se enciende la computadora para operar la cámara hiperespectral y sus diferentes componentes. **Precaución:** para evitar dañar la computadora o el controlador del dispositivo de traslación (*translation stage*), se debe de encender primero el controlador y después la computadora. **NUNCA** desconectar el controlador cuando la computadora esté encendida o conectar o encender el controlador cuando esté encendida la computadora.

## 6. Adquisición y procesamiento de datos hiperespectrales

Para determinar las distancias óptimas de medición se realizaron diferentes pruebas para obtener imágenes con la mejor calidad posible. Esta prueba es esencial antes de realizar el procesamiento y clasificación de las imágenes capturadas. También este rango buscado es importante debido a que las distintas muestras poseen diferentes espesores, por tal motivo, se debe colocar la cámara en una posición óptima, y con ello evitar estar ajustando la altura de la cámara al cambiar el espesor de las muestras.

### 6.1 Distancias óptimas de medición

#### 6.1.1 Longitud focal del lente para mediciones a 1 m de distancia.

La estructura de aluminio para instalar la cámara HySpex320m-e en laboratorio fue diseñada para trabajar con distancias focales entre 27 cm y 115 cm. Fijar la cámara a la distancia óptima de medición depende directamente de la lente que se seleccione para realizar las mediciones; en nuestro caso contamos con la recomendación provista por los proveedores, la cual nos indican que la distancia focal ideal para la colocación de la cámara es a una altura de  $1\text{ m} \pm 5\text{ cm}$ , y está definida desde la posición de las muestras hasta el lente de la cámara.

Se realizaron las siguientes pruebas modificando la altura en la cual se coloca la cámara:

- 1.- Se colocó la cámara a una altura de 105 cm a partir de las muestras colocadas en la plataforma (Figura 28).

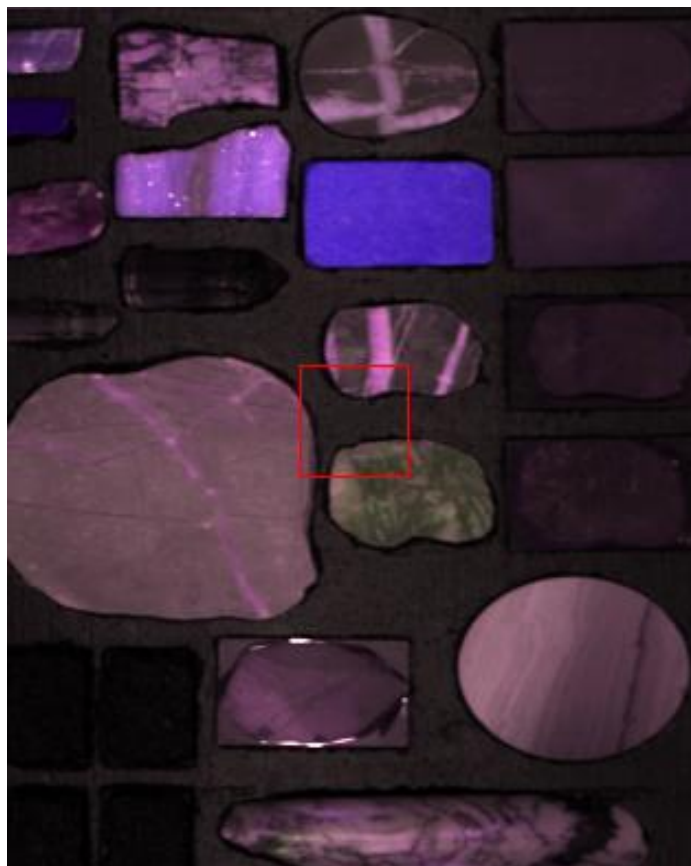


Figura 28.- Imagen de las muestras colocadas en la plataforma, a una distancia focal de 105 cm.

Se realizó la prueba con el mineral base (yeso) para asegurar que la calibración y las correcciones fueron hechas de manera correcta.

- Comparación del mineral yeso con las firmas base de la USGS (Figura 29), también se utilizó la herramienta Análisis Espectral (Tabla 5).

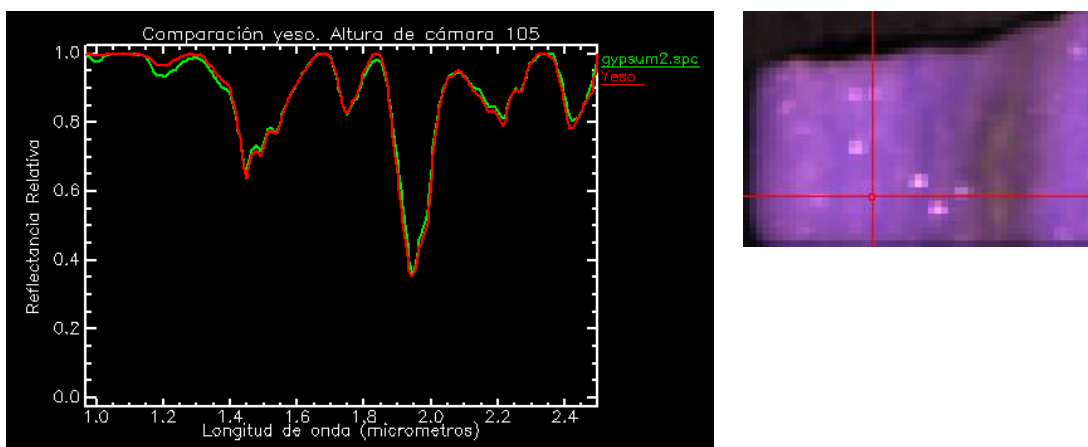


Figura 29.- Comparación del yeso obtenido (rojo) con el espectro base de la USGS (verde).

Tabla 5.- Tabla de la herramienta Análisis Espectral, la cual, nos permite tener una idea del porcentaje de precisión al comparar el espectro obtenido con las bases existentes.

Análisis Espectral			
Pixel x:70 y:102			
Librería espectral	Correlación	SAM	SFF
Gypsum2.spc	0.893	0.855	0.862
Gypsum1.spc	0.739	0.683	0.657

2.- Se coloca la cámara a una altura de 100 cm a partir de las muestras colocadas en plataforma para su adquisición (Figura 30).

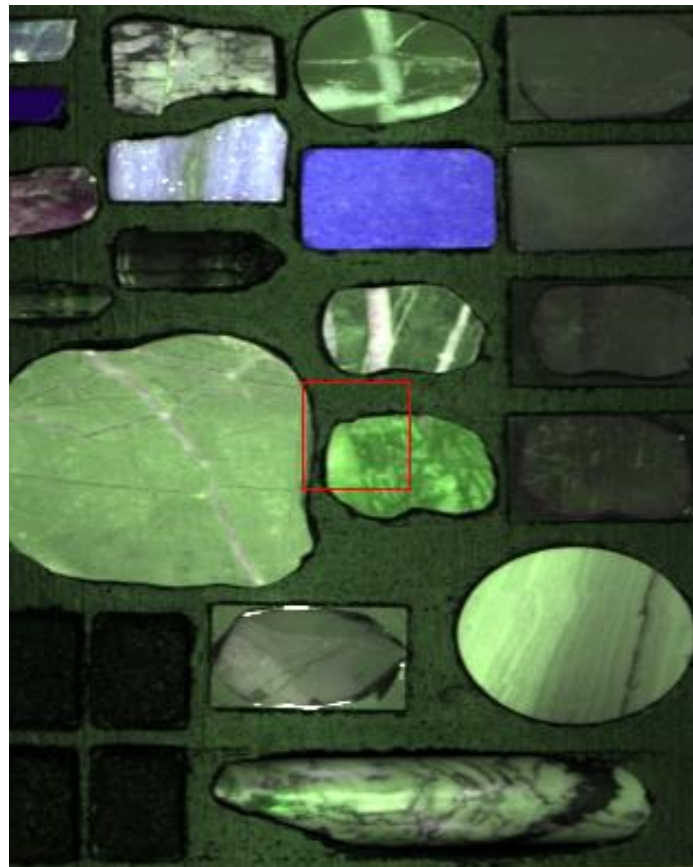


Figura 30.- Imagen de las muestras colocadas en plataforma, distancia focal de 100 cm por encima de estas.

Se utilizó el mineral yeso para comprobar que la adquisición y procesado fue realizado de manera correcta.

- Comparación del mineral yeso con las firmas existentes de la USGS (Figura 31), también se utilizó la herramienta Análisis Espectral (Tabla 6).

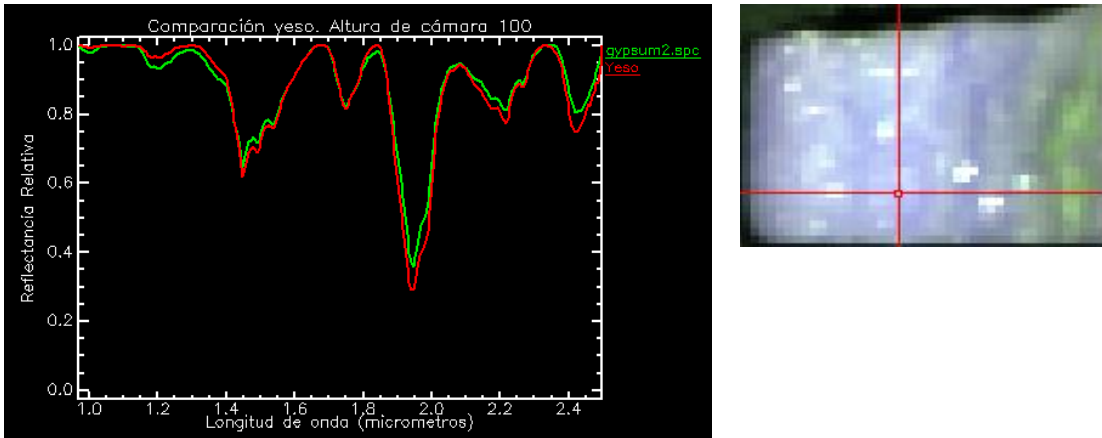


Figura 31.- Comparación de los espectros, el obtenido por la cámara (rojo) y el proporcionado por la UGSG (verde).

Tabla 6.- Tabla de la herramienta Análisis Espectral, la cual, nos permite tener una idea del porcentaje de precisión al comparar el espectro obtenido con las bases existentes.

Análisis Espectral			
Pixel x:65 y:85			
Librería espectral	Correlación	SAM	SFF
Gypsum2.spc	0.879	0.891	0.810
Gypsum1.spc	0.723	0.701	0.593

3.- Se colocó la cámara a una distancia de 95 cm por encima de las muestras que se utilizaran para la adquisición (Figura 32).

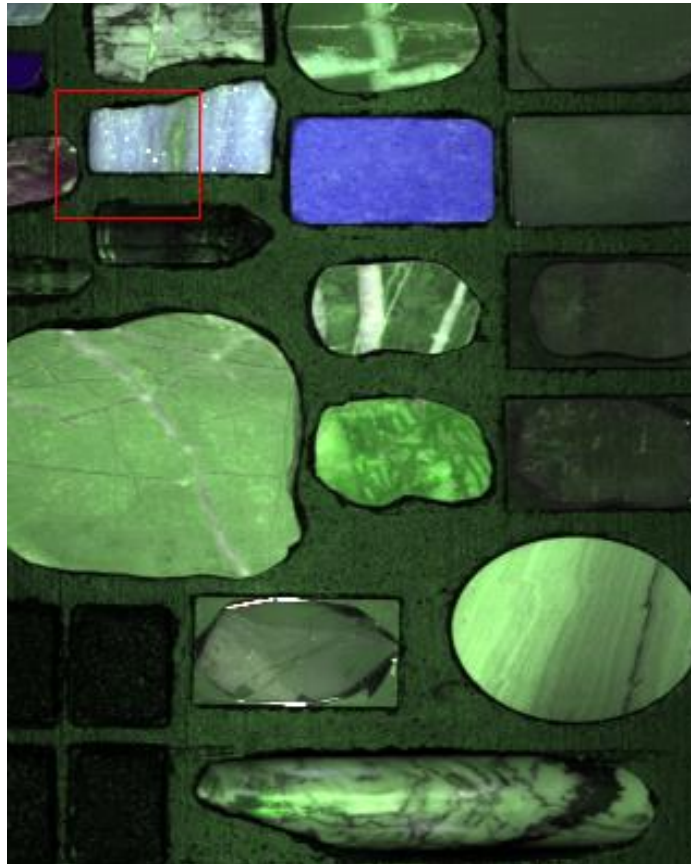


Figura 32.- Imagen de las muestras colocadas en plataforma, distancia focal de 95 cm por encima de estas.

Se utilizó el mineral base (yeso) para corroborar que la adquisición y el procesado fueron hechos de manera correcta.

- Comparación del mineral base (yeso) con las firmas de la USGS (Figura 33), se utilizó la herramienta Análisis Espectral (Tabla 7).

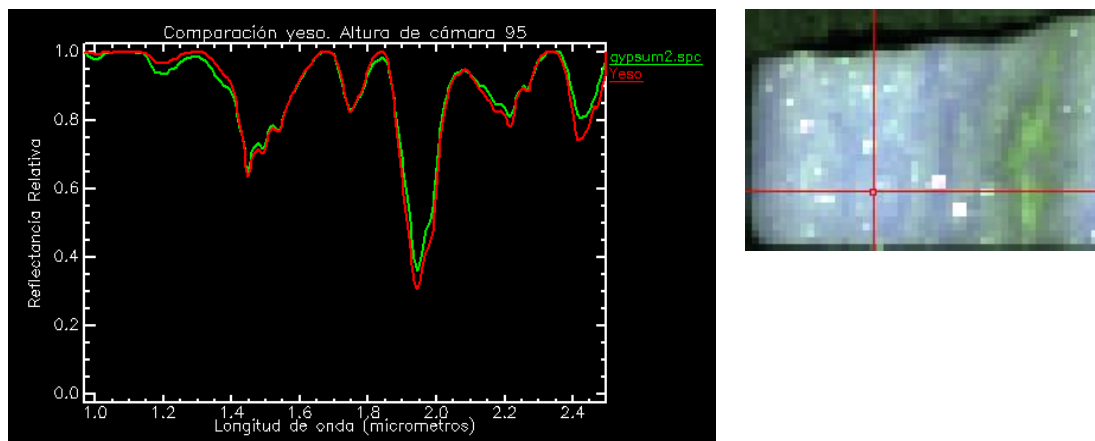


Figura 33.- Comparación del mineral yeso, espectro obtenido (rojo) y el espectro existente (verde).

Tabla 7.- Tabla de la herramienta *Análisis Espectral*, la cual, nos permite tener una idea del porcentaje de precisión al comparar el espectro obtenido con las bases existentes.

<i>Análisis Espectral</i>			
Pixel x:57 y:68			
Librería espectral	Correlación	SAM	SFF
Gypsum2.spc	0.877	0.894	0.798
Gypsum1.spc	0.726	0.703	0.596

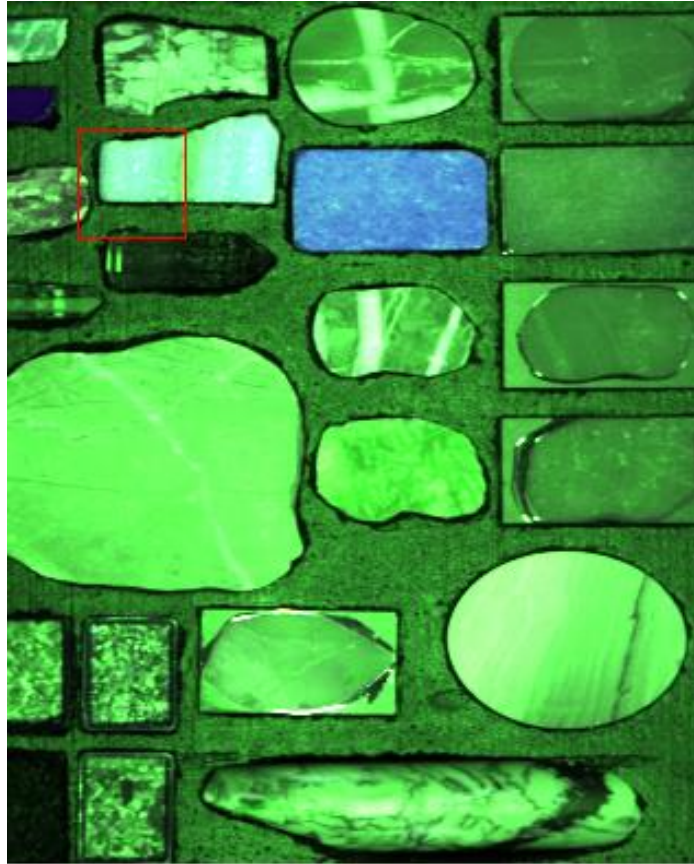
Como conclusión, la distancia focal en la cual se coloque la cámara no afecta a las firmas espectrales para su procesado, pero una distancia focal más baja nos ayuda a ganar en resolución espacial. Esto es importante si las muestras que estamos identificando son muy pequeñas y queremos obtener un mejor detalle al momento de realizar la clasificación de estas.

### 6.1.2 Distancia de las lámparas

Existen variaciones en la iluminación, por tal motivo, se debe de tener cuidado en el momento de tomar las imágenes, las lámparas deben ajustarse (moviendo su haz de luz cuidando que coincidan en un mismo punto), esto evita que, durante la adquisición de las mediciones, estas tengan variaciones en la iluminación, si esto sucede causará una saturación en las muestras y esto provocará un mal procesado de dicha imagen, y por tanto una mala clasificación.

Se realizaron pruebas con la altura en la que se colocan el par de lámparas, esto con el fin de determinar que tanto afecta un cambio de altura en la adquisición:

1.- Se colocó el par de lámparas a una altura de 100 cm por encima de la plataforma donde se colocaron las muestras por medir (Figura 34).



*Figura 34.- Imagen de las muestras, adquiridas con las lámparas ubicadas a 100 cm por encima de la plataforma.*

Se utilizó el mineral que se considera como base (yeso), para hacer la correlación de la imagen, y con ello, comprobar que el procesado es correcto.

- Comparación del mineral base (yeso) con los espectros existentes proporcionado por la USGS (Figura 35), apoyado con la herramienta Análisis Espectral (Tabla 8).

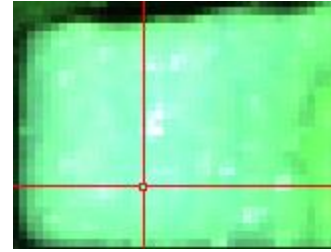
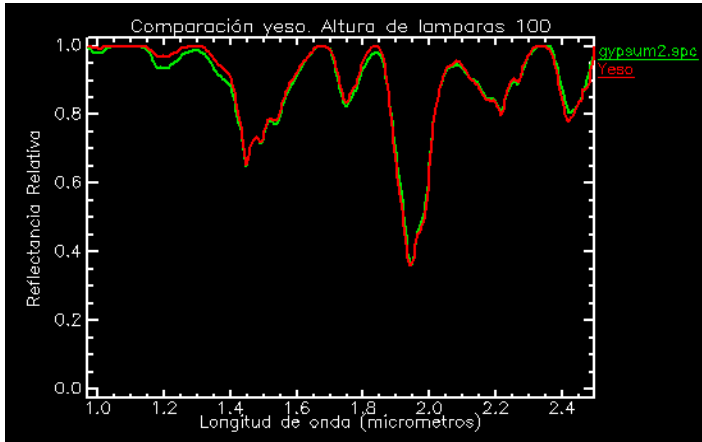
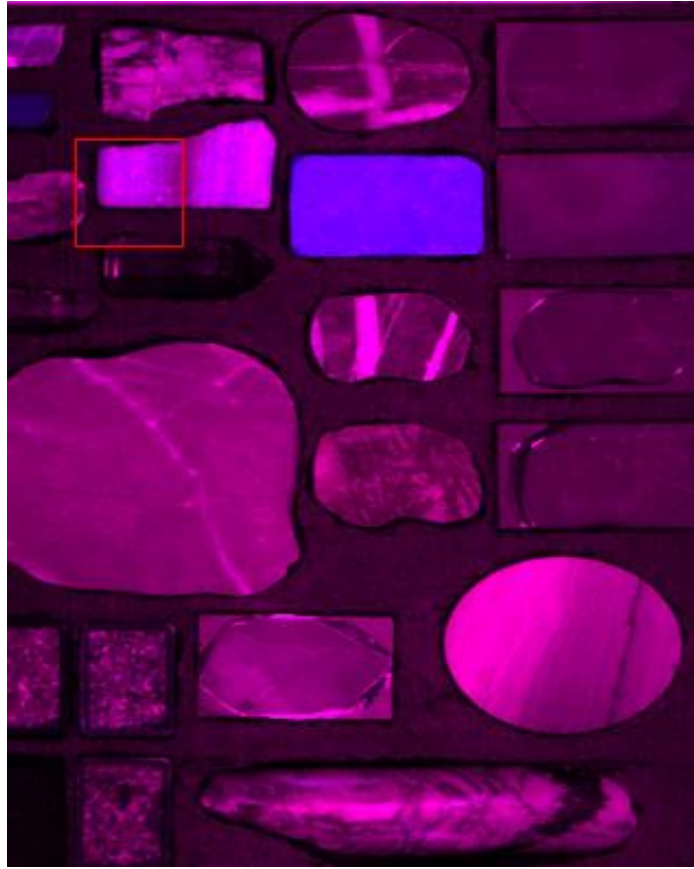


Figura 35.- Correlación de los espectros, espectro obtenido (rojo) y el espectro proporcionado por la librería de la USGS (verde).

Tabla 8.- Tabla de la herramienta Análisis Espectral, la cual, nos permite tener una idea del porcentaje de precisión al comparar el espectro obtenido con las bases existentes.

Análisis Espectral			
Pixel x:58 y:90			
Librería espectral	Correlación	SAM	SFF
Gypsum2.spc	0.885	0.877	0.843
Gypsum1.spc	0.729	0.674	0.635

2.- Se colocó el par de lámparas a una altura de 85 cm por encima de la plataforma con las muestras por adquirir (Figura 36).



*Figura 36.- Imagen de las muestras, adquiridas con las lámparas ubicadas a 85 cm por encima de la plataforma.*

Se utilizó el mineral que se considera como base (yeso), para hacer la correlación de la imagen, y con ello, comprobar que el procesado es correcto.

- Comparación del mineral base (yeso) con los espectros existentes proporcionado por la USGS (Figura 37 ) apoyado con la herramienta Análisis Espectral (Tabla 9)

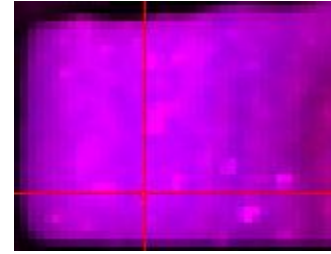
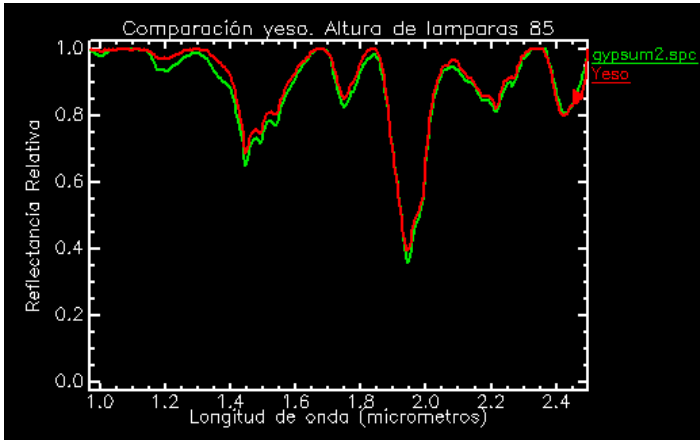
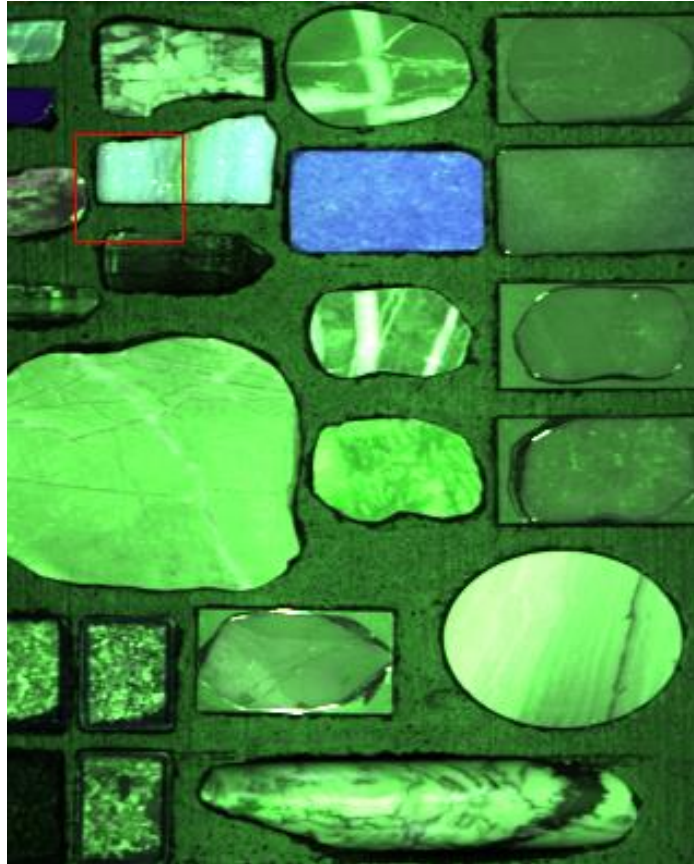


Figura 37.- Correlación de los espectros, espectro obtenido (rojo) y el espectro proporcionado por la librería de la USGS (verde).

Tabla 9.- Tabla de la herramienta Análisis Espectral, la cual, nos permite tener una idea del porcentaje de precisión al comparar el espectro obtenido con las bases existentes.

<i>Análisis Espectral</i>			
Pixel x:58 y:90			
Librería espectral	Correlación	SAM	SFF
Gypsum2.spc	0.867	0.858	0.825
Gypsum1.spc	0.713	0.650	0.627

3.- Se colocó el par de lámparas a una altura de 70 cm por encima de la plataforma con las muestras por adquirir (Figura 38).



*Figura 38.- Imagen de las muestras, adquiridas con las lámparas ubicadas a 70 cm por encima de la plataforma.*

Se utilizó el mineral que se considera como base (yeso), para hacer la correlación de la imagen, y con ello, comprobar que el procesado es correcto.

- Comparación del mineral base (yeso) con los espectros existentes proporcionado por la USGS (Figura 39), apoyado con la herramienta Análisis Espectral (
- Tabla 10).

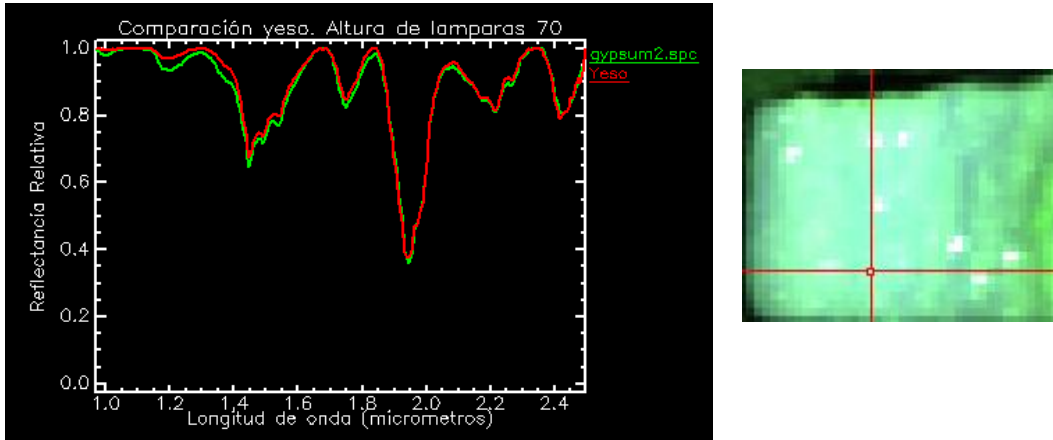
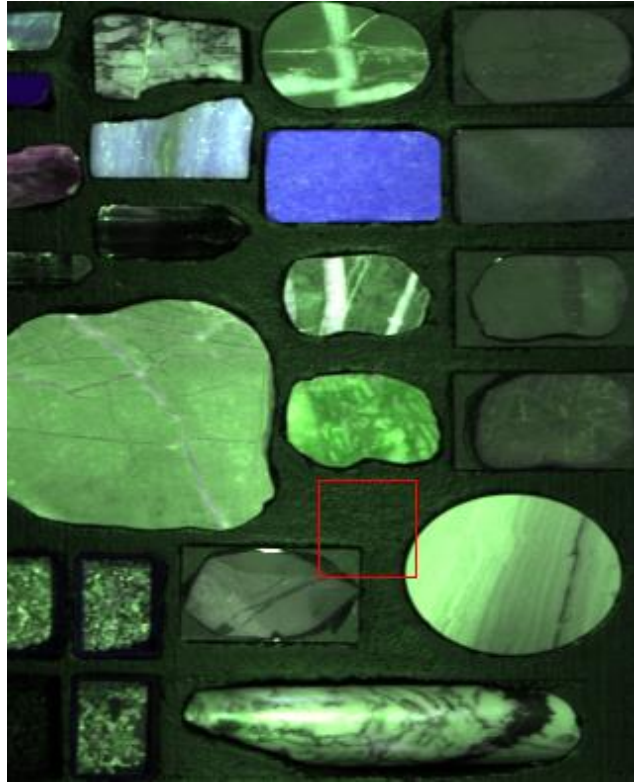


Figura 39.- Correlación de los espectros, espectro obtenido (rojo) y el espectro proporcionado por la librería de la USGS (verde).

Tabla 10.- Tabla de la herramienta Análisis Espectral, la cual, nos permite tener una idea del porcentaje de precisión al comparar el espectro obtenido con las bases existentes.

Análisis Espectral			
Pixel x:58 y:90			
Librería espectral	Correlación	SAM	SFF
Gypsum2.spc	0.874	0.867	0.834
Gypsum1.spc	0.715	0.660	0.619

4.- Se colocó el par de lámparas a una altura de 40 cm por encima de la plataforma con las muestras por adquirir (Figura 40).



*Figura 40.- Imagen de las muestras, adquiridas con las lámparas ubicadas a 40 cm por encima de la plataforma.*

Se utilizó el mineral que se considera como base (yeso), para hacer la correlación de la imagen, y con ello, comprobar que el procesado es correcto.

- Comparación del mineral base (yeso) con los espectros existentes proporcionado por la USGS (Figura 41), apoyado con la herramienta Análisis Espectral (Tabla 11).

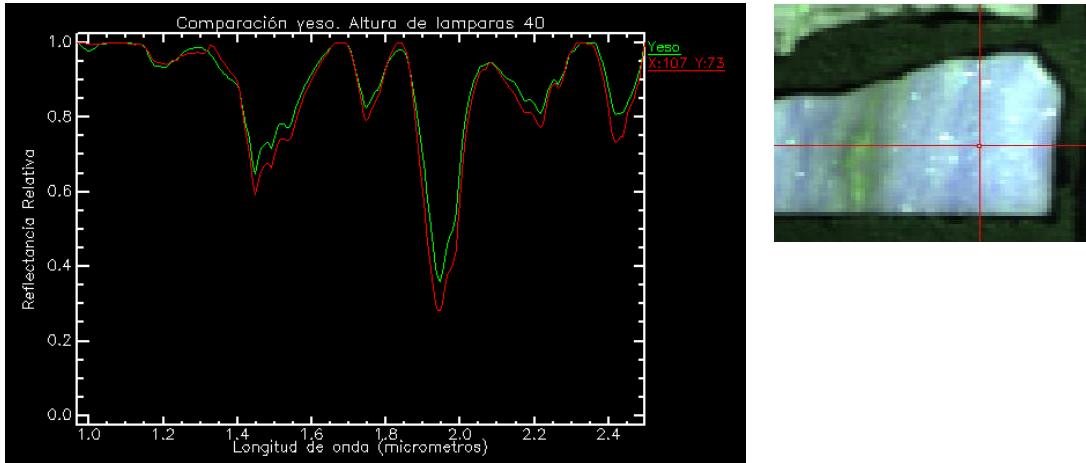


Figura 41.- Correlación de los espectros, espectro obtenido (rojo) y el espectro proporcionado por la librería de la USGS (verde).

Tabla 11.- Tabla de la herramienta Análisis Espectral, la cual, nos permite tener una idea del porcentaje de precisión al comparar el espectro obtenido con las bases existentes.

Análisis Espectral			
Pixel x:107 y:73			
Librería espectral	Correlación	SAM	SFF
Gypsum2.spc	0.895	0.893	0.835
Gypsum1.spc	0.753	0.720	0.641

Como conclusión, las lámparas son un aspecto muy importante en la adquisición, y colocarlas en la altura adecuada es fundamental para obtener imágenes de excelente calidad, la variación en la altura de las lámparas nos proporciona mayor o menor tiempo de integración antes de que las muestras seleccionadas empiecen a sufrir saturación. Por lo cual, a mayor tiempo de integración los espectros de las muestras se suavizan y se apegan con mayor precisión al momento de realizar la comparación con los espectros de las librerías existentes de la USGS (Figura 35), y por lo tanto, a menor tiempo de integración el espectro obtenido genera un pico de absorción con desfase (Figura 41) y esto es efecto del poco tiempo de integración en la imagen.

Como conclusión final después de realizar las distintas pruebas de alturas de cámara y lámparas, con respecto a la distancia óptima de la cámara, esta depende de la cantidad de muestras que se desee estudiar, porque como se pudo observar las diferentes alturas no afectan en lo absoluto a las firmas espectrales de las muestras, por tanto, en lo que se debe poner atención es que mientras más cerca este la cámara de la plataforma el enfoque a las muestras cambia es más pequeño su rango y la imagen saldrá distorsionada, pero

esta distorsión no afecta a las firmas espectrales. Así que la distancia optima seria entre 80 a 105 cm, esta medida va desde la plataforma hasta el lente, con ello las imágenes salen bien definidas y los espectros correctos.

La altura optima de las lámparas, va de acuerdo al tiempo de integración, mientras mayor sea este, los espectros salen más suavizados y con una correlación mucho mejor, así que mientras más alto se coloquen las lámparas su tiempo de integración también aumenta, y por ende mientras más bajo se coloquen el tiempo disminuye y con ello la calidad de los espectros. Un aspecto importante que se debe tomar en cuenta que, si se contara con un panel de referencia ideal no tendríamos este inconveniente de los tiempos de integración. La altura óptima de las lámparas seria entre los 100 a 80 cm, con ello ganamos en calidad de los espectros (mejor correlación).

Debemos tener en cuenta también que la altura de las lámparas debe estar siempre en relación con la cámara. Y tener ambas partes en las alturas ya mencionadas, y que las mediciones de las muestras sean bien adquiridas para tener un procesado preciso.

## 6.2 Procesamiento de datos

### 6.2.1 Corrección Radiométrica

Esta corrección elimina los efectos producidos por el sensor en los datos hiperespectrales y les da un sentido físico a los datos (Martínez et al., 1998). Los efectos que pueden contener los datos al ser adquiridos son: ruido por parte del equipo de adquisición, respuesta del sensor y efectos geométricos provocados por la disposición del sensor-fuente.

El ruido introducido por el sensor es causado por dos cosas: la energía que es transportada mediante los circuitos eléctricos y la temperatura del sensor.

Cuando hablamos de respuesta del sensor nos referimos a lo siguiente: el sensor registra la radiación electromagnética después de que ha recorrido el sistema óptico del equipo, esta radiación debe digitalizarse para su almacenamiento y ser manejado en una computadora. Por lo tanto, podemos decir que la respuesta del sensor es aquella función que se aplica para digitalizar la radiación electromagnética, es decir, la transformación de unidades físicas a digitales. La respuesta generada por el sensor está integrada por: la sensibilidad del sensor, la resolución n espectral y el centro de la banda espectral.

La sensibilidad se refiere al número de fotones, esta propiedad varía de sensor a sensor. La resolución espectral es el ancho de banda espectral dado por la anchura a media altura de una curva (Martínez et al., 1998).

Los efectos geométricos son aquellas distorsiones de la imagen debido a la ubicación del sistema óptico del equipo de adquisición respecto del material observado (Chuvieco, 1995).

En la (Figura 42) se muestra los diferentes procesos de la calibración radiométrica.

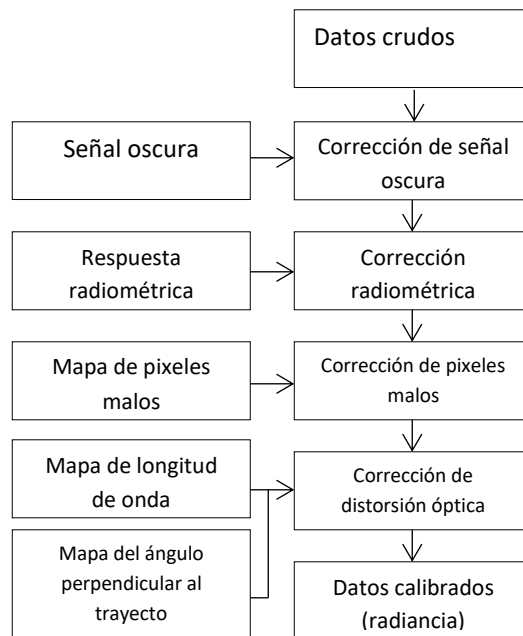


Figura 42.-Procesos para la realización de la calibración radiométrica. (Lenhard et al., 2015).

Llamamos señal oscura a aquella imagen que representa el ruido introducido por los circuitos y la temperatura del equipo de adquisición. La señal oscura se puede obtener de la siguiente manera: se define una cantidad de tomas que hará el obturador, el espectro promedio de las tomas hechas para cada pixel es lo que se conoce como señal oscura. Y el ruido introducido por el sistema de adquisición se elimina al restar la señal oscura a cada una de las tomas.

El proveedor del instrumento nos proporciona el reporte de la calibración hecha, y con ello se puede saber la respuesta radiométrica que se genera para cada sensor. Si existen pixeles malos durante la calibración el proveedor debe reportarlo, para así realizar una corrección de dichos pixeles, mediante una interpolación de pixeles que se encuentra alrededor del pixel malo.

Si después de realizar estas correcciones la imagen aún se visualiza distorsionada, la imagen puede ser corregida por los métodos de ortorectificación. En los equipos de adquisición de empuje (*pushbroom*) es muy frecuente encontrar distorsiones ópticas como: *spectral smile* y *keystone*. El efecto *spectral smile* es el cambio del centro de banda de un canal a lo largo del campo de visión, *keystone* es la variación del ángulo de visión de un sensor, según el canal (Lenhard et al., 2015).

### 6.2.2 Método del campo plano (*Flat Field*)

Un material espectral y morfológicamente plano y con alta reflectancia debe estar presente en la imagen para poder corregir los datos. Puede ser utilizado un panel de referencia o un cuarzo para realizar esta corrección.

Se calcula el espectro promedio que abarca la zona que contiene el campo plano dentro de la imagen, después cada pixel es dividido por este espectro promedio calculado. Esta corrección elimina los efectos de la iluminación, la transmisión atmosférica y efectos del sensor que no fueron removidos por la calibración radiométrica (Hyper teach, 2005).

Este procedimiento se utiliza para normalizar las imágenes para una aérea de reflectancia conocida como "plana". Esto es muy eficaz para reducir los datos hiperespectrales a reflectancia relativa. Lo primero que se debe realizar es seleccionar una región de interés (ROI). El espectro promedio de la región de interés se utiliza como el espectro de referencia, que se divide en el espectro en cada pixel de la imagen.

$$C = \frac{(R - D) * m}{(F - D)} = (R - D) * G$$

- C = imagen corregida
- R = imagen sin corregir
- F = imagen del campo plano
- D = campo oscuro
- m = valor promedio de (F-D)
- G = Ganancia =  $\frac{m}{(F - D)}$

### 6.2.3 Método de la línea empírica

Este método define la interacción de la radiación electromagnética con el objeto o material visualizado por una imagen hiperespectral (Kurz et al., 2012) es la siguiente:

$$L_p(\lambda) = \frac{\tau_a(\lambda)\rho_{DHR}(\lambda)}{\pi} [E_s(\theta_s, \phi_s, \lambda) + E_d(\lambda)] + L_a(\lambda)$$

Donde  $L_p$  es la radiancia medida en el sensor de la cámara,  $\tau_a$  es la transitividad,  $\rho_{DHR}$  es la reflectancia hemisférica direccional,  $E_s$  es la irradiancia solar directa que es reflejada por el objeto de interés,  $E_d$  es la Irradiancia solar indirecta reflejada por el objeto de interés, y por último  $L_a$  es la radiancia que ha sido dispersada por la atmósfera y no ha interaccionado con el objeto de interés.

En el método de la línea empírica la ecuación anterior se reduce:

$$L_p(\lambda) = a(\lambda)\rho(\lambda) + b(\lambda).$$

Donde:

$$a(\lambda) = \frac{\tau_a(\lambda)}{\pi} [E_s(\theta_s, \phi_s, \lambda) + E_d(\lambda)]$$

$$b(\lambda) = L_a(\lambda).$$

En el método de la línea empírica, se debe conocer la radiancia espectral y la reflectancia espectral de al menos dos objetos dentro de la escena. De esa forma se produce un sistema lineal de dos ecuaciones y dos variables, cuya solución aporta los términos  $a(\lambda)$  que es conocida como la irradiancia solar (*Solar Irradiance*) y  $b(\lambda)$  la dispersión atmosférica (*Path Radiance*). Estas dos variables son calculados por ENVI *Classic* durante el procesamiento.

## 6.3 Selección de materiales para la corrección de datos

### 6.3.1 Cuarzo

Para la adquisición de las imágenes hiperespectrales deberíamos de tener un material de referencia, se utilizaron cuarzos, en total tres tipos diferentes de cuarzos para realizar las pruebas y determinar cuál sería el mejor como referencia al momento de adquirir las imágenes, estos cuarzos son: cristal de roca, cuarzo lechoso y cuarzo de un color café, siendo los dos últimos cuarzos del tipo criptocristalinos. Se hizo una prueba donde se incluían los tres cuarzos y además una lámina delgada. (Figura 43, a)).

La imagen fue corregida por el método de campo plano, para ello se toma una región de cada cuarzo, llamada región de interés (ROI), posteriormente se recolectan las diferentes firmas espectrales de cada uno de los diferentes cuarzos y de la lámina delgada (Figura 43, b). Las diferentes firmas y las comparaciones (Figura 44) nos ayudan a identificar el cuarzo que será elegido como referencia para las siguientes muestras.

a)



b)

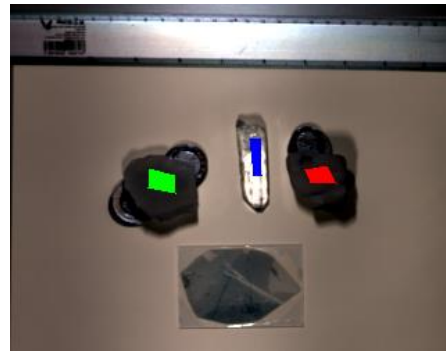
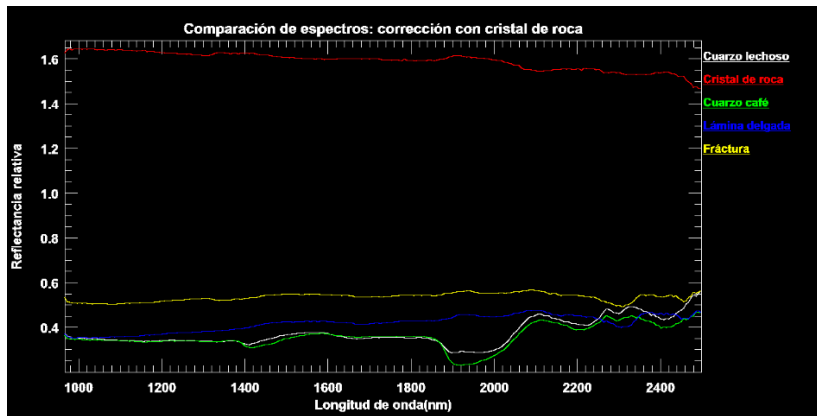
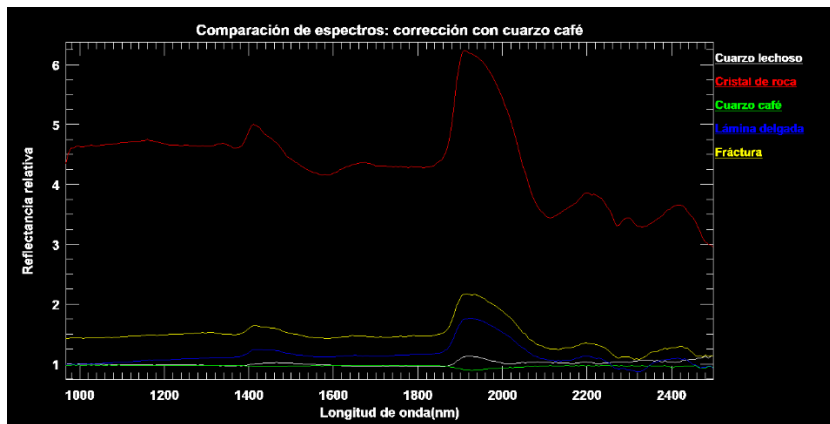


Figura 43.- a) Disposición de los tres cuarzos y la lámina delgada. b) Regiones de interés para cada uno de los cuarzos, cristal de roca (azul), cuarzo lechoso (verde) y el cuarzo café (rojo).

a)



b)



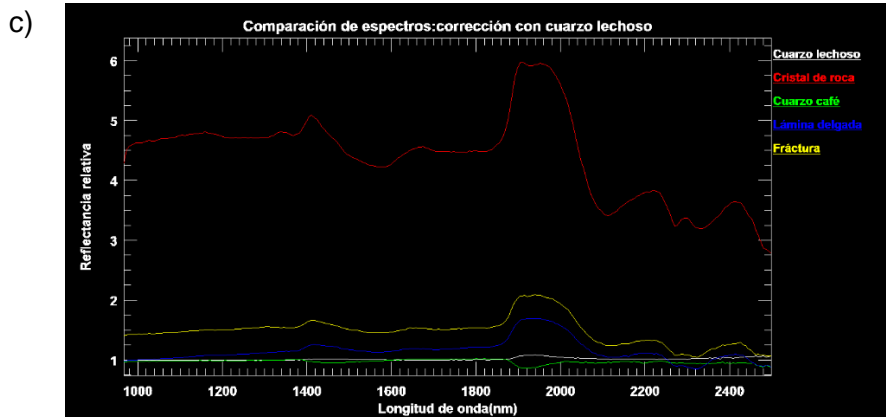


Figura 44. Comparación de firmas espectrales de los diferentes cuarzos y la lámina delgada. Se corrigieron cada imagen con los tres cuarzos a) con el cristal de roca, b) con el cuarzo café y finalmente, c) con el cuarzo lechoso. Como se puede observar en la corrección con el cuarzo (cristal de roca) el espectro obtenido es casi plano y de alta reflectancia. En tanto b) y c) correspondientes al cuarzo lechoso y café inducen a picos de alta reflectancia en los diferentes espectros.

Podemos concluir después de realizar las comparaciones pertinentes, que el cristal de roca es el más adecuado para realizar la corrección atmosférica por campo plano, debido a que no induce picos de reflectancia o absorción en los espectros. Aunque el cristal de roca es el material elegido como referencia, no es el ideal, debido a su transparencia, esto genera una mezcla del material que se encuentra debajo del cuarzo, generando firmas espectrales más difusas y las firmas posteriores tienen una diferencia con respecto a las anteriores, siendo utilizado el mismo cuarzo con los mismos parámetros. Este inconveniente se intentó minimizar con la colocación de un material oscuro como base para el cuarzo, donde este material absorbe gran parte de la radiación electromagnética que pasaba la superficie del cuarzo. Con esto finalmente se lograron mejores firmas de las diferentes muestras utilizadas.

### 6.3.2 Teflón (PTFE)

El teflón (politetrafluoroetileno, PTFE) fue también utilizado como panel de referencia, la ventaja que tiene el teflón con respecto al cuarzo es la mayor reflectancia que posee, esto ayuda a disminuir el efecto de la no homogeneidad de la iluminación de las lámparas, es decir, si en algún momento del procesado la iluminación no es constante en toda la muestra, el teflón ayuda a corregir ese inconveniente.

Se utilizaron tres tipos de teflón: una lámina que fue cubierta con cinta de teflón, una barra de teflón y por último una lámina de teflón. La prueba consistió en detectar con cuál de los tres tipos de teflón la corrección de las imágenes tenía mejor calidad, y por lo tanto durante el procesado obtener los resultados esperados.

En la (Figura 45) se muestran las regiones de interés utilizadas para la corrección por el método de campo plano. Y en la (Figura 46) se realizó las correcciones con cada uno de los teflones y obteniendo con cada uno la firma espectral del yeso.



Figura 45. Área de interés (ROIs) de cada tipo de teflón. Lámina de metal recubierta de teflón (color azul), barra de teflón (color verde) y lamina de teflón (color rojo). En la parte central del teflón se saturaron los pixeles.

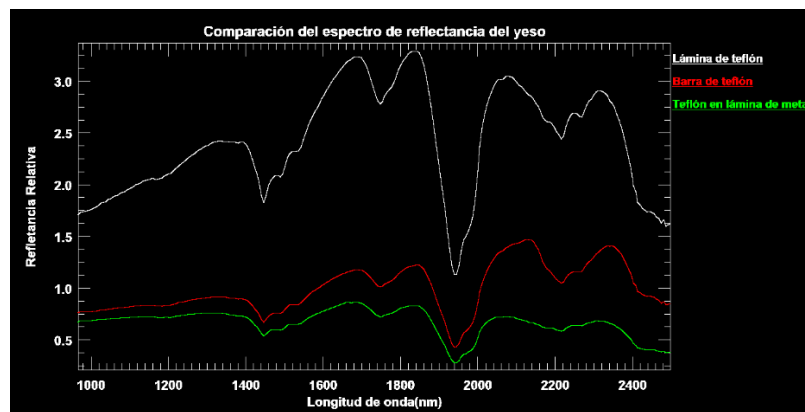


Figura 46. Espectro del yeso utilizando los tres tipos de teflón. Espectro en color blanco (lámina), espectro en color rojo (barra) y espectro color verde (lámina de metal cubierta con cinta).

### 6.3.2.1 Lamina de teflón

La lámina de teflón produce correcciones de mayor reflectividad relativa debido que tiene una mayor absorción que los demás materiales, como se observa en la (Figura 46) en color blanco. Lo que provoca este aumento en la reflectividad es que es muy delgada, y no es opaca a luz que incide sobre ella, por lo que el material que está debajo de ella absorbe toda la luz.

### 6.3.2.2 Barra de teflón

La barra al no ser plana, su geometría refleja la luz de tal manera que los sensores de la cámara saturan su parte central, lo que evita el uso de esta, porque genera una corrección no deseable.

### 6.3.2.3 Lámina metálica envuelta en cinta de teflón

Como podemos observar en la (Figura 46) espectro de color verde, de los tres tipos de teflón utilizados esta genera la menor reflectividad y gracias a esto, al realizar la corrección esta lámina es la que nos proporciona la mayor certeza sobre el material identificado durante el procesado alrededor del (0.834), mientras que la lámina un (0.624) y la barra (0.520), estos resultados fueron obtenidos al usar la herramienta que posee ENVI que se denomina Análisis Espectral. Lo que nos indica que la lámina recubierta con cinta de teflón es la que debe ser utilizada como panel de referencia para las correcciones posteriores.

En resumen, al no contar con un patrón de reflectancia de referencia, como puede ser el Spectralon srt-50-120, se realizaron distintas pruebas para buscar un patrón que nos permitiera corregir de forma correcta las imágenes obtenidas, se realizaron experimentos con el teflón y el cuarzo, después de realizar los experimentos se llegó a la conclusión de que el mejor patrón de corrección que se tenía es la cinta de teflón, para realizar la corrección por campo plano a las imágenes.

## 6.4 Medición de datos

Se realizaron pruebas a minerales puros, con el fin de tener un control sobre estos, extraer sus espectros característicos y con ello comprobar que los pasos anteriores a su extracción, que son adquisición y corrección se realizaran de manera adecuada y por lo tanto el espectro obtenido y el espectro base proporcionado por la USGS fueran muy similares, mediante los cuales, realizar una clasificación de dicha muestra con las firmas extraídas.

A continuación, mencionamos las minerales que se adquirieron, su firma y la comparación:

## 6.4.1 Medición de minerales puros

### 6.4.1.1 Calcitas

Una de las muestras utilizadas para su identificación y visualización mediante la cámara hiperespectral es la calcita. A continuación, se muestra el espectro obtenido (Figura 47) y los procesos para su identificación.

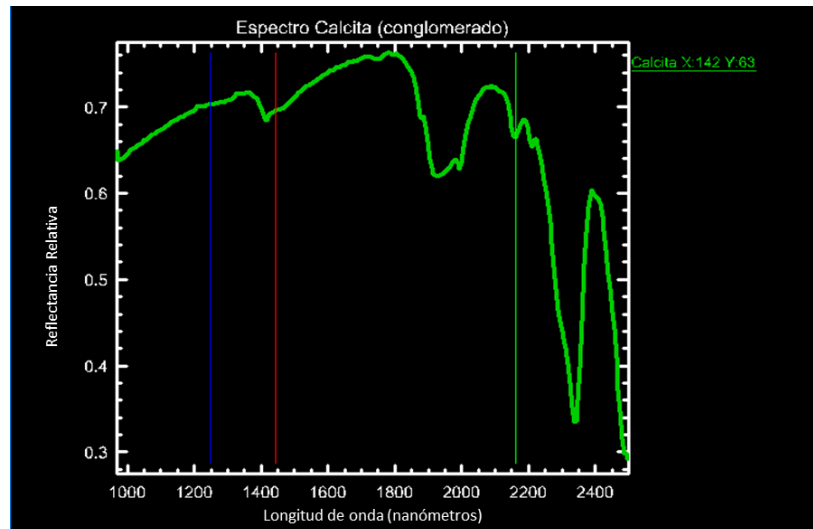


Figura 47. Espectro calcita. Este es el espectro obtenido de la muestra de calcita, mediante la cámara y su posterior procesado.

Después de la obtención de la firma espectral, se utilizó la herramienta Análisis Espectral (Tabla 12) para realizar la comparación e identificar con la base de datos del material que se trata.

Tabla 12.- Análisis Espectral. Herramienta incluida en el software ENVI para la identificación de las diferentes muestras.

Análisis Espectral			
Pixel: x:142, y:63			
Librería Espectral	Correlación	SAM	SFF
Calcite3	0.748	0.911	0.739
Rhodoch1	0.725	0.935	0.562

Y finalmente tenemos la comparación de los espectros (Figura 48), el espectro obtenido y el espectro base.

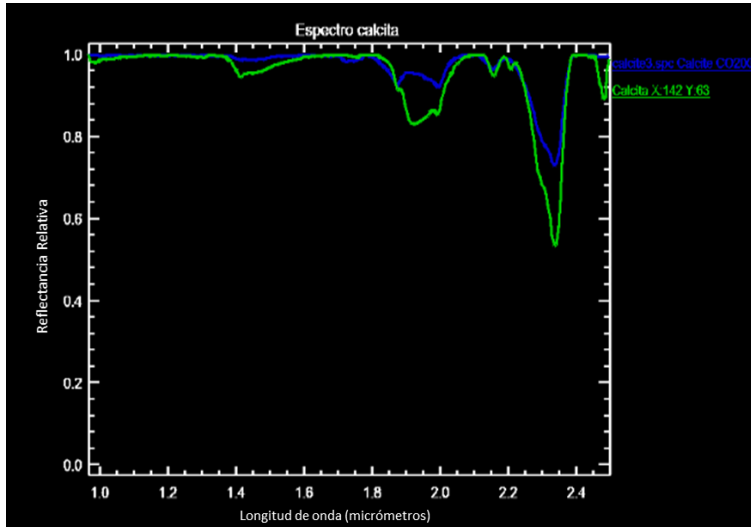


Figura 48. Comparación de espectros. Calcita obtenida (verde) y calcita proporcionada por la base de datos (azul).

#### 6.4.1.2 Yeso

Siguiendo con las pruebas en diferentes minerales, se realizó la adquisición del yeso con la cámara obteniendo su espectro (Figura 49) y posteriormente el procesamiento de esta.

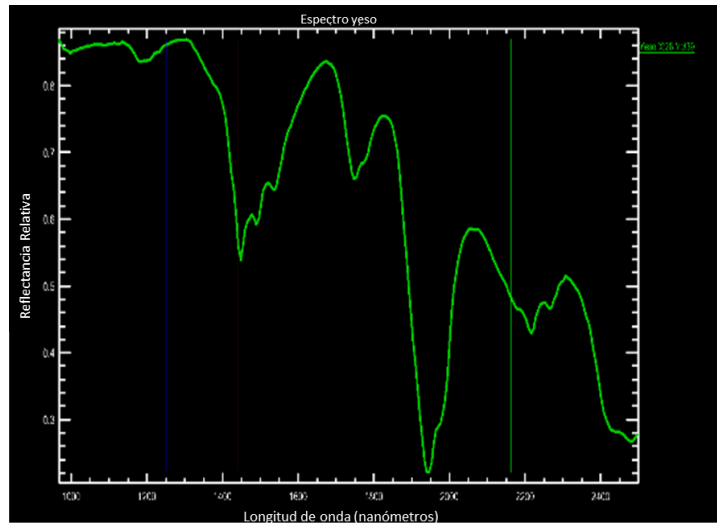


Figura 49. Espectro obtenido para el mineral yeso, para su posterior procesamiento.

Utilizando la misma herramienta Análisis Espectral (Tabla 13) para la identificación del mineral. Cabe resaltar que con el yeso se obtuvieron excelentes espectros y esto nos sirvió como base de seguridad que las imágenes y las distintas correcciones se realizaron de manera correcta.

Tabla 13.- Análisis Espectral. Herramienta utilizada para la identificación de los minerales.

Análisis Espectral			
Pixel: x:26, y:339			
Librería Espectral	Correlación	SAM	SFF
Gypsum2	0.825	0.958	0.809
Gypsum1	0.706	0.791	0.637

Y como parte final del procesado e identificación se compararon los espectros obtenidos y encontrados (Figura 50) para su análisis.

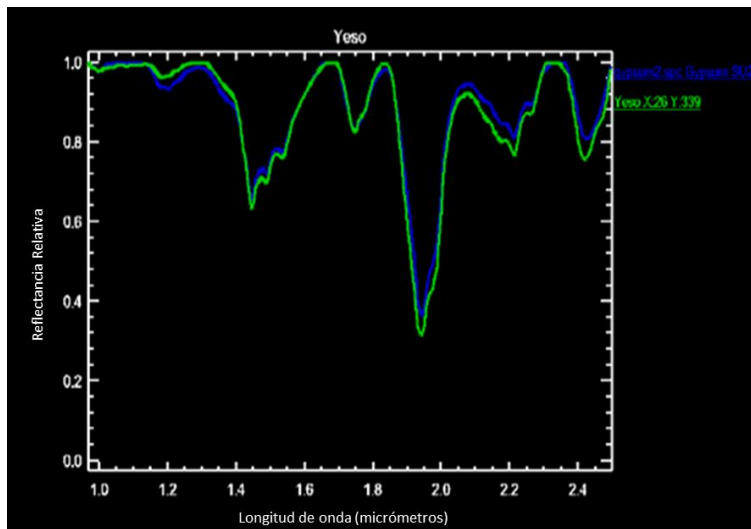


Figura 50. Comparación de los espectros. Espectro encontrado mediante la cámara (verde) y el espectro proporcionado por la base de datos (azul)

### 6.4.1.3 Dolomita

Se consiguió una muestra de dolomita para realizar las distintas pruebas con la cámara hiperespectral, y se obtuvo su espectro característico (Figura 51).

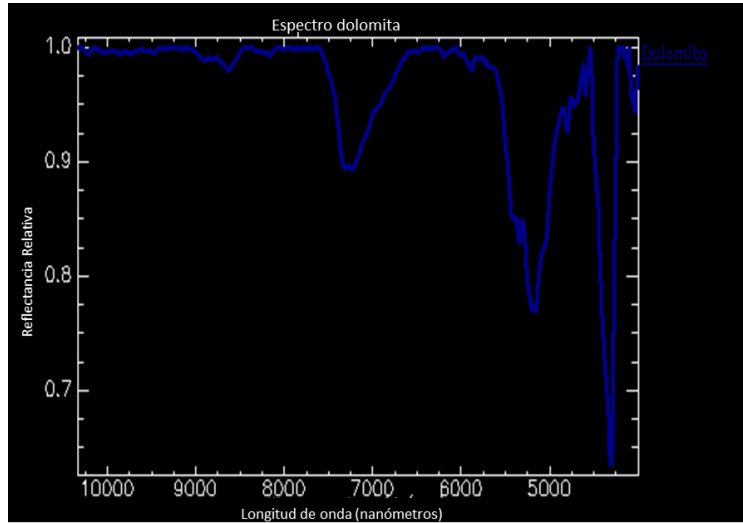


Figura 51. Espectro obtenido para el mineral de dolomita, que se empleara para la comparación siguiente.

Se empleó la herramienta Análisis Espectral (Tabla 14) para la identificación del mineral de manera correcta.

Tabla 14.- Análisis Espectral. Herramienta que nos permite identificar los minerales de manera práctica y es bastante seguro.

Análisis Espectral			
Pixel: x:250, y:149			
Librería Espectral	Correlación	SAM	SFF
Dolomite 2	0.809	0.952	0.875
Nephite	0.767	0.878	0.757

Y como última etapa del procesado e identificación del mineral, se realizó la comparación de espectros (Figura 52) para su visualización.

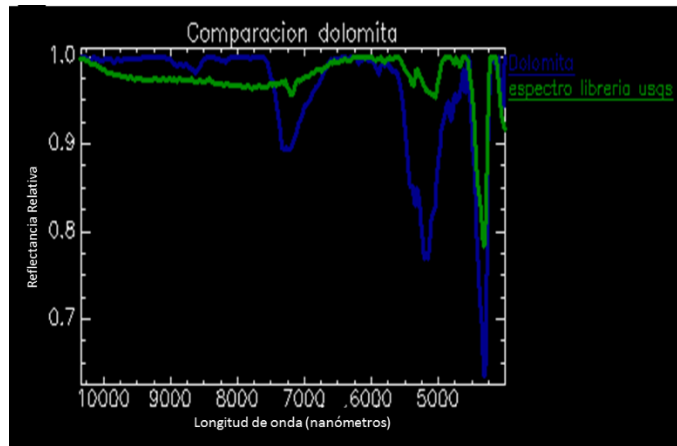


Figura 52. Comparación de los espectros. Espectro encontrado con la cámara hiperespectral (azul) y el proporcionado por la base de datos integrada (verde).

## 6.4.2 Medición de materiales artificiales

Se realizaron también varias pruebas y mediciones a materiales artificiales, mostramos dos de estas pruebas, al algodón y una porción de papel. Esto nos ayudara a realizar posteriores análisis con estos espectros.

### 6.4.2.1 Algodón

Se realizó la prueba con el algodón para obtener su espectro característico (Figura 53) y así poder utilizarlo para un análisis posterior.

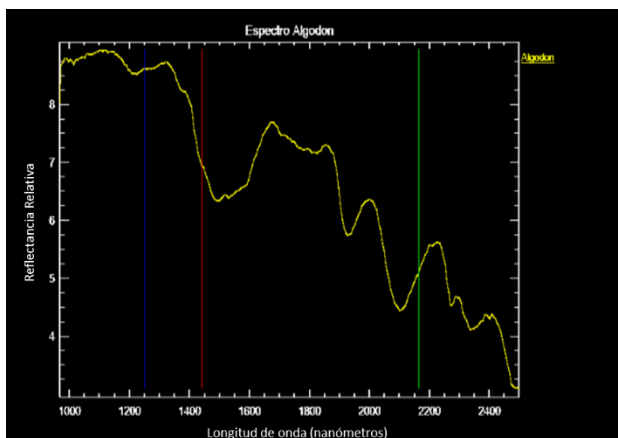


Figura 53. Espectro obtenido para el algodón limpio utilizado como base en las diferentes pruebas.

### 6.4.2.2 Papel

Se continuó con pruebas, se obtuvo el espectro característico del papel (Figura 54), y con él se analizaron otros espectros.

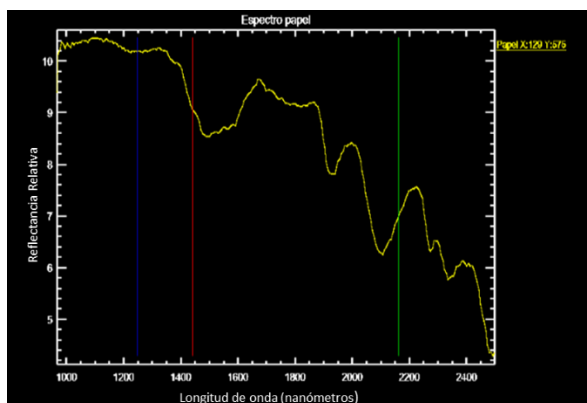


Figura 54. Espectro que se obtuvo con la cámara hiperespectral de una porción de papel, que fue empleado como base en otro análisis.

## 7. Clasificación de imágenes de las muestras de estudio

### 7.1 Introducción a los métodos de clasificación

Antes de empezar con los métodos de clasificación, debemos definir que es una imagen hiperespectral; una imagen hiperespectral es aquella imagen que posee cientos de bandas espectrales de información a través de todo el espectro electromagnético. Es una especie de cubo de datos, donde el cubo consiste en píxeles de datos, cada píxel está asociado con una ubicación en particular en un área o está asociado a un tipo de mineral específico.

Como lo menciona (Rojas, 2009) clasificar involucra categorizar los píxeles de una imagen digital en clases o temas. Cuando se tienen imágenes hiperespectrales o multispectrales, se toma un patrón espectral para realizar una clasificación. Este patrón es un conjunto de medidas obtenidas en varias bandas de longitud de onda para cada uno de los píxeles.

En la clasificación de las imágenes hiperespectrales, la extracción de sus características es una cuestión muy importante (Sanz, 2002), existen muchos métodos utilizados para realizar una clasificación, cada método es de aplicación específica y el proceso de extracción de las características varía entre los distintos métodos.

La forma más simple de abordar el problema de clasificación en una imagen hiperespectral (Figura 55), es considerar que los píxeles de interés están compuestos por un solo material, el uso de sensores hiperespectrales permite una mejor determinación de la composición interna para cada píxel, el cual raramente estará compuesto por un único material, sino por el contrario es una composición de varios minerales.

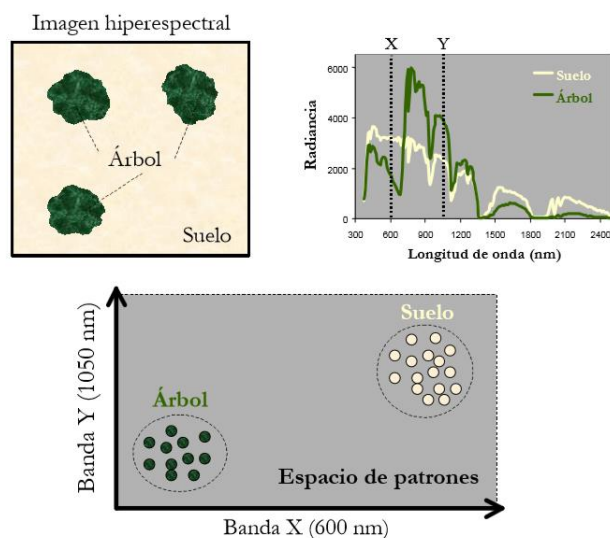


Figura 55. Imagen hiperespectral. Con una imagen del tipo hiperespectral nos permite realizar una mejor identificación de algún objeto o material que se desea, debido que esta ha sido tomada por cientos de bandas, lo cual genera un mejor detalle al momento de identificarla. (Rojas, 2009)

### 7.1.1 Métodos supervisados

Como lo indica (Sanz, 2002) los métodos del tipo supervisados parten de un cierto conocimiento sobre las clases existentes, a partir de dichas clases pueden derivarse los criterios para realizar la clasificación. Este está antecedido por pasos previos donde fueron identificados firmas espectrales características de las distintas clases.

Existen diferentes técnicas o métodos de clasificación supervisadas, dentro de ellas están los filtros de Similaridad (*Matched Filters*) y el método SAM (*Spectral Angle Mapper*), los cuales están basados en estadística de primer orden. Dentro de esta categoría podemos encontrar también a los siguientes clasificadores: *Nearest neighbour* (vecino más cercano), *Minimum Distance* (distancia mínima), *Parallelepiped o Maximum Likelihood* (ML, máxima probabilidad) y por último la técnica de *Support Vector Machine* (SVM).

El método que utilicé para la clasificación de las distintas muestras fue SAM debido a la facilidad que otorga para la realización de la clasificación y también porque es el método que arrojó los resultados más cercanos a lo que se pretendía.

#### 7.1.1.1 Filtro de similaridad (MF)

Sea  $R_0$  el objeto a detectar y  $R_f = \{u_i; i = 1, \dots, K\}$  el fondo, constituido por los pixeles que no pertenecen al objeto. Sean  $\mu_f$  y  $\Gamma_f$  respectivamente, el vector promedio y la matriz de covarianza del fondo, los cuales se definen de la siguiente forma:

$$\mu_f = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \mu_f$$

$$\Gamma_f = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (\mu_i - \mu_f)(\mu_i - \mu_f)^T$$

Dada una firma espectral  $s$ , representativa del objeto a detectar, puede obtenerse un valor de similaridad  $MF(s)$  para dicha firma utilizando la siguiente expresión:

$$MF(s) = \frac{s^T \Gamma_f^{-1} \mu_f}{s^T \Gamma_f^{-1} s}$$

donde  $\Gamma_f^{-1}$  es la inversa de la matriz de covarianza de fondo.

Los filtros de similaridad ha sido utilizado en numerosos problemas de análisis hiperespectral, pues proporcionan un mecanismo eficiente para detectar objetos utilizando un conocimiento previo acerca de los mismos.

### 7.1.1.2 Algoritmo *Support Vector Machine* (SVM)

El algoritmo de vectores de soporte (*Support vector machines*) o SVM, es un método supervisado de reconocimiento de patrones (Rojas, 2009). Combina tres ideas: la técnica de búsqueda de hiperplanos óptimos como solución, la idea de convolución de producto escalar, la extensión de las funciones lineales a no lineales, la noción de margen ligero o *soft margin*, para permitir errores en los patrones de entrenamiento.

SVM permite una mejor generalización, antes que una mejor clasificación del conjunto de entrenamiento (a nivel de errores). Existen otras dos razones más que han hecho crecer el interés por este novedoso clasificador. SVM puede ser reducido a un problema de programación cuadrática convexa (*convex quadratic programming* o QP), más fácil de resolver con respecto a los métodos clásicos y que parecen tener un mejor comportamiento (más robustos) con altas cantidades de datos.

Este clasificador pertenece a la familia de los clasificadores lineales puesto que inducen separadores lineales o hiperplanos en espacios de características de muy alta dimensionalidad.

Su principal objetivo es obtener una superficie (o hiperplano) capaz de separar las diferentes clases en las que se puede agrupar una distribución de datos en un espacio N-dimensional, utiliza para ello un proceso de optimización basado en la obtención de vectores que definen los límites de las clases. Estos vectores se denominan normalmente vectores soporte o *Support Vectors* (Figura 56).

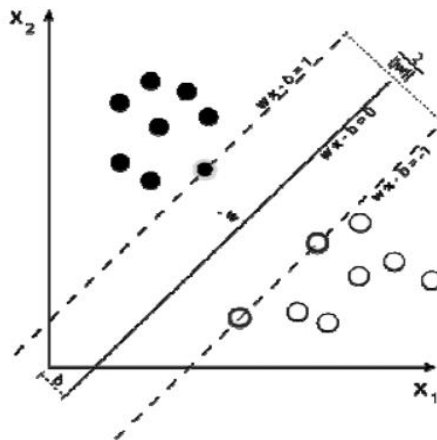


Figura 56. Esquema de funcionamiento del clasificador SVM. Nos muestra de manera muy simple la forma en la que el clasificador realiza la separación de los vectores. (Rojas, 2009)

### 7.1.1.3 Clasificador de divergencia espectral (SID)

El clasificador de divergencia espectral se conoce como SID, por las siglas en inglés de *Spectral Information Divergence*. Este clasificador se utiliza para determinar la semejanza

entre un patrón espectral de referencia y la curva de un píxel de la imagen (Plaza, 2002), sirviéndose de una medida de distancia no lineal semejante a la calculada por un estimador de máxima verosimilitud. A partir de esta medida SID discrimina espectralmente cada píxel en relación con las categorías de interés, asignándolo a la categoría donde su probabilidad discriminadora espectral es más pequeña.

#### 7.1.1.4 *Minimum distance* (distancia mínima)

Consiste en incluir un píxel en la categoría más cercana (aquella que minimiza la distancia entre el píxel y el centroide de esa categoría) (Plaza, 2002). Se trata de una distancia espectral, como consecuencia de comparar los ND de cada píxel con los centros de todas las categorías, para todas las bandas que se utilizan en el análisis.

Existen varias formas de medir esa distancia, la empleada con mayor frecuencia es la distancia euclidiana:

$$d_A = \sqrt{\sum_{k=1}^m (ND_{xk} - \overline{ND}_{AK})^2}$$

Este algoritmo es sencillo y rápido, ofrece buenos resultados cuando no existe traslapo de categorías, no deja píxeles sin clasificar incluso, aunque estos se alejen del centro de la clase. La distancia que calcula este algoritmo es lineal, sin considerar la propia dispersión de cada categoría o la correlación que exista entre las bandas.

#### 7.1.1.5 *Parallelepiped* (Paralelepípedo)

Para realizar este método debemos fijar un área de dominio para cada categoría, teniendo en cuenta sus valores de centralidad y de dispersión (Plaza, 2002). Posteriormente un píxel es asignado a una categoría si sus Niveles Digitales están dentro de esa área de dominio en todas las bandas consideradas, es decir si se encuentra a menos de una determinada distancia del centro de una clase dada; esa distancia es comúnmente identificada con la desviación típica o con un múltiplo suyo.

Esquemáticamente:

$$\overline{ND}_{AK} - R_{AK} < c\overline{ND}_{AK} + R_{AK}$$

Para todo k, variando k, de 1 hasta el número de bandas,  $R_{AK}$  indica el rango de dispersión concedido a cada categoría, y en cada banda.

El diseño de áreas de dominio implica que haya píxeles en zonas comunes a dos o más categorías, y que algunos píxeles queden sin clasificar. Este criterio de asignación tiende a delinear polígonos multidimensionales de lados paralelos.

Es un algoritmo muy rápido de usar puesto que no requiere cálculos aritméticos sino solo operaciones lógicas.

Entre los contras de este método tenemos que existen pixeles en zonas comunes a dos o más categorías, así también algunos pixeles quedan sin clasificar.

#### 7.1.1.6 *Maximum Likelihood* (Máxima Probabilidad)

Considera que los ND de cada clase se ajuntan a una distribución normal, lo que permite describir cada categoría como una función de probabilidad (González y Morales, 2013). Es el clasificador más complejo, sin embargo, es el más usado por ajustarse mejor a la disposición original de los datos.

Se considera que los Niveles Digitales en cada categoría se distribuyen de acuerdo a la distribución normal, por lo que si se conoce la media la desviación típica de cada categoría se puede calcular la probabilidad asociada con un determinado Nivel Digital.

En pocas palabras, esa función asemeja la distribución real de los Niveles Digitales de esa categoría, por lo que sirven para calcular la probabilidad de que un pixel (con un determinado Nivel Digital) sea miembro de una categoría dada.

Para el caso de trabajar con una solo banda, podríamos calcular esa probabilidad de acuerdo:

$$p\left(\frac{x}{A}\right) = \frac{1}{\sqrt{2x\sigma_{A^2}}} \exp\left\{-\frac{(ND_x - \overline{ND}_A)^2}{2x\sigma_{A^2}}\right\}$$

Esto es la probabilidad de que un pixel  $x$ , definido por un determinado  $ND_x$ , pertenezca a la clase A. Puede calcularse a partir de la media ( $\overline{ND}_A$ ) y la varianza  $\sigma_{A^2}$  de esa clase. Una vez determinada la probabilidad de pertenencia al resto de las categorías que intervienen en la clasificación, ese pixel será asignado a la clase A, solo si:

$p\left(\frac{x}{A}\right) \geq p\left(\frac{x}{B}\right)$  para todo  $A \neq B$ , variando B desde 1 hasta n, siendo n el número de categorías.

#### 7.1.1.7 Spectral Angle Mapper (SAM)

Este método consiste en calcular el coseno del ángulo espectral entre una firma espectral característica de un objeto que se desea identificar y las firmas espectrales de todos los pixeles de la imagen (Rojas, 2009). Aquellos pixeles para los que el valor obtenido sea cercano a 0 tendrán una alta probabilidad de estar constituidos por el material buscado.

La principal ventaja del método SAM viene dada por las propiedades de la distancia en la que se basa (Sanz, 2002). La diferencia de ángulo espectral ofrece, como hemos visto anteriormente, muy buenos resultados en caso de que los pixeles de la imagen estén afectados por condiciones de iluminación variable, permitiendo establecer una clasificación que no se ve afectada por estos detalles. Por otra parte, el método SAM presenta algunas limitaciones cuando la magnitud de los valores es importante a la hora de discriminar la información, circunstancia que tiene lugar en determinadas aplicaciones.

Sean  $u$  y  $v$  dos firmas espectrales expresadas en forma de dos vectores  $N$ -dimensionales. El coseno del ángulo espectral entre ambos vectores, denotado  $SAM(u, v)$ , se calcula mediante la siguiente expresión:

$$SAM(u, v) = \cos\left(\frac{\langle u, v \rangle}{\|u\|_2 \|v\|_2}\right)$$

Esta medida aparece frecuentemente denominada en la literatura simplemente como ángulo espectral.

## 7.1.2 Métodos no supervisados

Los métodos no supervisados se basan en que no existe ningún tipo de conocimiento anterior sobre las clases existentes. El objetivo de estas técnicas es identificar, de forma automatizada, clases o agrupaciones de píxeles, utilizando para ello una métrica de similaridad (Martínez et al., 2001).

### 7.1.2.1 El método *K-Means*

Supone la existencia de  $K$  clases (parámetro que debe ser determinado a priori) y realiza una agrupación de los píxeles de la imagen en dichas clases (Rojas, 2009), utilizando los vectores métodos puramente estadísticos basados en los espectros promedio de dichas clases.

### 7.1.2.2 El método ISODATA

También requiere la inicialización de un parámetro  $K$  relativo al número de clases deseadas, de forma previa a la ejecución del algoritmo. Además, este método necesita información relativa al número mínimo de firmas pertenecientes a una clase (López et al., 2014). Si el valor inicial de  $K$  es bajo, la dispersión entre clases diferentes puede ser muy alta. Por el contrario, si el valor inicial de  $K$  es alto, la distancia entre clases puede ser muy pequeña, provocando el particionamiento de una misma clase en varias clases similares entre sí.

## 7.2 Mapeo mineralógico de muestras de roca

### 7.2.1 Muestras de afloramiento

Las muestras de mano con las que contamos nos ayudaron a realizar pruebas y la clasificación de cada una de ellas.

La primera muestra de mano que se clasificó tiene una forma circular, con pequeñas fracturas e incrustaciones de materia (Figura 57).

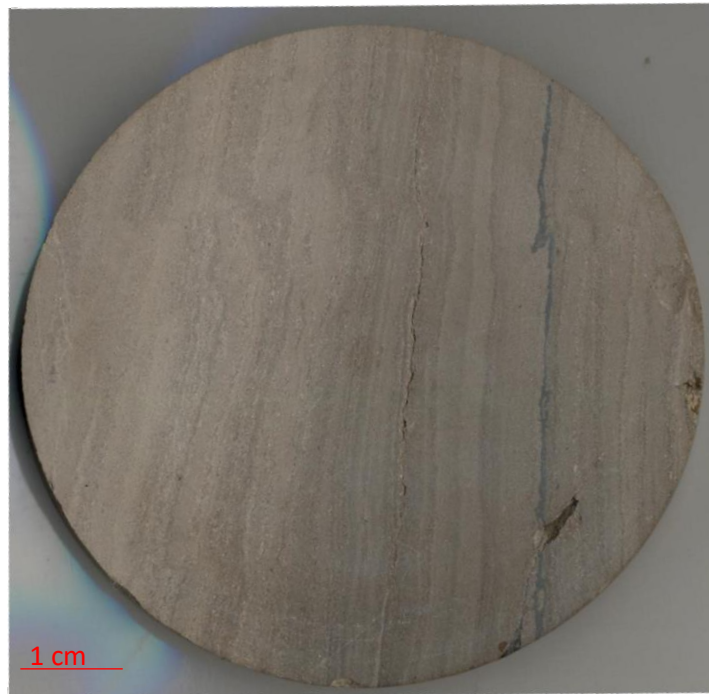


Figura 57.- Muestra de mano con una pequeña fractura con material orgánico.

Con esta muestra no se presentaron tantos problemas en el momento de la asignación de clases porque su composición era más uniforme, que quiero decir con esto, que no está compuesta por muchos materiales diferentes por lo cual los espectros no fueron muy variados (Figura 58). Su clasificación (Figura 59)

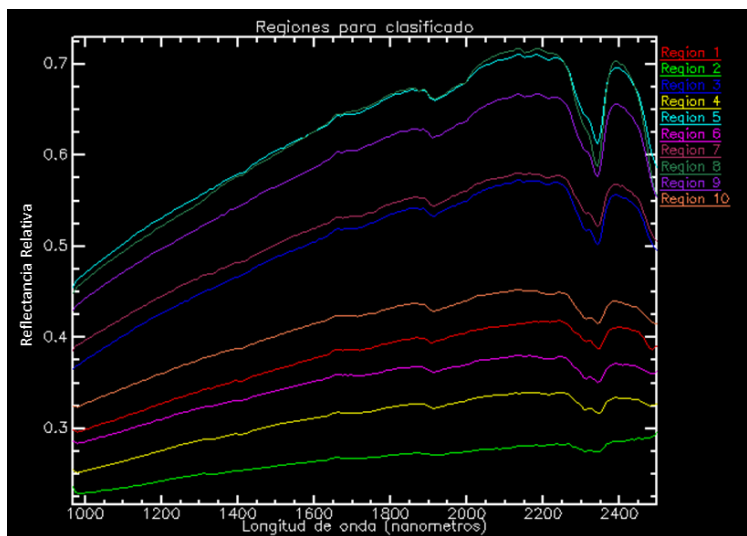
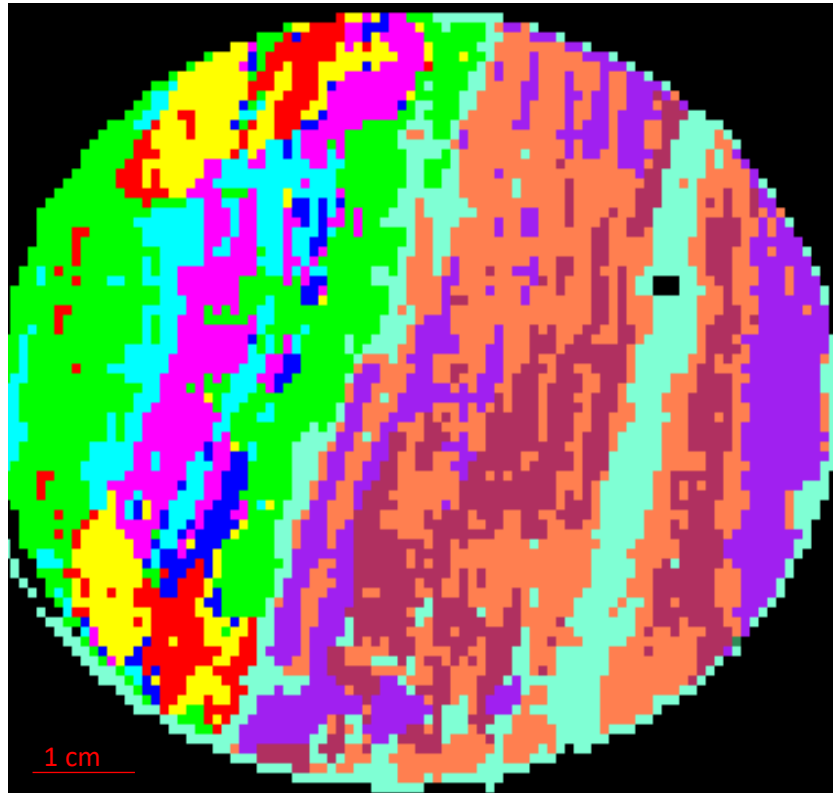


Figura 58.- Firmas espectrales características, utilizadas para realizar la clasificación de la muestra Figura 57

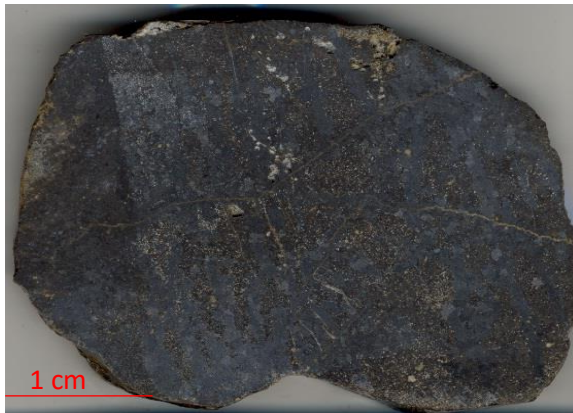


*Figura 59.- Muestra de mano (circular), clasificada con 10 clases, las cuales cada color nos representa las firmas espectrales seleccionadas en la Figura 58.*

La segunda muestra de mano que fue utilizada (Figura 60, a), es una muestra de color negro, con manchas de material distinto, presentaba algunas fracturas, su composición es variada y nos dificultó la definición de clases.

La clasificación fue complicada, las clases utilizadas fueron modificadas varias veces, debido que no conseguía una clasificación de buena calidad, tiene zonas con espectros muy diferentes (Figura 61), finalmente logramos una buena clasificación (Figura 60, b).

a)



b)

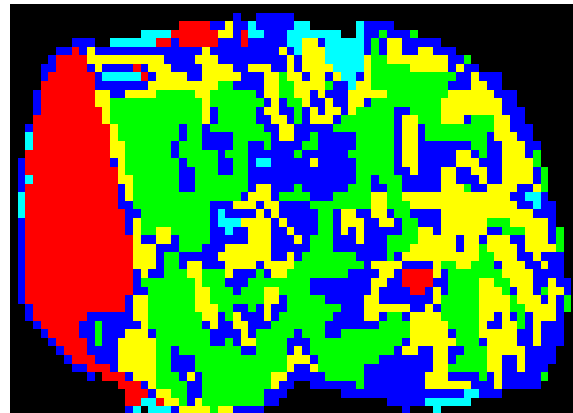


Figura 60.- a) Muestra de mano con una composición peculiar, con manchas y tonalidades diferentes que nos dificulta en la clasificación. b) Clasificación obtenida de la muestra, utilizando las firmas espectrales encontradas en la Figura 69

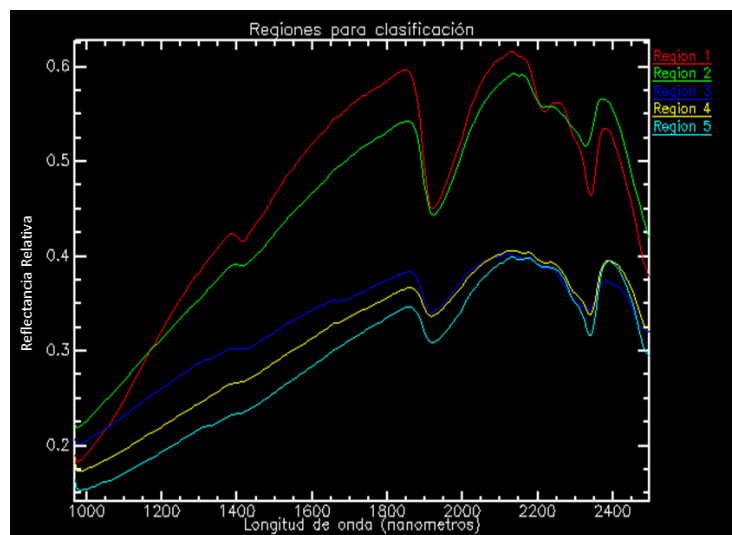


Figura 61.- Firmas espectrales características, utilizadas para realizar la clasificación como se muestra en la Figura 60 b)

La siguiente muestra de mano utilizada para pruebas y su clasificación, es una muestra que contiene fracturas evidentes a lo largo de esta. Con una matriz y también zonas con material orgánico (Figura 62, a).

a)



b)

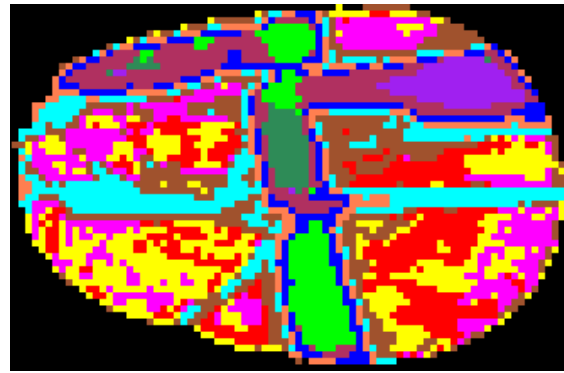


Figura 62.- a) Muestra de mano con fracturas y zonas de materia orgánica. b) Clasificación de la muestra de mano, cada color nos representa cada una de las firmas encontradas en la Figura 63.

La clasificación de la muestra se llevó un tiempo, debido que contiene varios aspectos que deben ser mostrados: Las fracturas, las zonas con material orgánico y la matriz, la clasificación final es la que se muestra en la (Figura 62, b), cada clase nos representan su composición y cada clase (color) sus distintos espectros (Figura 63).

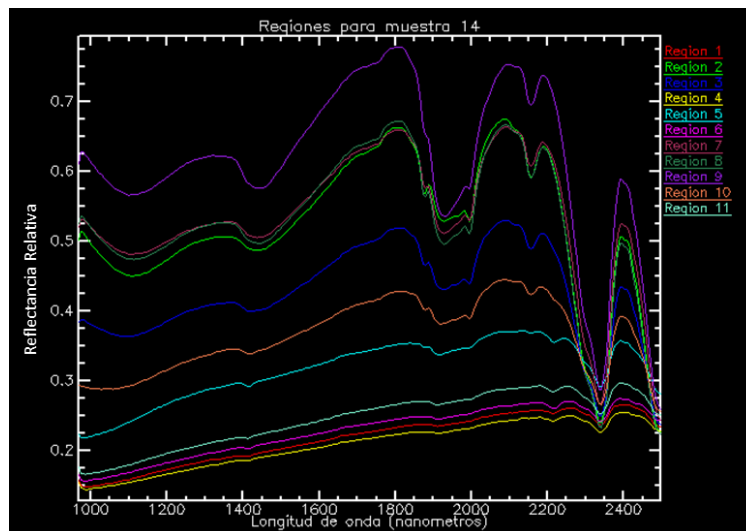
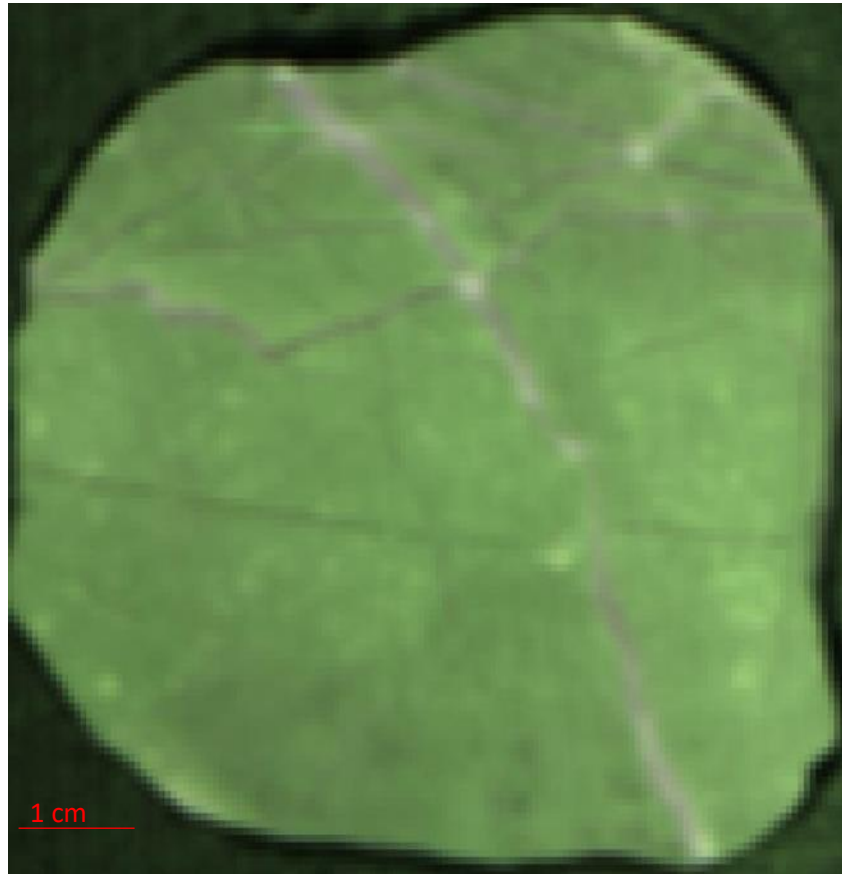


Figura 63.- Firmas espectrales características, utilizadas para realizar la clasificación, dando como resultado Figura 62b)

Esta muestra de mano contenía muchas fracturas (Figura 64), la cual era muy interesante realizar distintas pruebas sobre ella y su clasificación.



*Figura 64.- Muestra de mano, con importantes fracturas rellenas de calcita.*

Para la clasificación de la muestra, se ubicaron varias zonas de importancia y estas se utilizaron como clases (Figura 66), con estas se realizó la clasificación (Figura 65), utilizando 11 clases y cubriendo y resaltando las partes más importantes de la muestra.

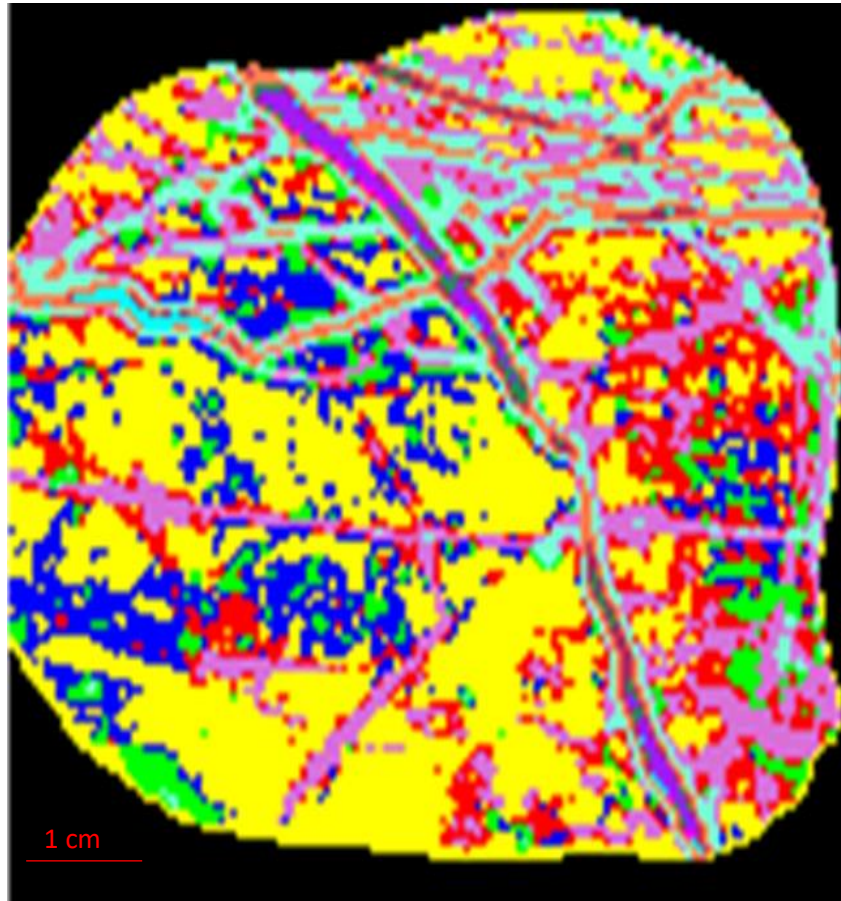


Figura 65.- Clasificación de la muestra, cada color nos representa las firmas espectrales seleccionadas en la Figura 74.

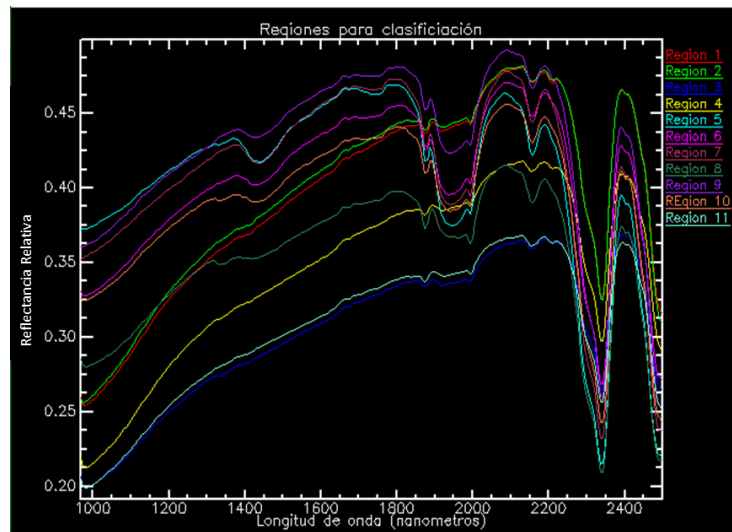


Figura 66.- Firmas espectrales características, utilizadas para realizar la clasificación, como se observa en la Figura 65.

Se obtuvo esta muestra (Figura 67) para pruebas y para su clasificación, siendo bastante interesante debido a las diversas fracturas que posee.

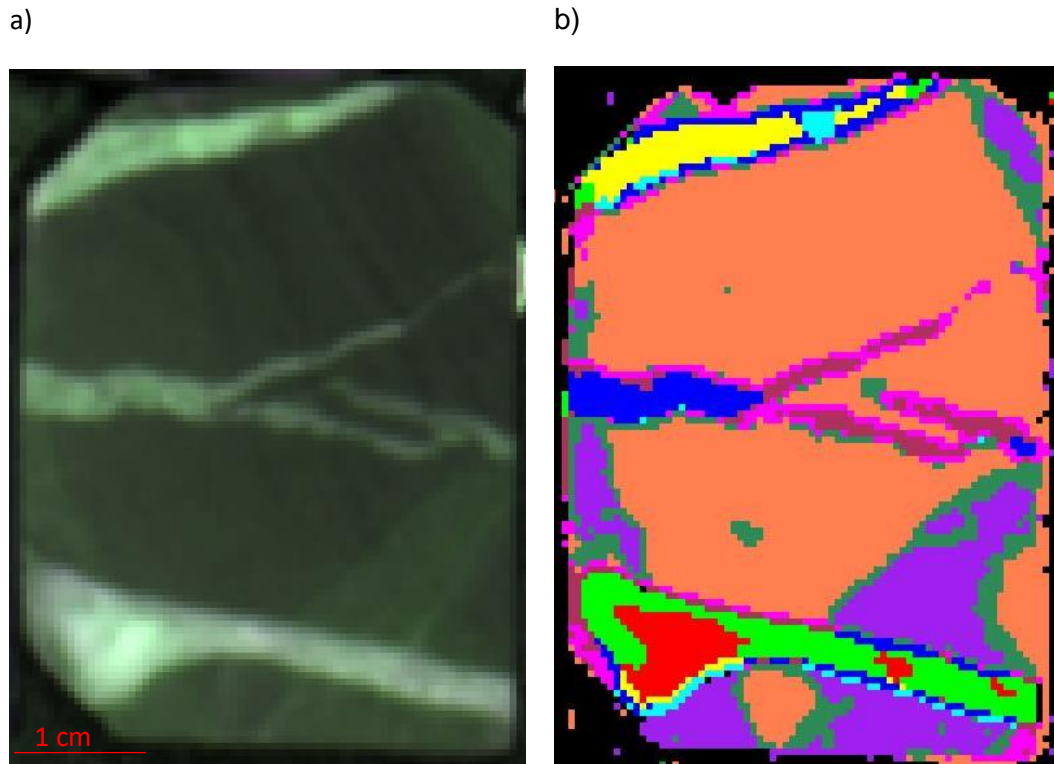


Figura 67.- a) Muestra de mano con diversas fracturas y zonas interesantes. b) Clasificación de la muestra, utilizando las firmas espectrales encontradas en Figura 68.

Para su clasificado, se utilizaron 15 clases (Figura 68), es bastante distinguible las diferentes fracturas presentes, y la zona en la matriz se pueden distinguir dos zonas con diferentes composiciones y su clasificación resultante se puede observar en la (Figura 67 b).

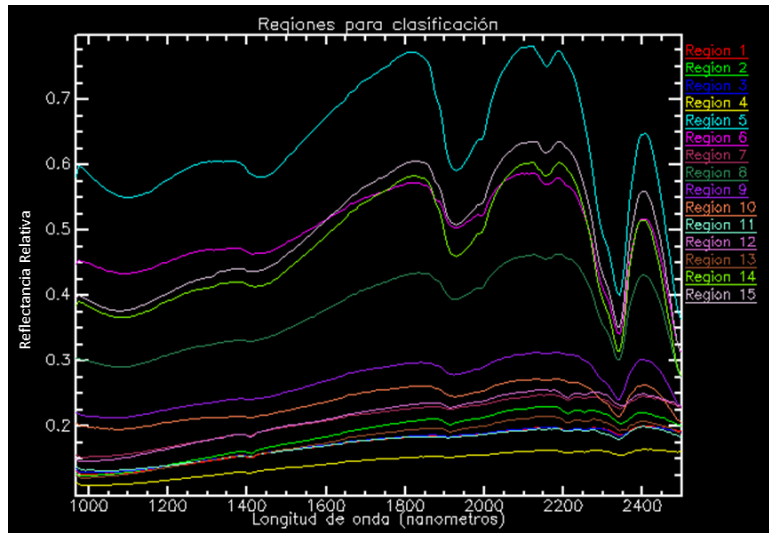


Figura 68.- Firmas espectrales características, utilizadas para realizar la clasificación, como se observa en la Figura 67 b).

En esta muestra de mano (Figura 69, a), posee dos fracturas evidentes, ubicadas en un extremo y la otra que cruza el centro de esta, y una matriz con zonas con detalles interesantes.

a)



b)

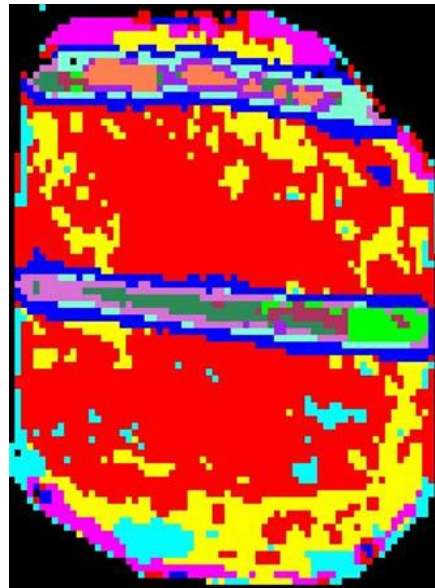


Figura 69.- a) Muestra de mano, con dos fracturas centrada y en el extremo. b) Muestra clasificada, utilizando las firmas espectrales características encontradas en la Figura 78.

Para la clasificación de esta muestra, se utilizaron 11 clases, la matriz al tener zonas interesantes complicó un poco la identificación de las clases adecuadas (Figura 70), y las fracturas paso algo similar, su composición es variada por eso en el centro se identifican varias zonas diferentes, y el resultado se puede observar en la Figura 69 b).

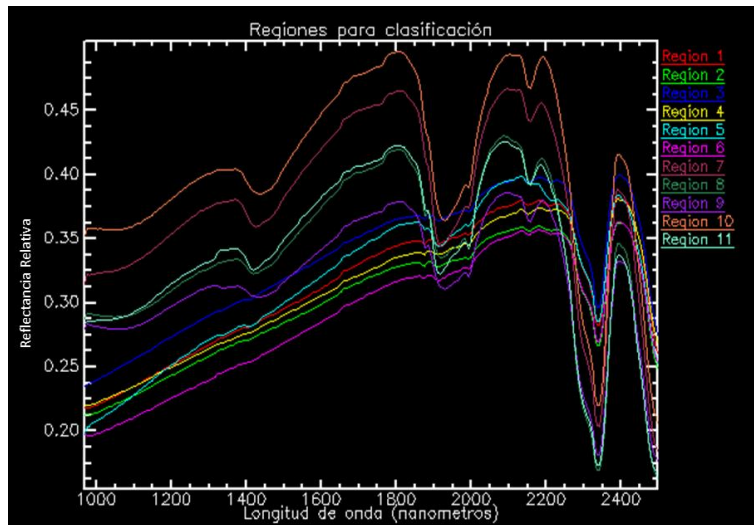


Figura 70.- Firmas espectrales características, utilizadas para realizar la clasificación, como se observa en Figura 69 b).

#### Muestra de mano llevada al M.E.B. (Microscopio Electrónico de Barrido)

Se utilizó la muestra de mano para un análisis que nos ayude a su mejor clasificación e identificación de los distintos materiales que lo corresponden. El análisis al que se sometió la muestra (Figura 71), es el análisis con el microscopio electrónico de barrido (MEB), el cual nos ayuda a conocer la composición de la muestra y los porcentajes de los diferentes elementos contenidos.



*Figura 71.- Muestra de mano, utilizada para realizar el análisis con el MEB.*

Para tener una clasificación más puntual la muestra (Figura 71), se seleccionaron 10 zonas para conocer la composición como se muestra en la Figura 72.



Figura 72.- Zonas seleccionadas para el análisis MEB

En la siguiente grafica (Figura 73) se muestra los espectros de cada uno de los mapeos y también los porcentajes mineralógicos (calcio y magnesio) de cada una de las zonas analizadas.

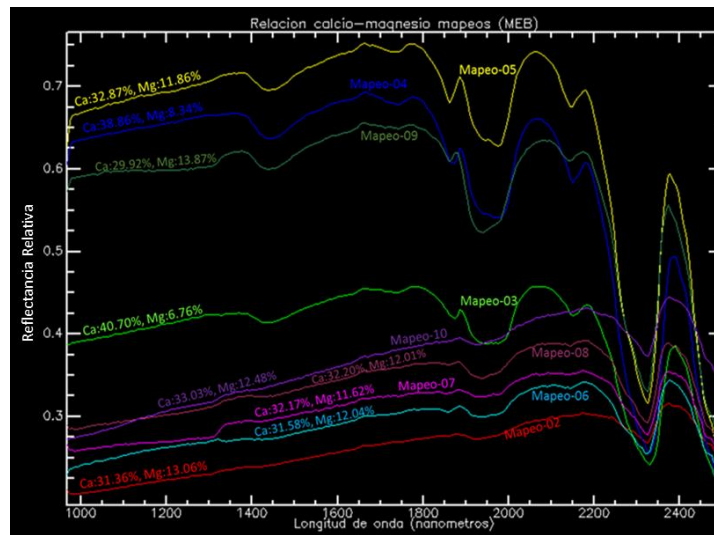


Figura 73.- Zonas de los mapeos analizados y porcentajes de Calcio y Magnesio.

## Mapeo 02

Como podemos ver en la Figura 74, en el mapeo 02 se muestra la imagen obtenida en el análisis con el MEB.

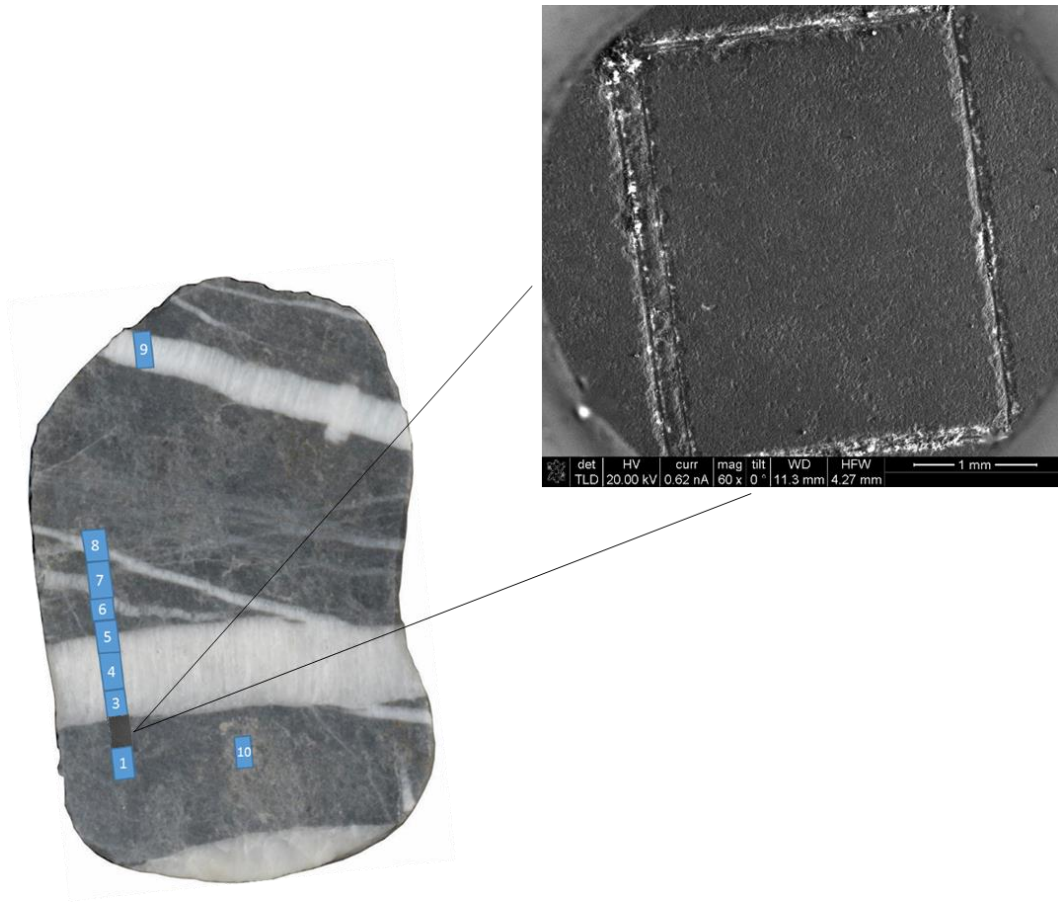


Figura 74.- Mapeo 02, con la imagen obtenida del análisis (MEB) de esta zona.

Mostramos la cuantificación obtenida mediante el MEB (Figura 75), la cual nos arroja los elementos presentes en la zona 02 de la muestra de mano.

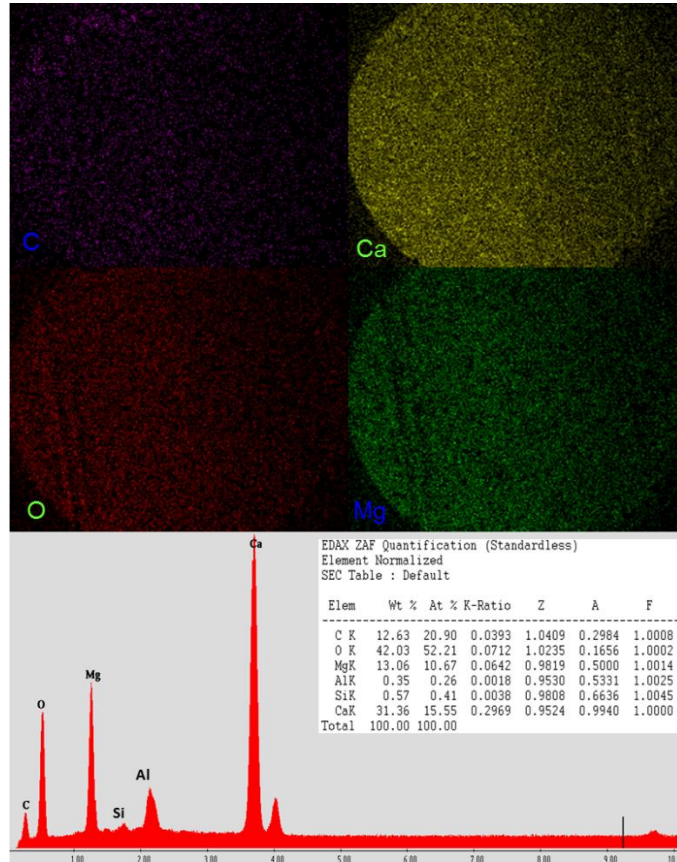


Figura 75.- Cuantificación de los elementos presentes, en la zona mostrada de la Figura 82, del mapeo 02.

Los elementos químicos identificados por la dispersión de energías de rayos-X (EDS) son: Carbono (C), Oxígeno (O), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Silicio (Si) y Aluminio (Al), los cuales corresponden a una dolomía arcillosa. Las imágenes a color indican la distribución y concentraciones de los elementos químicos identificados en la zona seleccionada.

Para realizar otra comprobación del mineral existente, se utiliza la herramienta Análisis Espectral (Tabla 15), y el resultado es el siguiente:

Tabla 15.- Análisis Espectral del mapeo 02

Análisis Espectral			
Pixel x:162 y: 155			
Librería espectral	Correlación	SAM	SFF
Dolomite2 spc	0.820	0.913	0.879
Albitel spc	0.813	0.965	0.724

Mapeo 04

Ubicamos el mapeo 04 en la Figura 76 , donde fue hecho el análisis con el MEB.

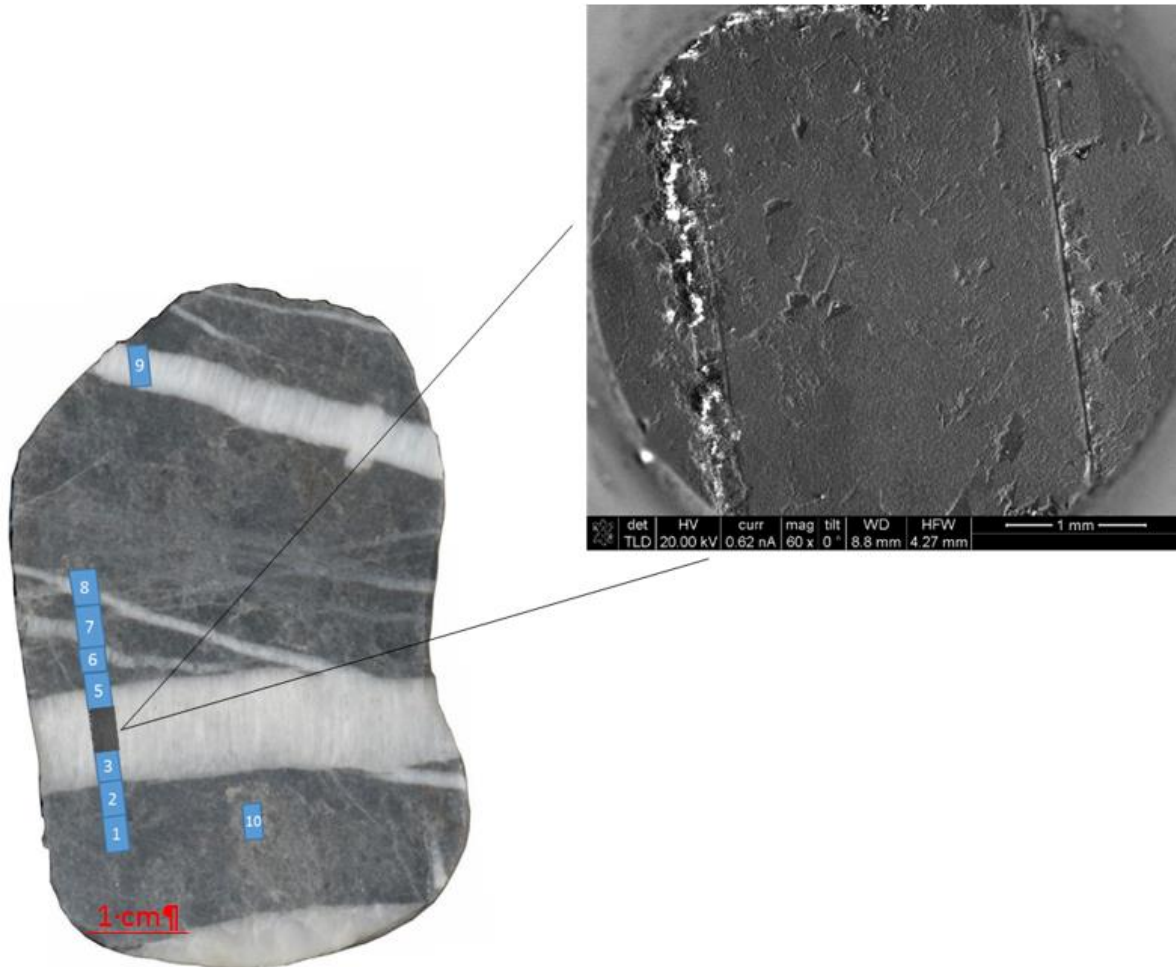


Figura 76.- Ubicación del mapeo 04, y la imagen del análisis hecha por el MEB.

La cuantificación de los elementos que nos arroja el análisis MEB (Figura 77) es lo siguiente:

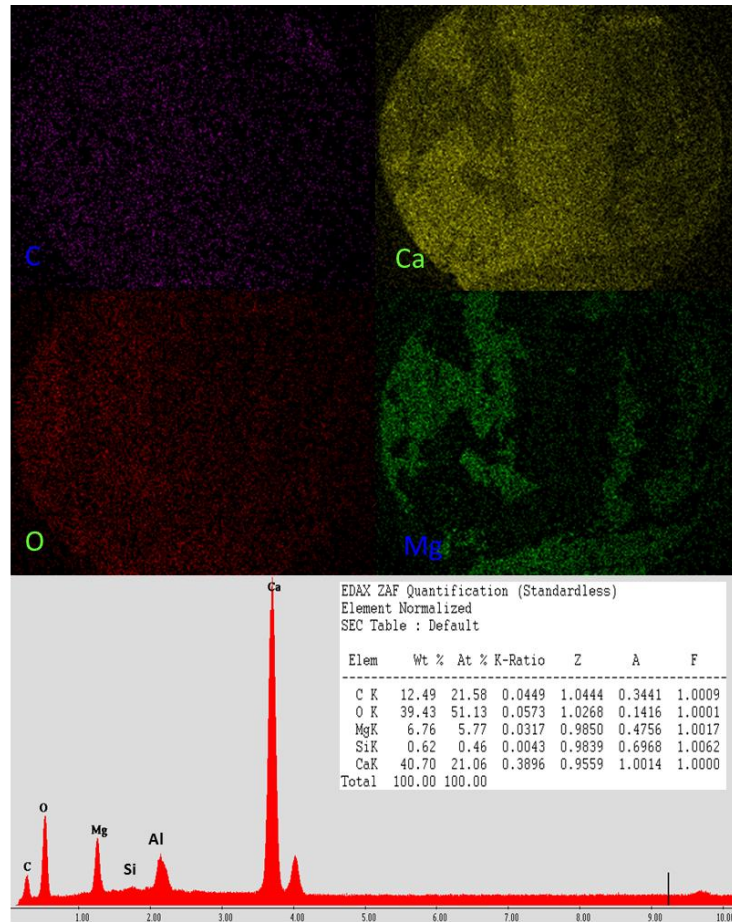


Figura 77.- Cuantificación de los elementos presentes en la zona mostrada en la Figura 84, del mapeo 04.

Los elementos químicos identificados por la dispersión de energías de rayos-X (EDS) son: Carbono (C), Oxígeno (O), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Silicio (Si) y Aluminio (Al), donde el silicio y aluminio se encuentran en menor proporción, los cuales corresponden a una calcita. Las imágenes a color indican la distribución y concentraciones de los elementos químicos identificados en la zona seleccionada.

Para tener otra referencia sobre el mineral existente, se empleó la herramienta incluida en el software ENVI, llamada Análisis Espectral, y arrojé los siguientes resultados:

Tabla 16.- Análisis Espectral del mapeo 04

Análisis Espectral			
Pixel x:169 y: 154			
Librería espectral	Correlación	SAM	SFF
Claicite3 spc	0.798	0.903	0.626
Calcite1 spc	0.764	0.898	0.563

Se tenían una serie de muestra de mano con las cuales se realizaron las distintas pruebas con el equipo, el siguiente paso es hacer una clasificación de ellas mediante la herramienta Sam, la cual consiste en la asignación de clases, estas clases se eligen dependiendo de los espectros distintivos dentro de cada muestra.

#### Núcleo de barreno

Se tenía una parte de un barreno extraído en la localidad de la Formación El Doctor (Figura 78), al cual se le realizaron las pruebas y se procedió con su clasificación.



Figura 78.- Muestra de núcleo, contiene incrustaciones de hidrocarburo muy evidente.

En la asignación de clases para la muestra se tuvieron algunos inconvenientes debido a que contiene incrustaciones de hidrocarburo, lo cual dificultaba la clasificación, debido que su firma espectral es muy diferente a la que se tenían en el resto de la muestra, y aparte de ser diferente también presentaba mucho ruido era muy ruidosa. Se obtuvieron diferentes espectros que se emplearon para la clasificación (Figura 79).

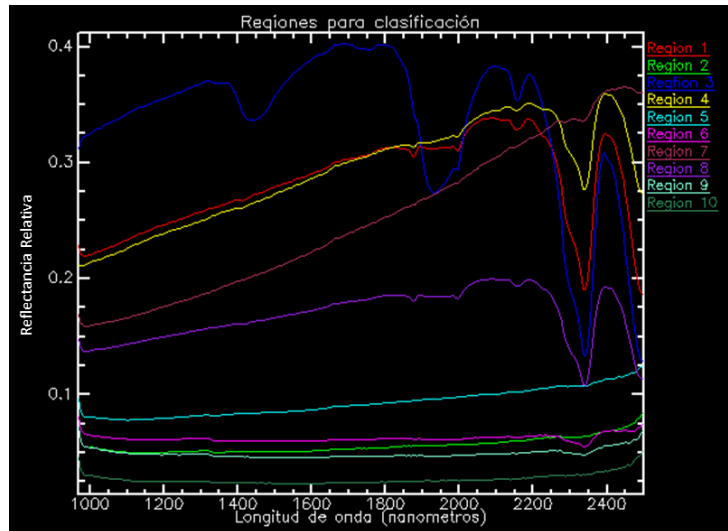


Figura 79.- Firmas espectrales características, utilizadas para la clasificación como se observan en la Figura 80

Después de resolver el problema de las clases, se procedió a su clasificación, obteniendo una clasificación de la siguiente manera (Figura 80)

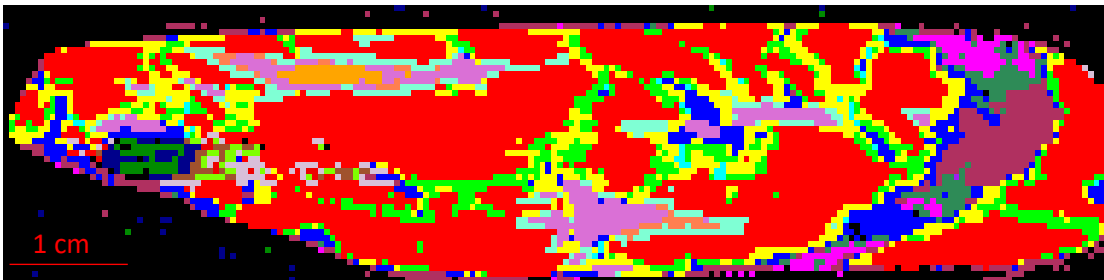
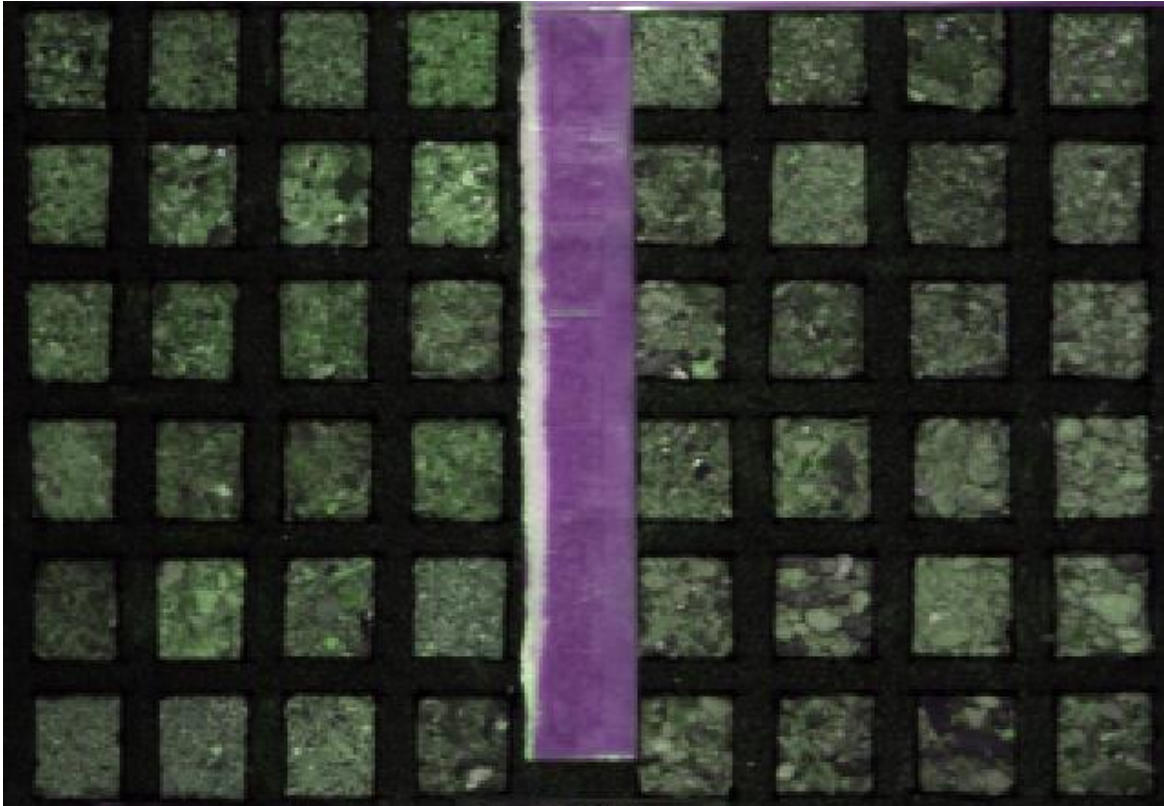


Figura 80.- Muestra de núcleo clasificada con 10 clases, cada clase corresponde a un espectro diferente en la muestra, aun teniendo unas zonas sin clasificar.

### 7.2.2 Muestras de canal

También se hicieron pruebas con muestras de canal (Figura 81), se elaboró una base con espacios para colocar dentro las muestras, y se procedió hacer la clasificación.



*Figura 81.- Muestras de canal, colocadas en un contenedor para realizar las distintas pruebas.*

Para la clasificación de las muestras de canal se ubicaron zonas llamadas ROI (Figura 82), mediante las cuales se extrajo un promedio de todas las firmas presentes, cada promedio fue utilizado como una clase.

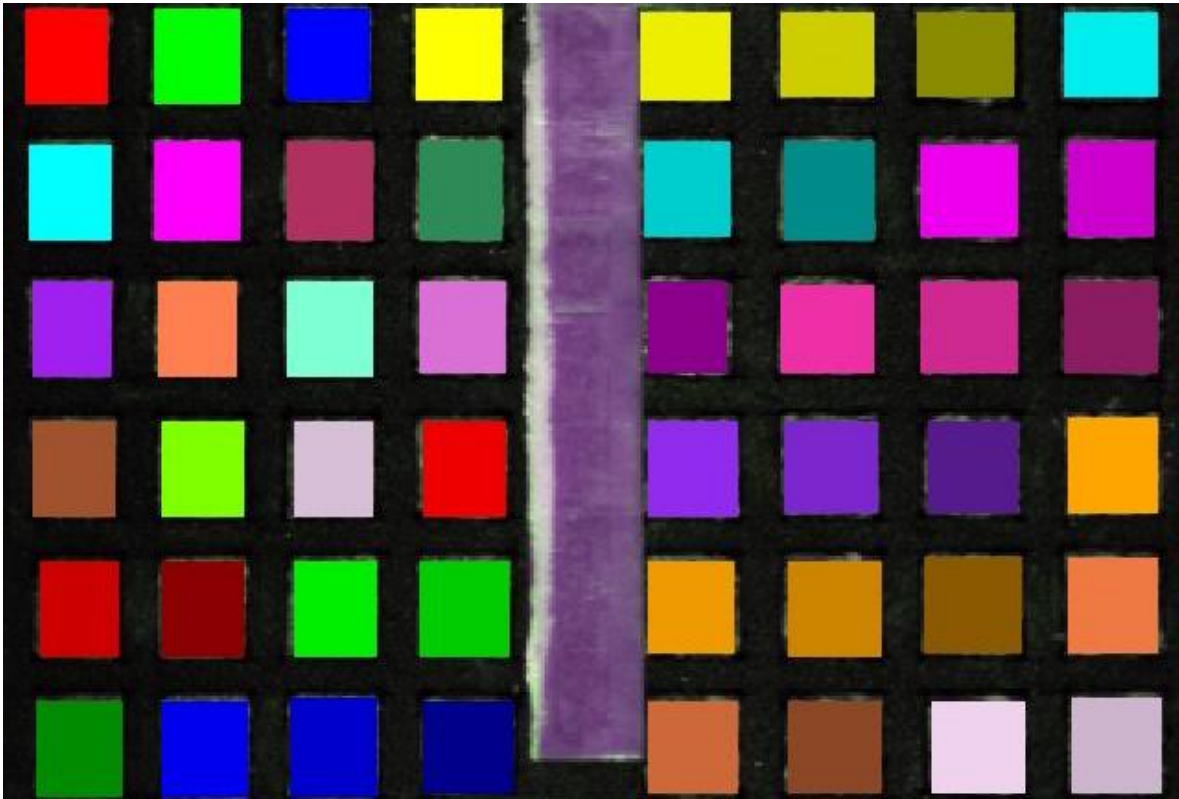


Figura 82.- Muestras de canal, cada una con su respectivo ROI, para obtener las clases a clasificar.

En la gráfica mostrada en la Figura 83, se muestran los promedios que se utilizaron para cada una de las clases para el clasificado.

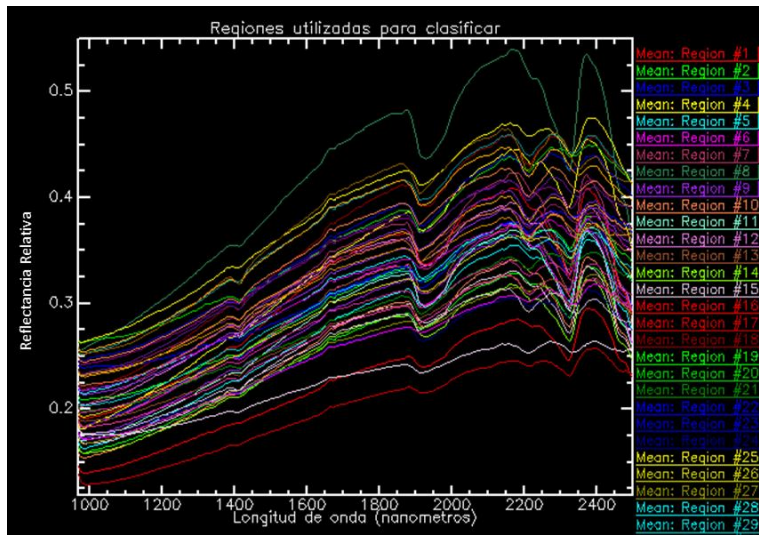
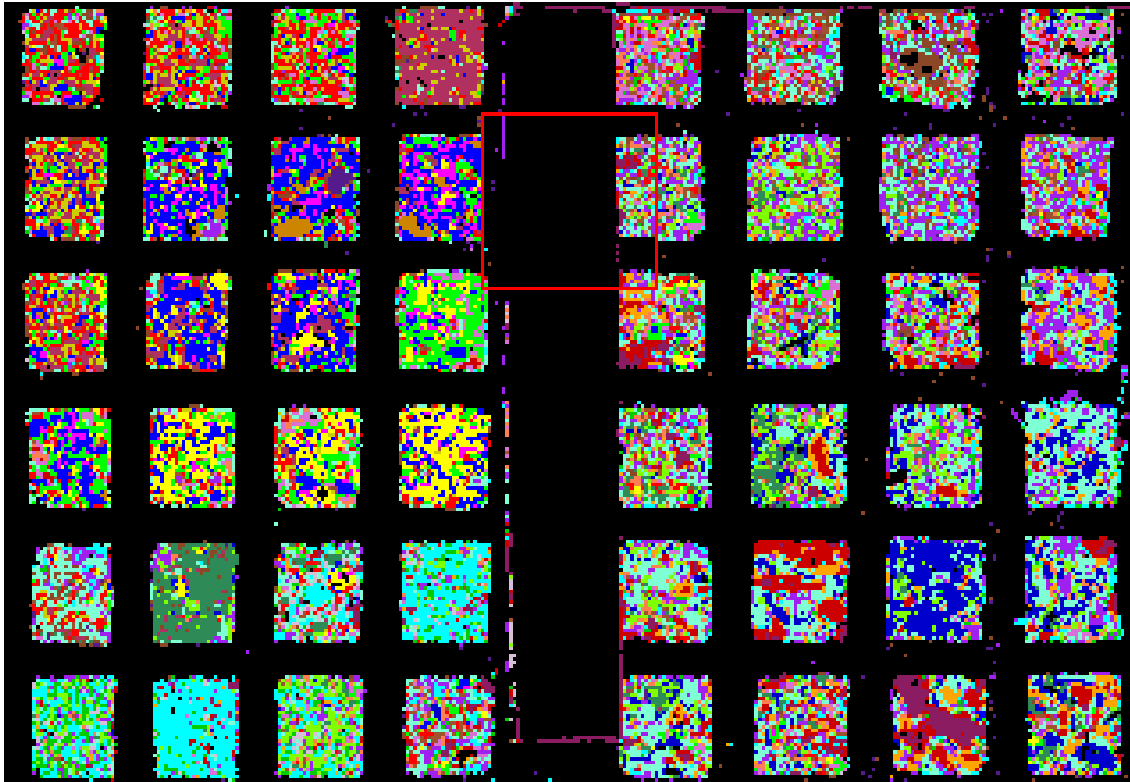


Figura 83.- Firmas espectrales características, utilizadas para realizar la clasificación de la muestra cómo se puede apreciar en la Figura 84.

Utilizando los promedios obtenidos, se procedió a la clasificación de las muestras de canal (Figura 84)



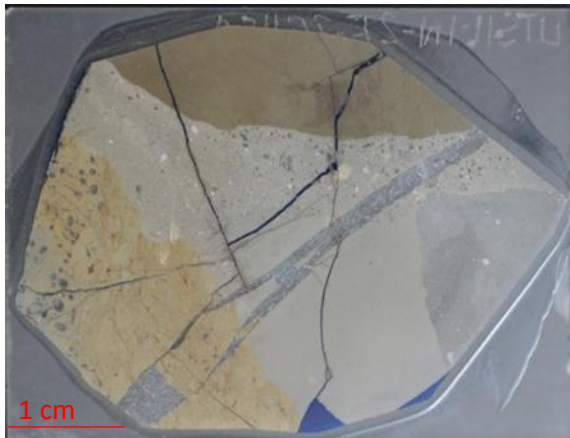
*Figura 84.- Clasificación de las muestras de canal, utilizando 48 clases, pero como vemos por la gran cantidad de elementos presentes aún podemos notar pequeñas zonas sin clasificar.*

Una de las dificultades que se tienen en este tipo de material, es la gran cantidad de elementos presentes, pero más aún la combinación de elementos y eso hace que sea difícil la distinción y clasificación de las muestras.

### 7.2.3 Laminas delgadas

Con este tipo de muestras, se dificulta su clasificación, debido a que el vidrio que contiene la lámina delgada (Figura 85a) hace que la luz en el momento de la adquisición se transmita y esto genera que el espectro de la lámina sea demasiado ruidoso y dificulte la asignación de clases (Figura 86), pero aun así se realizó una aproximación de cómo podría ser una clasificación (Figura 85b).

a)



b)

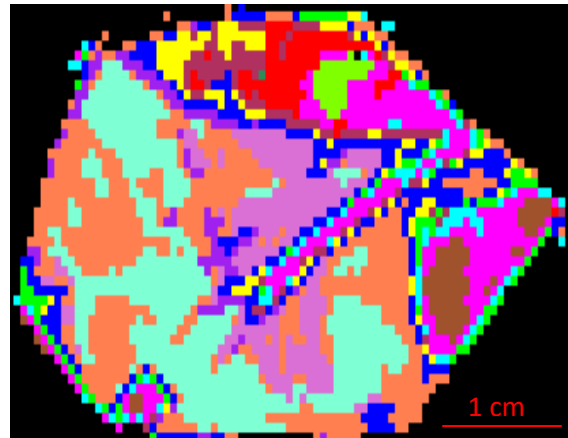


Figura 85.- a) Lámina delgada de una roca carbonatada. b) Clasificación de la lámina delgada, cada color nos representa las distintas firmas espectrales mostradas en la Figura 86.

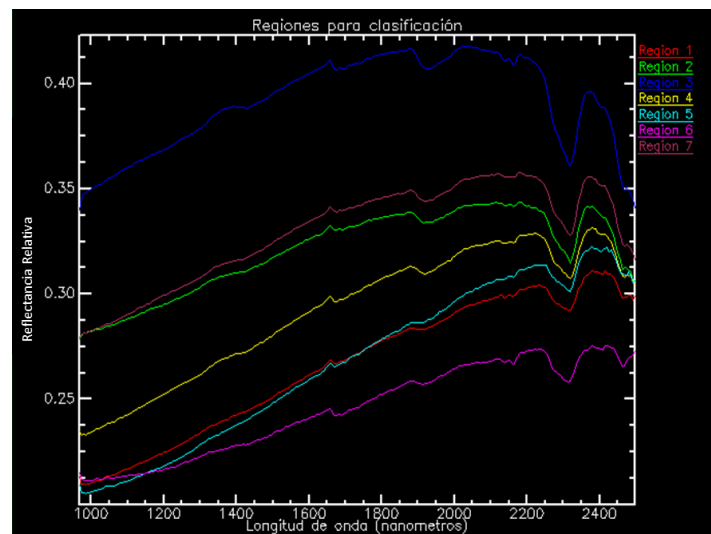


Figura 86.- Firmas espectrales características, utilizadas para realizar la clasificación de la muestra, dando como resultado lo mostrado en la Figura 85.

Se compararon dos espectros (Figura 87), intentamos ubicarlos en la misma coordenada, el espectro en color azul es de la muestra de mano y el espectro en color rojo es de la lámina delgada de la misma muestra, como podemos observar los espectros son muy distintos aun siendo la misma muestra, pero la diferencia de estos radica en que uno es lamina delgada, y el vidrio produce una interferencia y provoca que los espectros se comporten de manera diferente y más ruidosos.

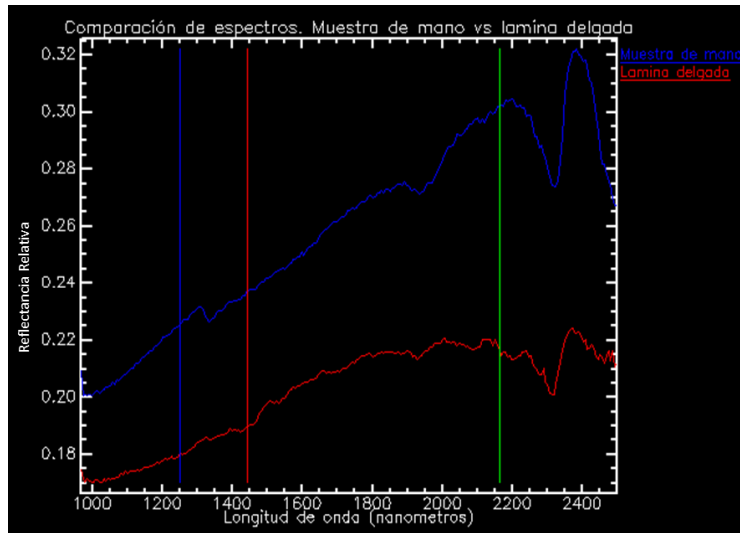


Figura 87.- Comparación de los espectros de la misma muestra, espectro de la muestra de mano (azul) y espectro de la lámina delgada (rojo).

Como sugerencia para intentar realizar una mejor clasificación a las láminas delgadas, se podría colocar un polarizador en la parte de abajo de cada lámina, para mitigar el ruido provocado por la transmisión de la luz, provocando que los espectros obtenidos salgan más limpios.

## 8. Conclusiones

Se documentó el potencial que representa el análisis de imágenes hiperespectrales en la caracterización mineralógica de rocas carbonatadas. Para ello, se realizaron mediciones a diferentes escalas: muestras de afloramiento (“muestras de mano” y barrenos), láminas delgadas y muestras de canal. Estas escalas se trabajan frecuentemente en la exploración petrolera para realizar estudios geológicos detallados que se requieren para la caracterización de yacimientos carbonatados.

Los resultados obtenidos y descritos en la sección 7.2 muestran que el equipo HySpex SWIR-320m-e nos permite caracterizar la variación de composición mineral de rocas carbonatadas, incluso detectar ligeras variaciones en la relación calcio-magnesio, presencia de arcillas y otros materiales accesorios (e.g., halita, arcillas). Estas ligeras variaciones pueden ser captadas por la cámara y se pueden observar de manera gráfica como firmas espectrales características. La caracterización mineral se realizó en función de las variaciones de estas firmas espectrales características. Posteriormente aplicando técnicas de clasificación supervisadas y no supervisadas se obtuvieron mapas de variación mineralógica.

Los mapas de variación mineralógica fueron calibrados con estudios de microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas inglés, *Scanning Electron Microscopy*) y el análisis elemental EDS (EDS, por sus siglas en inglés, *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*).

Este trabajo puede representar una técnica innovadora, práctica y de fácil manejo que aportaría información cuantitativa que se requiere en la caracterización geológica de yacimientos petroleros carbonatados.

### Recomendaciones:

Para mejorar los resultados obtenidos se sugiere:

- Utilizar al menos dos paneles reflectancia estándar de referencia (con valores de reflectancia diferentes) para obtener firmas espectrales con valores de reflectancia normalizados. En este trabajo todos los resultados se obtuvieron en reflectancias relativas.
- Utilizar un filtro polarizador para minimizar la señal-ruido en las mediciones con láminas delgadas.
- Colocar la cámara a una distancia focal de 95 cm para lograr la resolución espacial máxima (~0.9 mm por pixel).
- Colocar a una distancia óptima las lámparas es fundamental, debido que el par de haz de luz debe de coincidir en un mismo punto, esto con el fin de “homogenizar” que la iluminación a lo largo de la medición, lo cual puede evitar la reducción de ruido de las firmas espectrales de los materiales estudiados.

## 9. Referencias

Actualización de la Actividad Eruptiva--Volcán Cotopaxi N°14–2015.  
<http://www.igeppn.edu.ec/servicios/noticias/1160-actualizacion-de-la-actividad-eruptiva-volcan-cotopaxi-n-14-2015>

Allaby, Michael, 2013. A Dictionary of Geology and Earth Sciences (4th Edition), 644 p.

Ambientum, portal profesional del medio ambiente.  
[http://www.ambientum.com/enciclopedia\\_medioambiental/energia/El\\_Sol\\_fuente\\_basica\\_de\\_energia.asp](http://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/energia/El_Sol_fuente_basica_de_energia.asp)

California Institute of Technology.  
[http://legacy.spitzer.caltech.edu/espanol/edu/learn\\_ir/images/icecube.jpg](http://legacy.spitzer.caltech.edu/espanol/edu/learn_ir/images/icecube.jpg)

Carrasco, J., 2003. Radiaciones ionizantes y no ionizantes. Aplicaciones y riesgos, Hospital U. "Virgen de la victoria", Málaga, España. p 1-44.

Chuvienco, E., 1995. Fundamentos de teledetección espacial. Segunda edición, Madrid, España, pp 253

¿Cómo el ojo percibe el color? <https://carolinaroncona.wordpress.com/2016/05/20/como-el-ojo-percibe-el-color/>

¿Cuál es la diferencia entre Hardware y Software?  
<http://www.cavsi.com/preguntasrespuestas/cual-es-la-diferencia-entre-hardware-y-software/>

Del ramo, A., Guillen, F. Región de Murcia digital.  
[http://www.regmurcia.com/servlet/s.SI?sit=c,365,m,108&r=ReP-8166-DETALLE\\_REPORTAJESABUELO](http://www.regmurcia.com/servlet/s.SI?sit=c,365,m,108&r=ReP-8166-DETALLE_REPORTAJESABUELO)

Escuer, J., Segovia, A., 2005. Tutorial MultiSpec (1 parte). IES Universidad laboral, Albacete, España. p 1-24

Estrada, O., 2011. Espectro electromagnético. Ondas electromagnéticas. Fenómeno físico de ondas que viajan por el espacio, Corporación unificada nacional de educación superior. pp 4-10.

Gómez, E., 2006. Guía básica de conceptos de radiometría y fotometría. Departamento de física aplicada, Universidad de Sevilla, España. pp 5-9

González, G., Rabin, C., Ribeiro, S., Di biase, I., 2011. Para entender las radiaciones. Energía nuclear, medicina, industria, Universidad de la república, Montevideo, Uruguay. pp 15-84

- González, J., Morales, E., 2013. Maximum likelihood. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, San Andrés Cholula, Puebla, México. p 1-27
- Goosse, H., Barriat, P., Lefebvre, W., Loutre, M., Zunz, V., 2010. Chapter 2. The Energy balance, hydrological and carbon cycles. Introduction to climate dynamics and climate modelling. pp. 25-57
- Green In. <http://www.ahorroenergiahoy.com.mx/>
- Hyper teach. Part 1 theory. Training in imaging spectroscopy, 2005. Belgian Science Policy. pp 56, [https://www.belspo.be/belspo/organisation/Publ/pub\\_ostc/OA/rOA17Th\\_en.pdf](https://www.belspo.be/belspo/organisation/Publ/pub_ostc/OA/rOA17Th_en.pdf)
- Jiménez, L., 2011. Desarrollo de nuevos algoritmos para procesamiento de imágenes hiperespectrales en ORFEO Toolbox. Proyecto fin de carrera. Ingeniería informática. p. 1-135
- Kurz, T., Buckley, S., Howell, J., 2012. Close range hyperspectral imaging integrated with terrestrial lidar scanning applied to rock characterisation at centimetre scale, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Centre for Integrated Petroleum Research, Bergen, Norway, pp 418
- Lenhard, K., Baumgartner, A., Schwarzmaier, T., 2015. Independent laboratory characterization of neo hypspx imaging spectrometers vnir-1600 and swir-320m-e. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, vol. 53, no. 4, pp 1829.
- Lira, J., 2010. Tratamiento digital de imágenes multispectrales. Instituto de geofísica, UNAM. México, DF, pp 42
- López F., Heras, J., Argüello, D., 2014. Clasificación Supervisada de Imágenes de Sensado Remoto en GPU. Centro Singular de Investigación en Tecnoloxías da Información, Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, Galicia, España. p 1-12
- Magnitudes y unidades en radiometría y fotometría. <http://www.herrera.unt.edu.ar/opto/material/apuntes/UNIDADES.pdf>
- Martínez, A., Gallud, J., Abad, F., 1998. Distorsiones en la adquisición de imágenes de teledetección y su corrección. Universidad Politécnica de Valencia, España, pp 353
- Martínez, P., Aguilar, L., Plaza, A., Linaje, M., Preciado, J., Pérez, R., 2001. Clasificación no supervisada de imágenes hiperespectrales utilizando una red neuronal auto-organizativa. Teledetección, medio ambiente y cambio global, Universidad de Extremadura, Departamento de informática. pp 490-494

- Montalvo, C. E., 2010. Apuntes de Óptica. Departamento de Biología Celular y Tisular, Facultad de Medicina. UNAM. pp. 1-9.  
[http://histologiaunam.mx/descargas/ensenanza/portal\\_recursos\\_linea/apuntes/1\\_optica.pdf](http://histologiaunam.mx/descargas/ensenanza/portal_recursos_linea/apuntes/1_optica.pdf)
- Norks Elektro Optikk AS. Manual. NEO-Hyspex-Hyperspectral- Cameras Description. Lorenskog, Norway. pp 2-4
- Plaza, A., 2002. Proposición, Validación y Prueba de una Metodología Morfológica para el Análisis de Datos Hiperespectrales que Integra Información Espacial y Espectral. Tesis doctoral, Universidad de Extremadura, Departamento de informática, p 1-332
- Posada, E., Ramírez, H., Espejo, N., 2012. Manual de prácticas de percepción remota con el programa ERDAS IMAGINE 2011. Centro de investigación y desarrollo de información geográfica (CIAF), Bogotá, Colombia, p 1-154.
- Prendes, M., Amorós, L., 2001. Accesibilidad en aplicaciones informáticas. Comunicación presentada en un congreso en Santiago de Compostela, Galicia, España. p 1-9
- [Radiaciones electromagnéticas. http://astrojem.com/radiacionelectromagnetica.html.](http://astrojem.com/radiacionelectromagnetica.html)
- Rodríguez, J., 2015. Sistemas multiespectrales e hiperespectrales para la observación del territorio. Análisis y aplicación a la prospección de hidrocarburos. Trabajo fin de grado, Universidad politécnica de Madrid, Escuela técnica superior de ingenieros en topografía, geodesia y cartografía, Madrid, España. pp 49-50
- Rodríguez, M., 2010. Sistema multiespectral de adquisición y procesado de imagen en el infrarrojo. Proyecto fin de carrera, Universidad Carlos III de Madrid, Ingeniería de Telecomunicación, España. p. 1-153
- Rojas, M., 2009. Caracterización de imágenes hiperespectrales utilizando Support Vector Machines y técnicas de extracción de características. Proyecto fin de carrera, Universidad de Extremadura, Ingeniería informática, p. 1-118
- Román, A., Indira, N., 2013. Análisis de imágenes hiperespectrales. Revista Ingeniería y desarrollo, p. 2-6
- Sanz, C., 2002. Razonamiento evidencial dinámico. Un Método de Clasificación aplicado al Análisis de Imágenes Hiperespectrales. Tesis doctoral, Universidad nacional de la plata, Facultad de ciencias exactas, La plata, Argentina. p 1-137
- Simonett, David S., 1983. The development and principles of remote sensing in Manual of Remote Sensing, Colwell, Robert N. ed., American Society of Photogrammetry 2nd Ed., Falls Church, VA, 1983.

USGS Digital splib04 Spectral Library. Sample Descriptions and Plots.  
<http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib04/spectral-lib.desc+plots.html>