



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS  
COLEGIO DE GEOGRAFÍA**

**“Técnicas de percepción remota aplicada a la localización  
de minerales característicos de los sistemas hidrotermales.  
Caso de estudio: Acapulco, Puebla.”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**LICENCIADA EN GEOGRAFÍA**

**P R E S E N T A:**

**KAREN OCAMPO CAMPOS**



**ASESOR DE TESIS:  
GRISELDA BERENICE HERNANDEZ  
CRUZ**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres Katy y Benito, que estuvieron siempre presentes a lo largo de mi estancia académica, en cada uno los momentos más importantes de mi vida y ser un ejemplo de perseverancia.

A mis hermanas Katya Karina y Lucy que aún sin estar cada día siempre lo estuvieron en mi corazón.

A Carlos que con su tolerancia y amor me ayudo a superar cuando más flaqueaba.

A mi amiga, compañera y asesora Bere porque con su paciencia, comprensión, consejos y apoyo me hizo lo que soy ahora. Una geógrafa.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por abrirme las puertas y hacerme sentir orgullosa de pertenecer a esta Gran Casa de Estudios.

A mis profesores que con sus enseñanzas y regaños me enseñaron lo que es la Geografía.

A mis compañeros de carrera que hicieron este de mi estancia en la carrera una etapa inolvidable de mi vida en especial a Karely, Maty, Gaby, Angeles y Pame.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología que con el Proyecto "Fomix Hidalgo" número 151453 "Anomalías de amonio en la caldera de Acoculco, Hidalgo-Puebla, como criterio de exploración geotérmica", que con sus apoyos logran la realización profesional de los estudiantes.

Al Instituto de Geofísica en especial al Dr. Carles Canet por aceptarme en este proyecto.

Todos aquellos familiares y amigos que no recordé al momento de escribir esto. Ustedes saben quiénes son.

***"Las geografía -dijo el geógrafo- son los libros más preciados e interesantes; nunca pasan de moda. Es muy***

***raro que una montaña cambie de sitio o que un océano quede sin agua. Los geógrafos escribimos sobre***

***cosas eternas."***

***Antoine de Saint-Exupéry***

## Introducción

En el presente trabajo se llevó al cabo un estudio preliminar de la exploración geotérmica en la Caldera de Aocolco, Puebla, utilizando procesamiento de imágenes de satélite. Se presenta una pequeña descripción de la geología del lugar y una breve explicación de las condiciones necesarias para la existencia de un sistema hidrotermal. En la sección metodológica se describen diferentes técnicas de clasificación supervisada, realce visual y realce espectral que se aplican a las imágenes para resaltar los rasgos espectrales que permiten determinar la presencia de materiales característicos de sistemas hidrotermales.

La integración de todos los resultados obtenidos con las diferentes técnicas de percepción remota, se presentan en un mapa del área de estudio, en la cual, estudios geológicos y geoquímicos previos, han demostrado que el área presenta características de potencial hidrotermal (López, 2009; Canet, 2010).

El uso de imágenes satelitales facilita el trabajo, debido a que permite que se tenga una visión sobre grandes áreas del terreno a estudiar, a un bajo costo y en un tiempo relativamente rápido. El trabajo de verificación en la zona de estudio, es por ende más eficiente.

Los sistemas hidrotermales se encuentran en una variedad de rocas con características y composición diferentes que, al entrar en contacto con los fluidos que se encuentran en el medio rocoso, comienzan a desencadenarse reacciones químicas, éstas, dan como resultado una alteración hidrotermal que puede constituir en el reemplazamiento de minerales, la filtración o el depósito de minerales en fracturas abiertas o cavidades para formar vetas o rellenar poros. El grado de alteración hidrotermal depende de la temperatura del fluido y también de la diferencia de temperatura entre las rocas y el fluido que la invade, la permeabilidad, la duración de la interacción fluido-roca, la composición de la roca, la composición del fluido y la presión (Browne, 1996).

La reacción química del fluido con las rocas produce minerales cuya identidad y abundancia dependerá de la temperatura, la composición del fluido y si se encuentran o no en ebullición. Los minerales más comúnmente reconocidos, se han organizado por grupos, y son los siguientes (Meyer y Helmer 1967, Corbett y Leach 1998):

Carbonatos: calcita, dolomita, siderita

Sulfatos: jarosita, alunitas, barita

Sulfuros: pirita, pirrotita, galeana

Oxidos: hematita, magnetita

Haluros: fluorita

Silicatos: epidota, illita, clorita, esmectita, caolinita, cuarzo.

La identificación de estos minerales por medio de sensores remotos, (reflectancia en las imágenes satelitales) así como algunas estructuras geológicas, permiten evaluar la posibilidad de encontrar alteraciones hidrotermales.

## **Planteamiento del problema**

Las nuevas tecnologías proponen un nuevo cambio en la relación HOMBRE - MEDIO AMBIENTE. Al pasar de los años ha cambiado el concepto de una Tierra estática a considerarla dinámica, lo cual propicia altos beneficios, fundamentalmente de carácter económico.

Ante los problemas ambientales que enfrenta la humanidad en estos tiempos, los recursos energéticos ocupan un sitio destacado ya que el desarrollo económico e industrial, así como las necesidades cada vez mayores de una población creciente, han demandado en los países un incremento en la capacidad energética instalada.

Esta demanda de energía tradicionalmente se satisfacía haciendo uso principalmente de fuentes convencionales, tales como la hidráulica y la térmica, pero en el transcurso de los años, se realizaron investigaciones para contar con nuevas fuentes energéticas llamadas alternas.

Para este trabajo se realizó un estudio a través de la percepción remota, donde se aplicaron diferentes tipos de técnicas que ayudaron a destacar zonas que contienen minerales característicos de zonas alteradas hidrotermalmente en el área de Aocolco, Puebla. Como resultado de este trabajo se obtuvo un mapa donde se destacaron anomalías que servirán de guía para la exploración geotérmica.

## **Justificación del tema**

Este estudio sirvió para poder proponer un mapa donde señala las zonas donde existe alteración hidrotermal y en un futuro, implementar este tipo de energías y aprovechar recursos que provee.

En el lugar donde se localiza la caldera volcánica de Acozulco, podremos ver que existen diferentes localidades como Acozulco, Atotonilco, Apan, Chignahuapan, Tulancingo, entre otros, que se verían beneficiados con este tipo de energía.

A largo plazo, se espera que la energía geotérmica no solamente se explote para la generación de energía eléctrica, sino también como fuente de calor para procesos industriales, con un bajo impacto ambiental.

Los estudios de exploración en zonas potencialmente geotérmicas en México, asegura un incremento en la contribución de este recurso ecológicamente sustentable al balance energético nacional.

En los últimos años ha habido un gran desarrollo en el aprovechamiento de la energía interna de la Tierra para generar electricidad. Las zonas de volcanismo activo presentes en México, son zonas con potencial hidrotermal. Actualmente, hay tres zonas bien estudiadas en el país: el extremo noroeste de Baja California, en Michoacán y en los límites de Puebla y Veracruz.

El aprovechamiento de este recurso geotérmico se realiza después de una serie de investigaciones científicas y técnicas que permiten conocer la forma y estructura del reservorio, así como sitios adecuados para llevar a cabo las perforaciones y obtener fluidos geotérmicos en superficie.

El territorio mexicano presenta una gran actividad tectónica por la acción de las placas litosféricas, como la Norteamericana, Caribe, Pacífica, Cocos y Rivera, que producen gran actividad volcánica en la parte continental. Todo esto permite afirmar que México posee un gran potencial de recursos geotérmicos.

Este estudio se llevó a cabo gracias a la ayuda del Instituto de Geofísica y CONACYT en el proyecto, "Anomalías de amonio en la Caldera de Acozulco, Hidalgo-Puebla, como criterio de exploración geotérmica" con clave de registro 151453

## **Objetivos**

Localizar áreas donde afloran rocas alteradas.

Elaboración de mapas con las zonas donde se identifican los minerales de alteración.

Trabajo de laboratorio en algunas muestras colectadas en campo, para verificación de los minerales encontrados con sensores remotos (espectroscopia infrarroja, SWIR)

## **Marco Teórico**

Las calderas se forman debido a las erupciones que suceden a gran escala en la Tierra; y se forman generalmente por el colapso del techo de una cámara magmática, en relación con erupciones de cráter explosivo.

Las calderas pueden estar segmentadas o delimitadas por fallas normales, radiales, transversales o longitudinales, así como por diques y domos, y presentar bloques hundidos en grados diversos.

*Las calderas se reconocen en muchas las regiones volcánicas activas de la Tierra, aunque son mucho menos comunes que los cráteres. Las calderas son expresión de una actividad violenta y peligrosa de erupciones. En el país hay varias calderas bien definidas, formadas en los últimos dos millones de años; los estudios geológicos están demostrando que en el Cinturón Volcánico Mexicano, (CVM) el número puede incrementarse notablemente con calderas antiguas y, como tales, no bien conservadas, pero se pueden reconocer por algunos vestigios en el relieve y la composición petrológica... (Lugo Hubp,2003)*

En las zonas volcánicas hay manifestaciones de emanaciones gaseosas y fluidos que son, fuentes primarias para la exploración de sistemas hidrotermales.

En la Caldera de Acozulco, se han realizado estudios por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), para conocer el potencial hidrotermal que posee la zona, y su posterior aprovechamiento.

La Caldera de Acozulco se localiza en los límites de los estados de Hidalgo y Puebla, en el sector oriental del CVM, y consiste en una estructura volcánica de colapso, de unos 18 km. de diámetro, formada entre hace 2.6 y 3 millones de años. Esta estructura contiene una secuencia de ignimbritas y lavas dacíticas y riolíticas, de hasta 900 m de espesor, sobreyaciendo un basamento Jurásico-Cretácico constituido por series sedimentarias ricas en materia orgánica.(Canet et al, 2010)

En los sitios con potencial hidrotermal existe una fuente de calor que puede ser una intrusión, diques rellenados o fracturas. También se necesita una zona de permeabilidad, para que el agua subterránea que circula por el sistema se recargue, y la energía calorífica sea transportada eficientemente hasta la superficie. Cerca de la caldera de Acoculco se encuentran las aguas termales de Chignahuapan, Puebla; las cuales, son de carácter sulfuroso, y llegan a tener temperaturas de hasta 45° C.

## **Metodología**

### Documental

Este estudio inicio con la búsqueda de artículos, incluyendo mapas, fotografías satelitales (ASTER y Landsat) sobre la zona de estudio Acoculco, así como, otros conceptos teóricos acerca de energía geotérmica, alteraciones hidrotermales, minerales característicos. Artículos de diferentes autores para utilizar técnicas de percepción remota en el software, Idrisi Taiga. El producto final de esta primer etapa es la generación de un mapa base con la localización de los minerales alterados.

### Trabajo de campo

La segunda etapa de la presente investigación, consiste en el trabajo de campo, en donde se obtuvieron muestras de suelo y roca de 5 puntos, (38 muestras totales) a las que, posteriormente, se seleccionaron para un análisis en laboratorio.

Una tercera y última etapa fue el análisis por medio de un espectrómetro localizado en el Instituto de Geofísica de la UNAM, en donde se analizaron dichas muestras obteniendo así una comparación de firmas espectrales de los diferentes minerales de alteración que se producen en los sitios con potencial hidrotermal.

# INDICE

<b>1. PERCEPCIÓN REMOTA.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Percepción remota.....</b>	<b>1</b>
1.1.1 <i>Definición.....</i>	<i>1</i>
<b>1.2 Espectro electromagnético.....</b>	<b>2</b>
1.2.1 <i>Radiación electromagnética.....</i>	<i>6</i>
<b>1.3 Interacción de la radiación electromagnética con la atmósfera.....</b>	<b>7</b>
1.3.1 <i>Dispersión Rayleigh.....</i>	<i>8</i>
1.3.2 <i>Dispersión Mie.....</i>	<i>8</i>
1.3.3 <i>Dispersión no selectiva.....</i>	<i>8</i>
1.3.4 <i>Ventanas atmosféricas.....</i>	<i>9</i>
1.3.5 <i>Corrección atmosférica.....</i>	<i>10</i>
1.3.6 <i>Firmas espectrales.....</i>	<i>10</i>
<b>1.4 Sensores remotos.....</b>	<b>11</b>
1.4.1 <i>Sensores pasivos.....</i>	<i>12</i>
1.4.2 <i>Sensores activos.....</i>	<i>12</i>
<b>1.5 Percepción remota satelital.....</b>	<b>133</b>
1.5.1 <i>Satélites meteorológicos.....</i>	<i>14</i>
1.5.2 <i>Satélites para la prospección de recursos naturales.....</i>	<i>15</i>
1.5.3 <i>RADAR satelital.....</i>	<i>17</i>
1.5.4 <i>Satélite TERRA.....</i>	<i>19</i>
<b>1.6 Características de las imágenes.....</b>	<b>20</b>
1.6.1 <i>Resolución espectral.....</i>	<i>23</i>
1.6.2 <i>Resolución espacial.....</i>	<i>23</i>
1.6.3 <i>Resolución radiométrica.....</i>	<i>23</i>
1.6.4 <i>Resolución temporal.....</i>	<i>24</i>
<b>2. MARCO FÍSICO.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1 Características físico-geográficas del área de estudio.....</b>	<b>25</b>

2.1.1 Población.....	26
2.1.2 Clima.....	26
2.1.3. Vegetación.....	27
2.1.4 Geología.....	28
<b>2.2 Vulcanismo: generalidades.....</b>	<b>29</b>
2.2.1. Tipos de materiales.....	30
2.2.2. Tipos de volcanes.....	30
<b>2.3 Calderas.....</b>	<b>32</b>
<b>2.4 Alteración hidrotermal.....</b>	<b>34</b>
2.4.1. Tipos de alteración hidrotermal.....	35
2.4.2. Productos de la alteración hidrotermal (minerales, rocas).....	37
<b>3. Técnicas del procesamiento.....</b>	<b>42</b>
<b>3.1 Clasificación supervisada.....</b>	<b>42</b>
3.1.1 Método de paralelepípedo.....	42
3.1.2 Mínima distancia.....	43
3.1.3 Máxima probabilidad.....	44
<b>3.2 Realce visual.....</b>	<b>44</b>
3.2.1 Composición a color.....	44
<b>3.3 Realce espectral.....</b>	<b>45</b>
3.3.1 Cociente de bandas.....	45
3.3.2 Análisis de Componentes Principales.....	46
<b>4. METODOLOGÍA.....</b>	<b>47</b>
<b>4.1 Clasificación supervisada.....</b>	<b>47</b>
4.1.1 Firmas espectrales.....	48
<b>4.2 Realce visual.....</b>	<b>49</b>
4.2.1 Composición a color.....	49
<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>55</b>
5.1 Método de paralelepípedo.....	55
5.1.1 Método de mínima distancia.....	56

5.1.2 Método de máxima probabilidad.....	56
<b>5.1 Realce espectral.....</b>	<b>57</b>
5.2.1 Cociente de bandas.....	57
4.3.2 Análisis de Componentes Principales.....	61
<b>5.2 Discusión.....</b>	<b>71</b>
<b>6. Bibliografía.....</b>	<b>73</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>78</b>

## 1. CAPITULO I.

### PERCEPCIÓN REMOTA

#### 1.1 Percepción remota

El hombre siempre ha querido conocer el lugar donde habita por lo cual ha desarrollado diferentes procedimientos para lograr este objetivo; uno de estos es la cartografía con diferentes fines, como son geológicos, militares, topográficos, turísticos, hidrológicos, entre otros.

Un hecho importante del desarrollo de las técnicas cartográficas es la intervención de imágenes de satélite y Sistemas de Información Geográfica (SIG) las cuales, permiten una visión del terreno a estudiar de manera remota.

##### **1.1.1 Definición**

La percepción remota se puede definir como la práctica de la obtención de información de un objeto sobre la superficie, que puede ser a través de una imagen de la superficie terrestre, adquirida mediante algún dispositivo que no está en contacto con ésta. Permite obtener imágenes de alta calidad dentro de bandas espectrales con el cubrimiento de grandes áreas del terreno, o bien, permite tener un análisis de las señales adquiridas mediante un sensor. (Goetz et al, 1985)

Este proceso involucra la interacción entre la radiación y el objetivo de interés (Figura I.1).

Los pasos básicos de la percepción remota son siete, se describen a continuación:

**1.-Fuente de energía o iluminación:** La energía electromagnética es el principio de la percepción remota, ésta genera la información necesaria entre el objeto y el sensor remoto.

**2.-Atmósfera y radiación:** La radiación proveniente de la fuente de energía que entra en contacto con la atmósfera propiciando cambios en la dirección de la misma. La energía viaja desde la fuente, hasta el objetivo y del objetivo hasta la fuente de energía, en esta interacción la energía también entra en contacto con la atmósfera.

**3.-Interacción con el objetivo:** La radiación solar entra en contacto con el objeto y de acuerdo con las propiedades del mismo, la radiación será absorbida, reflejada o dispersada.

**4.-Almacenamiento de la energía por el sensor:** Después del contacto de la radiación con el objeto, un sensor remoto registra y almacena la radiación electromagnética.

**5.-Trasmisión, recepción y procesamiento:** La energía registrada por el sensor se transmite, por lo general de forma electrónica, en una estación de recepción donde los datos son pre-procesados en una imagen.

**6.-Interpretación y análisis:** Mediante técnicas de procesamiento en percepción remota, los datos registrados en las imágenes son interpretados o analizados

**7.-Aplicaciones:** Las técnicas de percepción remota son útiles en las áreas de exploración geológica, el estudio de los recursos naturales, así como la solución de problemas medioambientales.

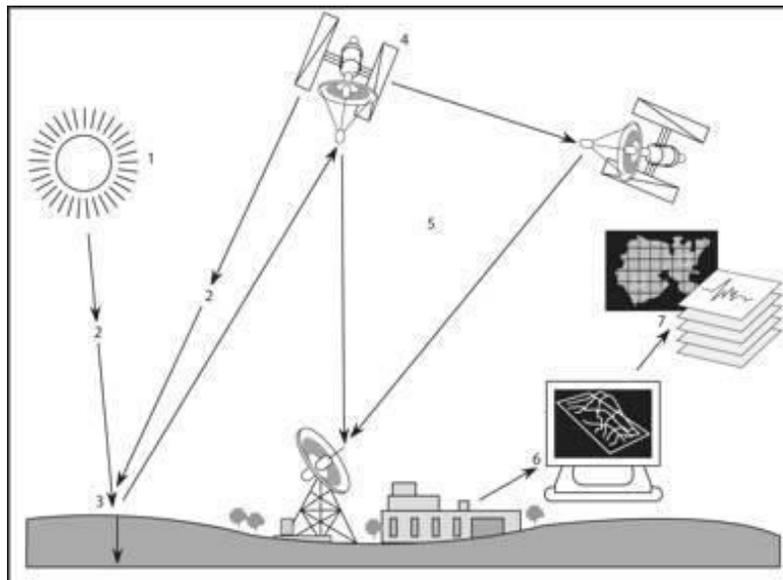


Figura I.1. Formas de teledetección: (1) Fuentes de energía o iluminación, (2) Atmósfera y radiación, (3) Interacción con el objetivo, (4) Almacenamiento de la energía por el sensor, (5) Trasmisión, recepción y procesamiento, (6) Interpretación y análisis, (7) Aplicaciones (Corrales, 2010)

## 1.2 Espectro electromagnético

La energía electromagnética que se genera en una fuente natural o artificial llega a la superficie terrestre a través de longitudes de onda. Las longitudes de onda poseen

características distintas entre sí que pueden ser observadas mediante el espectro electromagnético (Figura I.2).

El espectro electromagnético es un arreglo continuo de radiaciones, ordenado en función de la longitud de onda y/o de la frecuencia. Prácticamente y teóricamente se ha establecido que el espectro electromagnético tiene un rango que va desde angstroms hasta los kilómetros (Pérez et al., 2006). Sin embargo, es posible utilizar cualquier unidad métrica, siempre que ésta sea expresada en potencias de 10.

El arreglo de todas las longitudes de onda, desde los rayos Gamma hasta las ondas de radio se le conoce como espectro electromagnético (Aguirre, 2009).

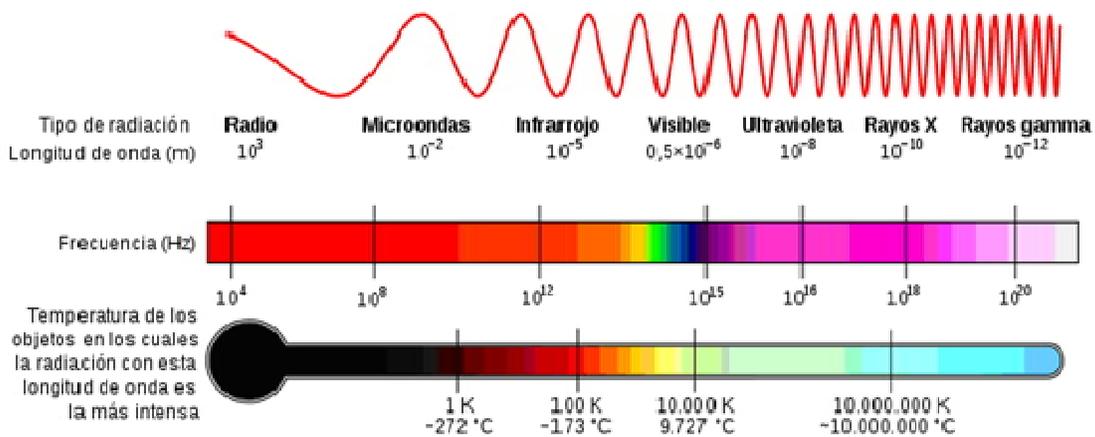


Figura I.2. Diagrama del espectro electromagnético. Se muestra el tipo, longitud de onda, la frecuencia y la temperatura de emisión de cuerpo negro, NASA <http://science.hq.nasa.gov/kids/imagers/ems/waves3.html>

Las longitudes de onda localizadas en la porción del ultravioleta, como se muestra en la Figura I.3, se encuentran en el rango de 0.03 - 0.4  $\mu\text{m}$ . Son muy cortas, por lo que algunas partículas que componen el ozono las absorben.

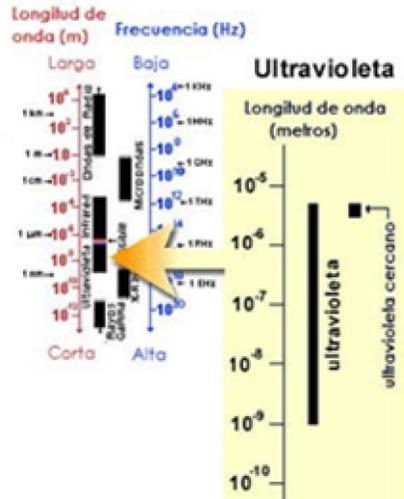


Figura I.3. Longitudes de onda ultravioleta. En la figura se muestra la localización de las ondas ultravioleta (Modificado de CCRS/CCT, 1997).

Las longitudes de onda registradas en la porción del visible ( $0.4 - 0.7 \mu\text{m}$ ) son detectables con películas, fotodetectores, y el ojo humano (Figura I.4). Dentro de esta parte del espectro suelen distinguirse tres bandas elementales, que se denominan azul ( $0.4-0.5 \mu\text{m}$ ), verde ( $0.5-0.6 \mu\text{m}$ ) y rojo ( $0.6-0.7 \mu\text{m}$ ), en razón de los colores primarios que el ojo humano percibe a esas longitudes de onda.

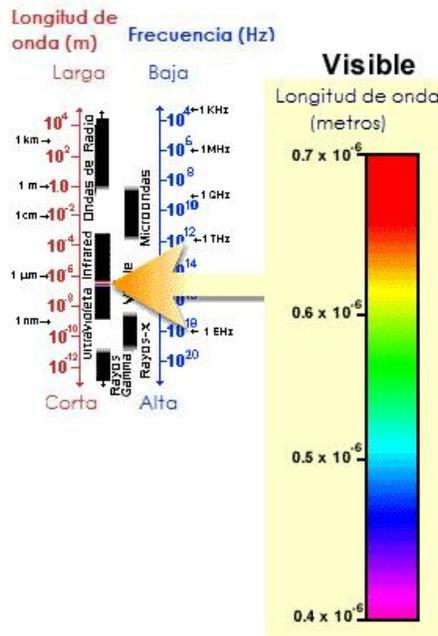


Figura I.4. Longitudes de onda registradas en la porción visible del espectro electromagnético. La porción del espectro visible abarca un rango de  $0.7 \cdot 10^{-6}$  a  $0.4 \cdot 10^{-6}$  (Modificado de CCRS/CCT, 1997).

Las longitudes de onda localizadas en la porción de microondas 1mm-1m (Figura I.5) pueden penetrar nubes y niebla. Los sensores que registran estas longitudes pueden adquirir imágenes en forma activa (con una fuente de energía) o pasiva, más adelante en este capítulo se explicaran los sensores pasivos y activos.

En esta porción del espectro se pueden localizar las ondas de radar y otros sistemas de comunicación como el UHF (Ultra High Frequency) (Pérez, 2006).

En los últimos tiempos, esta es la parte del espectro que ha tenido mayor interés para los estudios remotos. Estas son las longitudes de onda más largas utilizadas para la percepción remota.

La longitud de onda corta tiene propiedades similares al infrarrojo termal mientras que las longitudes de ondas largas son parecidas a las usadas en las emisiones de radio. (CCRS/CCT), 1997.

A la región del espectro electromagnético que se le denomina microondas, se les asignó una letra durante la segunda Guerra Mundial (CCRS/CCT, 1997).

**Bandas Ka, K y Ku:** Son bandas muy cortas, usadas en sistemas de radar y en la actualidad no son tan comunes.

**Bandas X:** Son muy usadas por militares, para la realización de mapas.

**Bandas C:** Son usadas en la búsqueda de datos aéreos (CCRS Convair\_580 y NASA) y datos espaciales (incluyendo ERS\_1-2 y RADARSAT)

**Bandas S:** Usado en el satélite ruso ALMAZ (1991-1993)

**Banda L:** Usado en el satélite estadounidense SEASAT, el japonés JERS-1 y la NASA.

**Banda P:** Es la banda que registra la onda más larga, es usada por la NASA.

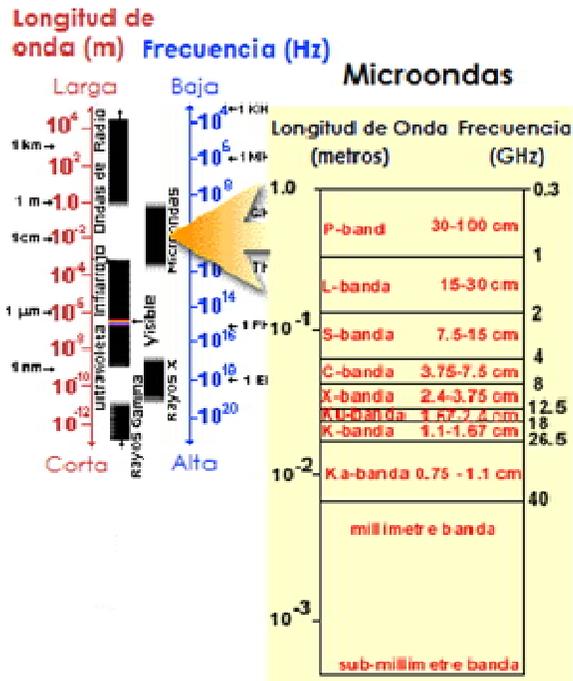


Figura I.5. Longitudes de onda registradas en la porción de microondas del espectro electromagnético, con las diferentes regiones. Modificado de CCRS/CCT, 1997

### 1.2.1 Radiación electromagnética

Para poder definir qué es una radiación electromagnética se debe tener claro qué es radiación. Es la energía emitida, transmitida y propagada en formas de ondas a través de un medio, es decir, es la forma de energía que se propaga por medio de ondas o de partículas.

La radiación electromagnética es la energía propagada a través del espacio o medios naturales en forma de una interacción que avanza entre campos eléctricos y magnéticos (Pérez, 2006).

De acuerdo con la teoría básica de las ondas, la radiación electromagnética tiene un campo eléctrico (E) que varía en magnitud en una dirección perpendicular, en el que la radiación viaja, y un campo magnético (M) orientado en ángulos perpendiculares a un campo eléctrico (Figura I.6). Ambos campos viajan a la velocidad de la luz (CCRS/CCT, 1997).

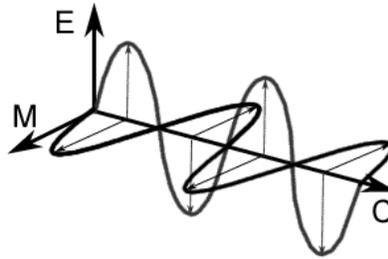


Figura I.6. Radiación electromagnética. La línea roja indica el campo eléctrico (E); la línea negra hace referencia al campo magnético (M) (CCRS/CCT, 1997)

Existen dos características de la radiación electromagnética que son importantes para el estudio en percepción remota, estas son longitud de onda y frecuencia.

La longitud de onda ( $\lambda$ ) es la distancia entre dos picos sucesivos de una onda.

La frecuencia es el número de ciclos pasando por un punto fijo en una unidad del tiempo (Figura I.7).

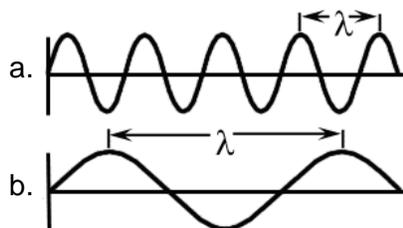


Figura I.7. Variaciones en las longitudes de onda. La línea, a. indica que entre más corta la longitud de onda, mayor será la frecuencia, por el contrario, la línea, b. muestra una longitud de onda larga y frecuencia corta (CCRS/CCT, 1997)

### 1.3 Interacción de la radiación electromagnética con la atmósfera

Antes de que la radiación sea registrada en un sensor, las longitudes de onda viajan a través de la atmósfera entrando en contacto con partículas y gases causando efectos tales como la dispersión y absorción.

La absorción es debida a que las partículas o moléculas en la atmósfera atraen la energía de varias longitudes de onda. El ozono, dióxido de carbono y vapor de agua son los tres principales elementos de la atmósfera que absorben la radiación (Gibson, 2004).

El ozono tiene mayor absorción en la radiación ultravioleta, el dióxido de carbono absorbe en el infrarrojo lejano y el vapor de agua es un importante absorbente en el infrarrojo cercano.

La dispersión ocurre cuando las partículas o moléculas de gas que hay en la atmósfera interactúan con la radiación electromagnética, redireccionando a ésta de su ruta original. La cantidad de dispersión depende de diferentes factores como la longitud de onda, la cantidad de partículas de gas, la distancia que viaja la radiación a través de la atmósfera, entre otras (CCR/CCT 1997).

En la atmósfera se han identificado tres tipos de dispersión:

### ***1.3.1 Dispersión Rayleigh***

Esta es causada por partículas muy pequeñas, de diámetro inferior a la longitud de onda, afecta a las longitudes de onda más cortas, que son mucho más pequeñas que otras (Chuvieco, 1996); esta dispersión se produce en la parte alta de la atmósfera.

### ***1.3.2 Dispersión Mie***

Tipo de dispersión atmosférica provocada por partículas similares a la longitud de la radiación. El polvo, polen, humo y vapor de agua son los principales responsables de este tipo de dispersión.

La dispersión Mie, suele ocurrir en las porciones bajas de la atmósfera donde las partículas de mayor tamaño son más abundantes y domina el cielo nublado (CCRS/CCT, 1997).

### ***1.3.3 Dispersión no selectiva***

Esta afecta por igual a diversas longitudes de onda, ocurre cuando las partículas son mayores a la onda de longitud de radiación.

Las gotas de agua y las grandes partículas de polvo pueden causar la dispersión no selectiva. Su nombre viene del hecho que todas las longitudes de onda, son dispersadas por igual.

Esta dispersión es la responsable que el ojo humano mire las nubes y niebla de color blanco, ya que las longitudes de onda azul, verde y roja son dispersadas de igual manera.

#### **1.3.4 Ventanas atmosféricas**

Las regiones donde la radiación electromagnética pasa sin interactuar significativamente con los elementos de la atmósfera se conocen como “ventanas atmosféricas” (Aguirre, 2009).

Las ventanas atmosféricas son idóneas para realizar el registro de información útil en las técnicas de percepción remota, por lo que el diseño de los sensores espaciales tiende a ajustarse a esos rangos, evitando interferencias extrañas al objetivo que pretende estudiar, excepto la presencia de nubes, que absorben todo el espectro óptico.

Las principales ventanas atmosféricas son las siguientes:

- Espectro visible e infrarrojo cercano, situada entre 0.3 y 1.35  $\mu\text{m}$ .
- En el infrarrojo medio se encuentran cuatro: de 1.5 a 1.8  $\mu\text{m}$ , 2.0 a 2.4  $\mu\text{m}$ , 2.9 a 4.2  $\mu\text{m}$  y 4.5 a 5.5  $\mu\text{m}$ .
- Infrarrojo térmico, entre 8 y 14  $\mu\text{m}$ .
- Microondas por encima de los 20 mm, en donde la atmósfera es prácticamente transparente (Chuvienco, 1996).

En la percepción remota, la atmósfera es un medio perturbador, la cual impide la correcta medición de los elementos de la superficie en una gran parte del espectro electromagnético. Debido a lo anterior, una parte importante del procesamiento de las imágenes es la corrección atmosférica.

### **1.3.5. Corrección atmosférica**

La corrección atmosférica sirve para intentar eliminar el efecto de la dispersión de la radiación electromagnética originada por parte de los gases y partículas en suspensión de la atmósfera (Chuvieco, 1996).

Los principales causantes de esta dispersión son:

- Oxígeno (O<sub>2</sub>), que filtra las radiaciones ultravioletas por debajo de 0.1 μm, así como pequeños sectores en el infrarrojo térmico y las microondas.
- Ozono (O<sub>3</sub>), responsable de la eliminación de la energía ultravioleta inferior a 0.3 μm, así como un sector de las microondas (en torno a 27 mm).
- Vapor de agua, con una fuerte absorción en torno a 6 mm y otras menores 0.6 y 2 μm.
- Anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>), que absorbe en el infrarrojo térmico (15 μm), con importantes efectos en el infrarrojo medio entre 2.5 y 4.5 μm.

### **1.3.6. Firmas espectrales**

El concepto de firma espectral ha sido utilizado para referirse a la respuesta espectral de un rasgo que es observado sobre un rango de longitud de onda (Campbell, 2002).

El concepto fundamental de firma espectral expresa que los materiales tienen respuestas espectrales únicas que pueden permitir la identificación (con solo información espectral) de afloramientos individuales, suelos, vegetación, entre otras, desde las imágenes de satélite.

Los estudios enfocados al mapeo de alguna zona utilizan la aplicación de las características espectrales de las rocas y minerales con el objetivo de facilitar el trabajo de identificación de rasgos sobre la imagen de satélite.

Hay diferentes maneras de obtener firmas espectrales de minerales y rocas:

- Análisis directos sobre la imagen de satélite.
- Análisis de las rocas por medio de espectrómetros.

- Mediante análisis en el laboratorio, que da origen a bibliotecas espectrales (Vincent, 1997; Goetz et al, 1985).

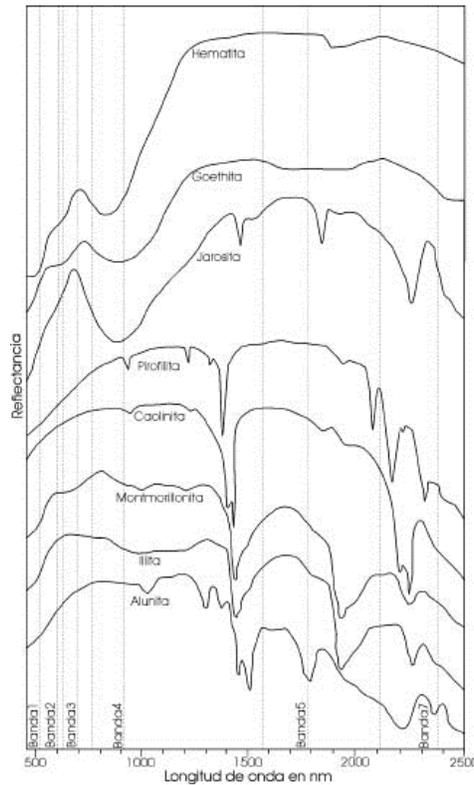


Figura 1.8. Algunos ejemplos de firmas espectrales características de materiales de sistemas hidrotermales (Tommaso, 2005). En la imagen se muestran las firmas espectrales características de los hidróxilos (alunita y illita, montmorillonita) y materiales cuya composición es susceptible de ser oxidada (pirrotita, goethita, jarosita y hematita). Con líneas verticales punteadas se muestra la localización de las bandas Landsat. Se puede observar que las bandas 3,4, y 5 muestran altas reflectancias para el caso de los hidróxilos; mientras que los picos más bajos se encuentran cercanos a la banda 7. En tanto que, para los materiales susceptibles de ser oxidados, se presentan altas reflectancias en la banda 3, o cercanos a la banda 3; mientras que las menores reflectancias las registra la banda 1.

## 1.4 Sensores remotos

Permiten capturar información de los objetos sin tener contacto directo con ellos, el uso de estos sensores ha jugado un papel muy importante en la construcción de mapas, planos, interpretación de recursos, planificación territorial entre otros.

### **1.4.1. Sensores pasivos**

Estos sensores sólo pueden detectar la energía electromagnética cuando esta proceda de una energía natural como son los rayos solares (Figura I.9), es decir, sólo se puede recoger información cuando el Sol este iluminando la superficie terrestre. La energía naturalmente emitida (infrarrojo termal) puede ser detectada de día o de noche, siempre y cuando la cantidad de energía sea la suficiente para poder ser detectada.

Un ejemplo puede ser la cámara fotográfica, que es un medio utilizado para la percepción remota, especialmente desde plataformas aéreas (Chuvienco, 1996).

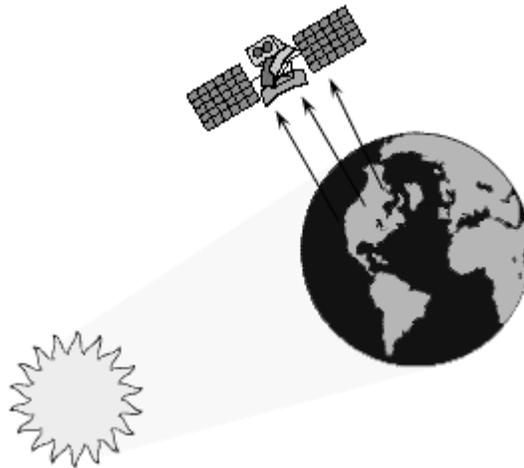


Figura I.9. Sensores pasivos funcionan con energía natural por ejemplo el sol, CCRS/CCT 1997.

### **1.4.2. Sensores activos**

Los sensores activos, tienen su propia fuente de energía para la iluminación. El sensor emite una radiación que va directamente al objetivo. Es detectada y medida por el sensor (Figura I.10). Los sensores activos generan una señal, esta rebota en un objeto y mide las características de la señal reflejada; en este tipo de sensores no afecta la presencia de nubes (Martínez, 2005).

Los sensores activos pueden utilizarse para examinar las longitudes de onda que no son emitidas por el Sol, como las microondas, también para un mejor control de la iluminación del objeto que se quiera. Sin embargo, estos sensores requieren de una cantidad bastante grande de energía para iluminar adecuadamente los objetivos.

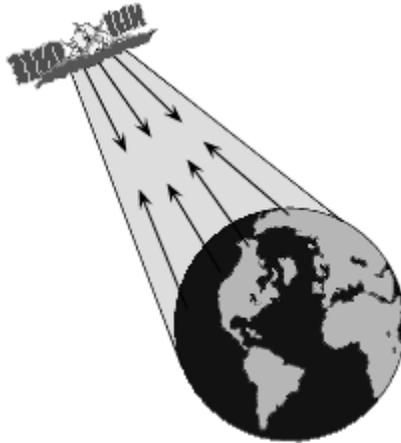


Figura I.10. Sensores activos funcionan con su propia fuente de energía, CCRS/CCT 1997.

### **1.5 Percepción remota satelital**

A continuación se describen las principales características de los satélites que han sido puestos en órbita.

Satélites geosíncronos o geoestacionarios.

Se sitúan sobre el ecuador en una órbita a 36 000 km de la Tierra. Permanecen siempre en la vertical de un punto determinado acompañando a la Tierra en su movimiento de rotación. Es el caso de Meteosat, situado sobre la perpendicular entre el meridiano 0° y el ecuador, desde el que se obtienen imágenes de la parte de la Tierra visible desde el punto en que se encuentra.

Las imágenes que proporcionan estos satélites tienen una frecuencia de 30 minutos y su resolución espacial va de 8 a 1 Km. De este tipo de satélites son los estadounidenses GOES que cubren la República Mexicana (<http://smn.cna.gob.mx/>)

Los satélites heliosíncronos se desplazan en órbitas generalmente circulares y polares (el plano de la órbita es paralelo al eje de rotación de la Tierra) de modo que aprovechando el movimiento de rotación terrestre, puede captar imágenes de diferentes sitios cada vez que pase por el mismo punto de la órbita.

Estas órbitas sólo son posibles entre 300 y 1500 km de altura. La órbita se diseña de forma que el satélite pase siempre sobre el mismo punto a la misma hora local.

## ***Características de los satélites***

### ***1.5.1. Satélites meteorológicos***

Durante los años 60s y 70s se fue desarrollando una red mundial de satélites meteorológicos geoestacionarios que proporcionan cobertura global y continua (cada media hora) del planeta en una franja que va de 70° norte a 70° sur. Se trata de 5 satélites en órbita ecuatorial que cubren, una extensión de 70° en longitud cada uno (Figura I.11), de los cinco satélites, tres cubren la República Mexicana.

El satélite Meteosat cubre Europa, África y el Atlántico oriental; fue lanzado por primera vez en 1977 y en 1997 se lanzó el Meteosat-7. El responsable de este satélite es la organización intergubernamental EUMETSAT (European Organization for Meteorological Satellite), cuentan con el sensor de barrido MVIRI (Meteosat Visible and Infrared Imagery) con 3 canales.

El futuro del programa Meteosat pasó por la introducción de un nuevo sensor, el SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager) que proporciona imágenes en 12 canales cada 15 minutos.

La resolución espacial pasó de 5 a 3 km en el infrarrojo y de 1 km en una de las bandas del visible. Se espera que resulte de gran utilidad para el seguimiento y alerta temprana de acontecimientos meteorológicos extremos.

TIROS-NOAA. Cuenta con dos satélites en órbita polar complementaria de manera que, al pasar cada uno por la vertical de un mismo punto una vez al día, obtienen una imagen cada 12 horas. El más utilizado de los sensores que llevan es el AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) con una anchura de visión de 3 000 km y una resolución de 1.1 km en el nadir que alcanza 2.5 x 7 km en los extremos de la imagen debido al ángulo de observación y a la curvatura terrestre.

Existen diferentes bandas de acuerdo a la longitud de onda del espectro electromagnético que detecten los sensores. En lo referente a meteorología existen dos intervalos principales de estudio, estos son: la visible y la infrarroja. Cada una de estas tiene una aplicación determinada. La más utilizada por los previsores de tiempo es la infrarroja (<http://smn.cna.gob.mx/>)

La aplicación básica de estos satélites es la observación de las condiciones atmosféricas, para poder predecir el estado del tiempo, a partir de los datos dados por estos satélites se puede saber cuál es la cobertura y tipo de nubes, el contenido de vapor de agua en la atmósfera, la precipitación acumulada, el viento superficial, la estimación de fenómenos catastróficos como huracanes, entre otros.

La meteorología desde satélites se destaca actualmente como la principal aplicación de la percepción remota (Carleton, 1991).

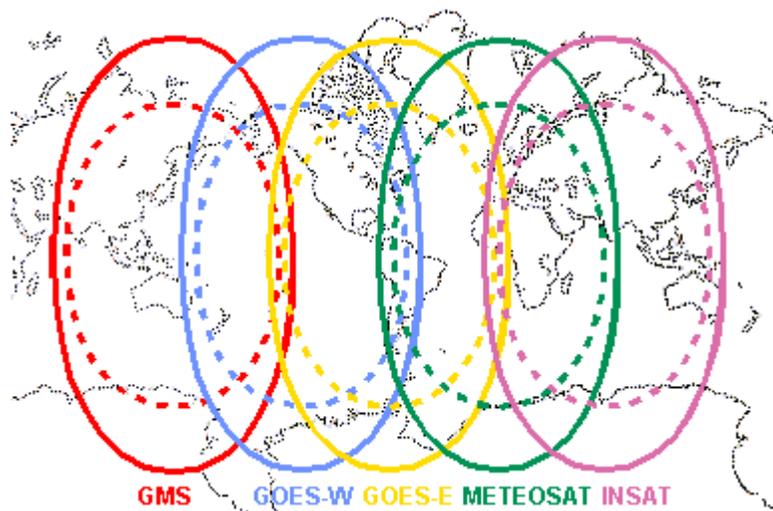


Figura I.11. Satélites meteorológicos en órbita geosíncrona. Los distintos colores en los óvalos muestran los distintos satélites que se encuentran en operación (Kidder, 1995).

### **1.5.2. Satélites para la prospección de recursos naturales**

Son satélites de órbita polar, con mayor resolución espacial y que fueron diseñados para la observación de la Tierra y la evaluación de sus recursos naturales. El más

conocido de ellos es el programa Landsat que se inició en 1972 con el lanzamiento del Landsat 1.

Hasta la fecha se han lanzado siete sensores. Los satélites Landsat disponen de dos sensores, MSS (Multispectral scanner) y TM (Thematic Mapper) con mayor resolución espacial, espectral y radiométrica (79 m, 4 bandas y 6 bits en MSS y 30 m, 7 bandas y 8 bits en TM).

Landsat-5 fue lanzado en 1984, es el que más tiempo lleva en órbita y significó, junto con Landsat-4 que estuvo en operación, un salto cualitativo de gran importancia. Landsat-5 combina el sensor MSS (MultispectralScanner) de los satélites más antiguos con un nuevo sensor el TM (Thematic Mapper) con capacidades más desarrolladas. La tabla 1 muestra las características principales de los sensores TM y MSS.

Tabla 1. Canales de los sensores MSS y TM de Landsat-5 (Campbell, 2002)

<b>Sensor</b>	<b>Banda</b>	<b>Longitud</b>	<b>□</b>
MSS	4	0.5-0.6 □	82 m
MSS	5	0.6-0.7 □	82 m
MSS	6	0.7-0.8 □	82 m
MSS	7	0.8-1.1 □	82 m
TM	1	0.45-0.52 □	30 m
TM	2	0.52-0.6 □	30 m
TM	3	0.63-0.69 □	30 m
TM	4	0.76-0.9 □	30 m
TM	5	1.55-1.75 □	30 m
TM	6	10.4 -12.5 □	120 m
TM	7	2.08-2.35 □	30

El satélite Landsat-7 incorpora el sensor ETM (Enhanced Thematic Mapper) que añade a las bandas ya disponibles en el TM un canal pancromático (0.5-0.9  $\mu\text{m}$ ) con resolución espacial de 15 metros. Su órbita se sitúa a 705 Km de altitud, pasa por los mismos lugares cada 16 días.

Las imágenes del sistema Landsat, por su tradición en el levantamiento de información, por su cobertura periódica, resolución espacial y multiespectral representan una herramienta valiosa para la realización de estudios de la dinámica de los recursos

naturales, programas de seguimiento global, seguimiento de bosques y planeación de desarrollo a nivel regional.

El proyecto Spot se inicia en 1986 y hasta la actualidad se han lanzado 5 satélites (Spot-5 fue lanzado en 2002). Los satélites se sitúan en órbita helio-sincrónica casi polar, repitiendo órbita cada 26 días. Los satélites 1, 2 y 3 estaban dotados del sensor HRV (High Resolution Visible) que proporcionaba imágenes en el visible e infrarrojo cercano. Su principal ventaja respecto a Landsat es su mayor resolución espacial al introducir por primera vez un radiómetro de empuje. Son imágenes de 60 Km de ancho y 10-20 m de resolución.

Otra de las ventajas del HRV es su capacidad para reorientar su campo de observación desde la Tierra y la resolución temporal pasa de 26 días a 2 o 3 dependiendo de la latitud, esta flexibilidad hace que las imágenes deban encargarse por adelantado. En el satélite Spot-4 se modificaron los sensores introduciéndose el HRVIR que añade a los canales del HRV un infrarrojo (1.58-1.78  $\mu\text{m}$ ) eliminando el pancromático.

Se añade también el sensor VEGETATION orientado al seguimiento diario de la cobertura vegetal a escala regional o planetaria (la anchura de imagen es de 2 250 km y la resolución espacial de 1 km (Aguirre, 2009).

### **1.5.3. RADAR satelital**

Las imágenes de radar son capturadas por sistemas satelitales activos, es decir, el satélite emite un haz de energía y captura la porción de ésta que es reflejada. Por sus características estas imágenes son insensibles a las variaciones atmosféricas, debido a su elevada longitud de onda (muy superior al tamaño de las gotas de agua en la atmósfera), no se ven afectadas por la falta de iluminación solar y capturan información de la superficie incluso con presencia de nubes. La resolución espacial de las imágenes de radar es variable y su rango de captura no se mide en longitudes de onda del espectro electromagnético sino en bandas de frecuencias.

Sin embargo existen sistemas de microondas pasivos que capturan la emisión de cuerpos de alrededor de 20 °C.

Estos son algunos ángulos de las imágenes que los radares pueden obtener:

Ángulo de depresión, es el que forma la dirección de observación con la horizontal. Los valores varían en función de los objetivos, en estudios oceánicos es menor que en trabajos sobre la superficie continental.

Ángulo de incidencia, es el que forma la dirección de observación con la perpendicular al objetivo, varía dentro de una misma imagen.

Ángulo de Polarización u orientación (horizontal o vertical) de la onda emitida por el sensor; la onda de vuelta también puede recibirse con polarización horizontal o vertical. De este modo aparecen cuatro posibles combinaciones (HH, HV, VH, VV) que pueden utilizarse como si fueran cuatro bandas ya que contienen diferente tipo de información (Figura I.12).

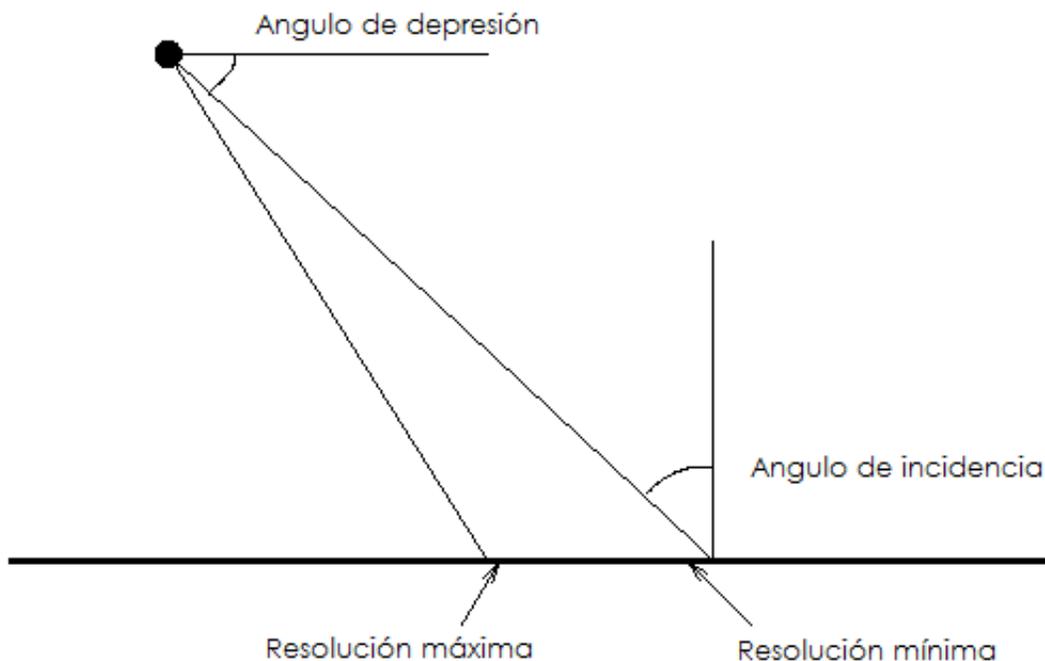


Figura I.12. Ángulos principales de la observación de RADAR. Las medidas angulares acotan las dimensiones de las imágenes adquiridas por los sensores RADAR (Chuvieco, 1996).

#### 1.5.4 Satélite TERRA

TERRA (EOS AM-1) es un satélite multinacional de la NASA de investigación científica puesto en órbita en diciembre de 1999 y forma parte de una iniciativa de los gobiernos de Estados Unidos y Japón.

Funciona en sincronía con la órbita del sol alrededor de la Tierra, las imágenes que este satélite proporciona, se caracterizan por su amplio rango espectral, por lo que se denomina imagen hiperespectral.

Terra lleva una carga útil de cinco sensores remotos destinados a supervisar el estado de la Tierra, del medio ambiente y los cambios climáticos.

ASTER (Espacial Avanzado de Emisiones Térmicas y Reflexión Radiométrica)

CERES (Nubes y la Tierra, Energía Radiante del Sistema)

MISR (Multiángulo de Imágenes Espectroradiométricas.)

MODIS (Resolución Moderada de Imágenes Espectroradiométricas)

OPITT (Mediciones de la contaminación en la troposfera)

**ASTER** presenta una órbita helio-sincrónica a una distancia de 705 kilómetros, con un ciclo de repetición de 16 días, un ancho de barrido de 60 kilómetros y una distancia entre órbitas de 172 km. ASTER está compuesto por 3 subsistemas, VNIR, SWIR y TIR; cada uno de cuales presenta características particulares tales como 3 bandas en la región espectral del visible e infrarrojo cercano (VNIR) con una resolución espacial de 15 metros; 6 bandas en la región espectral del infrarrojo de onda corta (SWIR) con una resolución espacial de 30 metros y 5 bandas en el infrarrojo térmico con una resolución espacial de 90 metros (<http://gds.aster.ersdac.jspacesystems.or.jp>). Como se muestra en la tabla 2. ASTER también presenta una región espectral de la banda 3B, que se utiliza para hacer Modelos Digitales del Terreno (MDT) y hacer realces en tercera dimensión.

Las características de las imágenes ASTER las hacen adecuadas para estudios de amplia diversidad a una escala semidetallada de trabajo. Un ejemplo de aplicación en las imágenes ASTER son los mapas de temperatura empleando un amplio rango

espectral y datos de elevación a partir de las bandas 3N y 3B que permiten realizar modelos digitales de terreno (MDT) (INEGI, 2007).

Tabla 2. Características de las imágenes ASTER (ASTER, <http://asterweb.jpl.nasa.gov/characteristics.asp>).

Rango espectral	Banda	Longitud $\mu\text{m}$	Resolución espacial
VNIR	1	0.52-0.60	15 m
	2	0.63-0.69	
	3N	0.78-0.86	
	3B	0.78-0.86	
SWIR	4	1.600-1.700	30 m
	5	2.145 -2.185	
	6	2.185-2.225	
	7	2.235-2.285	
	8	2.295-2.365	
	9	2.360-2.430	
TIR	10	8.125-8.475	90 m
	11	8.475 - 8.825	
	12	8.925 - 9.275	
	13	10.25 - 10.95	
	14	10.95 - 11.65	

## 1.6 Características de las imágenes

Es necesario definir y entender algunos términos fundamentales y conceptos asociados con las imágenes de los sensores remotos.

La energía electromagnética puede ser detectada fotográfica o electrónicamente. El proceso fotográfico utiliza reacciones químicas en la superficie de la película sensible a la luz para detectar variaciones de registro de energía (CCRS/CCT, 1997).

Es importante distinguir entre el término imagen y fotografía. Una imagen se refiere a cualquier representación pictórica, independientemente de las longitudes de onda o dispositivo remoto de detección que se haya utilizado para localizar y registrar la energía electromagnética. Una fotografía se refiere específicamente a las imágenes que se han detectado, así como grabado en la película fotográfica (Figura I.13).



Figura I.13. Fotografía blanco y negro de la ciudad de Ottawa, Canadá tomada en el espectro visible (CCRS/CCT 1997).

Las fotografías normalmente se registran en la onda de longitud de 0,3 micras y 0,9 micras (el visible y el infrarrojo). Basado en estas definiciones, se puede decir que todas las fotografías son imágenes, pero no todas las imágenes son fotografías.

Una fotografía también podría estar en formato digital, esta se subdivide en pequeñas imágenes de igual tamaño y área, formando imágenes llamados píxeles, cada una representa el brillo de cada área con un valor numérico o digital (Figura I.14).

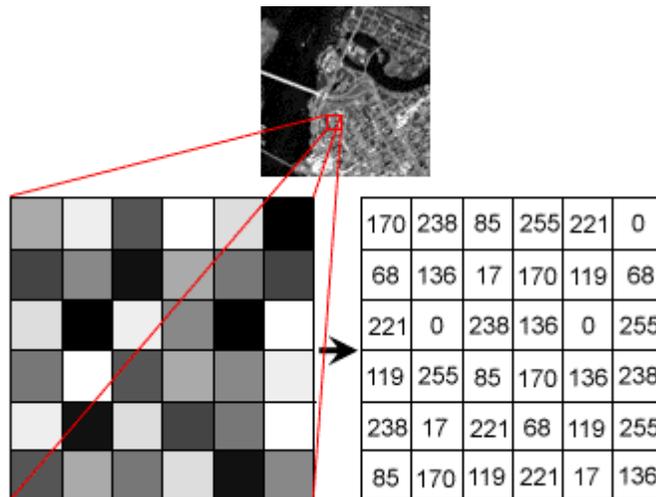


Figura I.14. La fotografía fue escaneada y se subdivide en píxeles con cada píxel asignado un número digital que representa su brillo relativo, (CCRS/CCT 1997).

La pantalla de la computadora muestra un valor digital diferente para cada nivel de brillo. Los sensores registran la energía electromagnética y esta se registra vía digital como una matriz de números. Estas dos formas diferentes de representación y visualización de datos de sensores remotos, ya sea gráficamente o en formato digital son intercambiables, ya que transmiten la misma información (aunque algunos detalles se pueden perder al convertirlos de imagen a fotografía y viceversa).

El ser humano ve colores, porque el sentido de la vista detecta el rango visible, el cerebro procesa la información en colores independientes. Algo parecido funciona con los sensores. La información procedente de una gama de longitud de onda se recoge y se almacena en un canal, también conocido como banda. Se puede combinar y visualizar los canales de información digital utilizando los tres colores primarios (azul, verde y rojo). Los datos de cada canal es representado como uno de los colores primarios y, en función de la relación brillo (es decir, el valor digital) de cada píxel en cada canal, los colores primarios se combinan en proporciones diferentes para representar diferentes colores (Figura I.15).

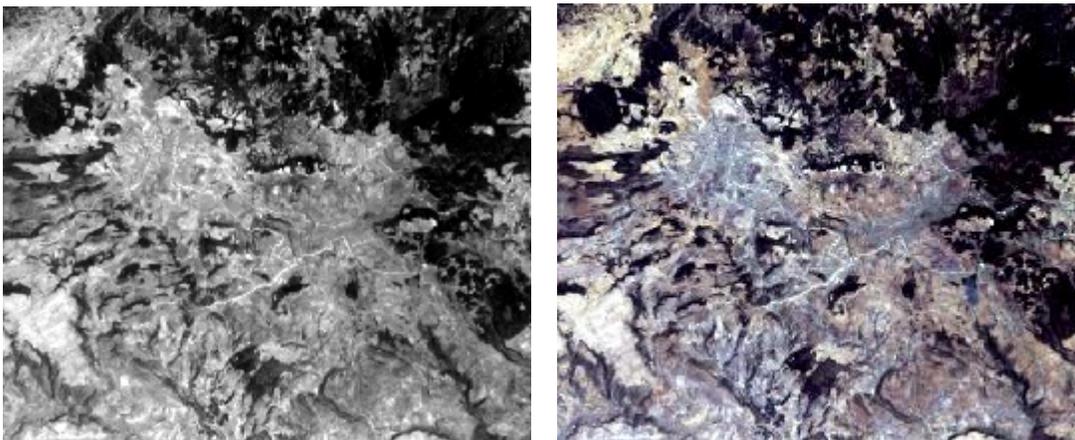


Figura I.15. Imágenes ASTER a la izquierda en blanco y negro, derecha combinación de colores primarios (rojo, verde y azul)

Cuando se utiliza la combinación de colores primarios para mostrar el rango de las longitudes de onda, por tanto, se están mostrando la combinación de tres bandas en los colores primarios.

### **1.6.1. Resolución espectral**

Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor (Chuvienco, 1996). Entre mayor sea el número de bandas mayor será la resolución espectral, los sensores óptico-electrónicos ofrecen un mayor rango de bandas.

### **1.6.2. Resolución espacial**

Se define como el objeto más pequeño que puede ser definido en la imagen, el cual depende de la longitud focal y la altura del satélite sobre la superficie. Esta distancia corresponde al tamaño de la mínima unidad de información incluida en la imagen que se denomina píxel (Chuvienco 1996), en donde el tamaño del píxel será el nivel de detalle que tenga la imagen, por lo que esta tiene relación a la escala en la que se va a trabajar (Figura I.16).

50		80
10	20	60
45	75	

Figura I.16. Resolución espacial. El tamaño del píxel da el nivel de detalle (Chuvienco 1996).

### **1.6.3. Resolución radiométrica**

Es la capacidad del sensor para detectar variaciones en la radiación espectral que se recibe y se expresa en el número de bits, es decir, se refiere a las intensidades y a los cambios de las mismas que se van a medir (Slapak, 1998).

Al igual que los otros tipos de resoluciones, cuanto mayor sea la precisión radiométrica, tanto mejor podrá interpretarse la imagen.

#### ***1.6.4. Resolución temporal***

Este concepto alude a la frecuencia de cobertura que proporciona el sensor (Chuvieco 1996), es decir, al intervalo de tiempo con la que el satélite adquiere imágenes de la misma porción de la superficie de la Tierra.

Esta resolución varía en función de cada sensor ya que esta dependerá del objetivo fijado. Los sensores meteorológicos ofrecen una información en periodos más cortos, mientras que los satélites de recursos naturales tienen una resolución que va entre los 16 y 18 días en el caso de los Landsat (Pérez, 2006).

## 2. CAPÍTULO II

### MARCO FÍSICO

#### 2.1 Características físico-geográficas del área de estudio

La Caldera de Aocolco se localiza en los límites de los estados de Hidalgo y Puebla, en el sector oriental del Eje Neovolcánico Transmexicano (ENT), y consiste en una estructura volcánica de colapso, de unos 18 km de diámetro, formada hace 2.6 y 3 millones de años (López et al, 2009).

La caldera de Aocolco alberga el sistema hidrotermal del mismo nombre, localizado a 130 km al noroeste de la Ciudad de México (Figura II.1).

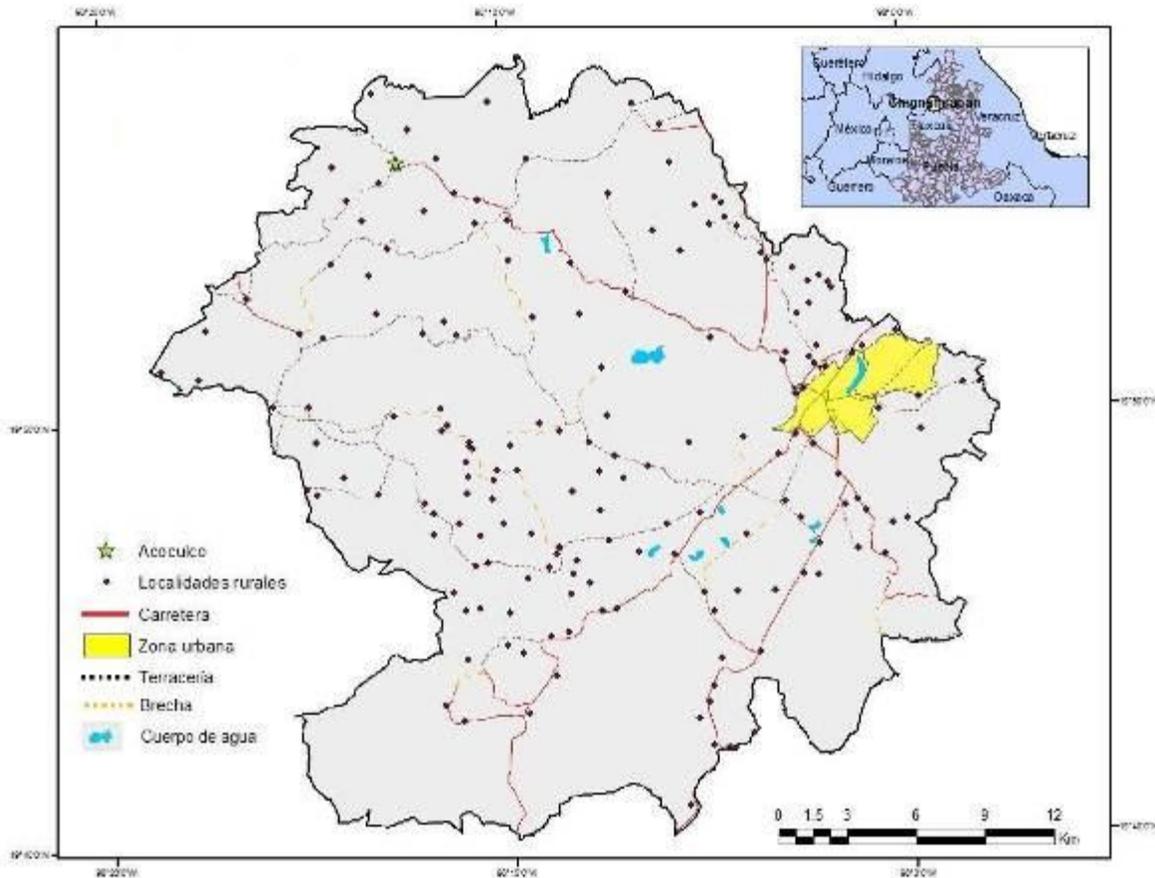


Figura II.1. Mapa de Localidades del municipio e Chignahuapan, Puebla, e infraestructura de transporte. El mapa muestra que la zona urbana se encuentra en la porción oriente del municipio. Modificado de INEGI, 2000.

### 2.1.1 Población

La localidad de Acozulco pertenece al municipio de Chignahuapan; según INEGI en el censo de población del 2000 registró una población de 1,735 habitantes de los cuales 891 es de sexo masculino y 844 femenino, (Figura II.2) cuenta con 840 viviendas (INEGI, 2000).



Relieve vista imagen de Acozulco

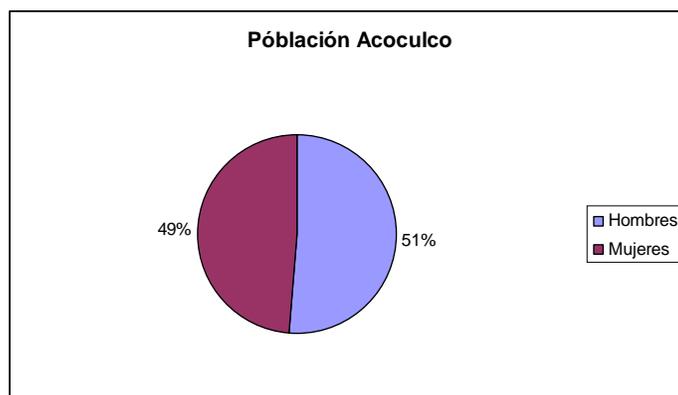


Figura II.2. Distribución de la población por sexos en Acozulco, Chignahuapan, Puebla.

### 2.1.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Enriqueta García en 1998, el clima de la región es templado subhúmedo con lluvias en verano; la temperatura media anual oscila entre

12°C y 18°C, con la temperatura del mes más frío (enero) entre -3°C y -1°C (Figura II.3).

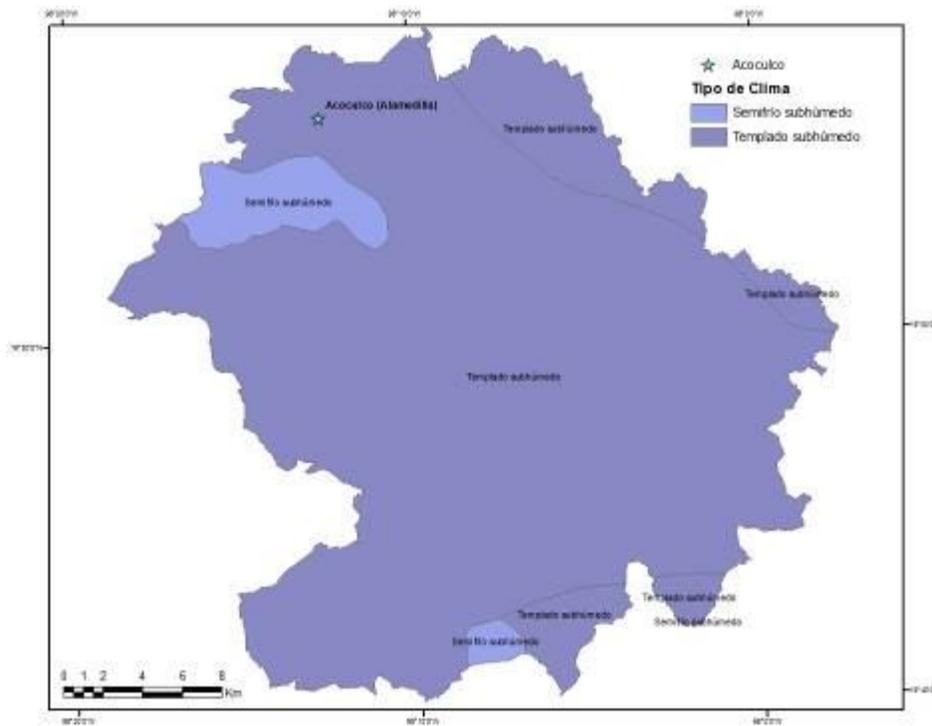


Figura II.3. Mapa de Climas en el municipio de Chignahuapan. Los tonos claros indican los climas más fríos del área, mientras que los tonos más oscuros (los que cubren a casi todo el estado) representan a los climas templados. INEGI, 2000.

### 2.1.3. Vegetación

El área de estudio cuenta con bosques de coníferas, principalmente de pinos, asociaciones boscosas de pino-encino y oyamel asociados en ocasiones a vegetación secundaria arbustiva. También se encuentran otras especies tales como ocote, trompillo, pino de patula, pino de lacio, aile, madroño, encino, tesimalillo, jarilla, pino chino, laurelillo, etc. La vegetación se encuentra dispersa por todo el territorio, aunque destacan por su extensión los bosques localizados en el conjunto montañosos del cerro las Tablas y en la Sierra Norte de Puebla, la cual, forma parte de la Sierra Madre Oriental (Enciclopedia de municipios, 2012) (Figura II.4 ).

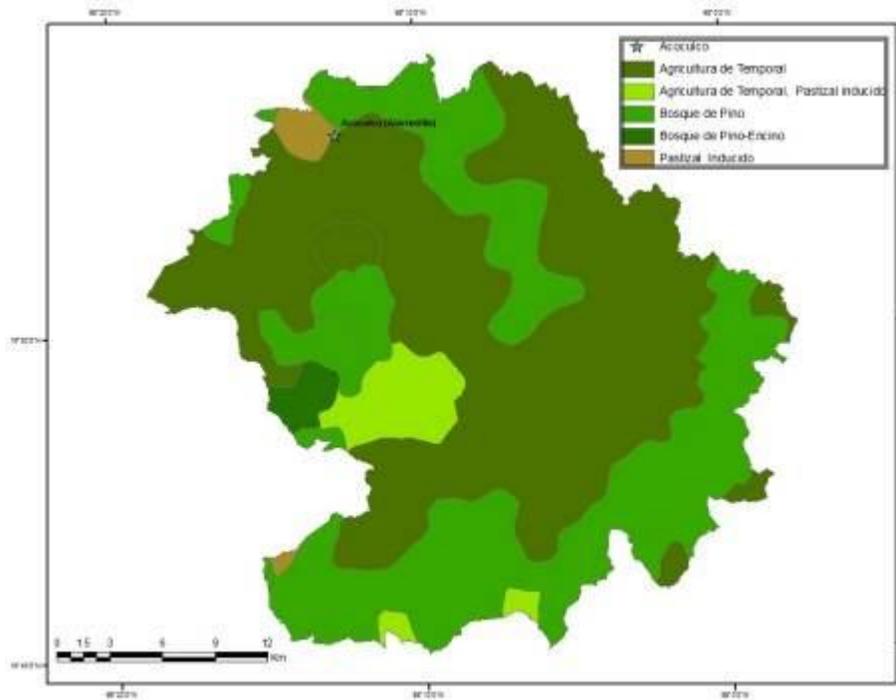


Figura II.4. Mapa de vegetación y suelo agrícola del municipio de Chignahuapan, Puebla. El predominio de vegetación es la agricultura de temporal, mientras que el bosque de pino encino abarca sólo una pequeña porción al occidente del municipio (INEGI, 2000)

### 2.1.4 Geología

El área de Acoculco se caracteriza por una secuencia de ignimbritas y lavas dacíticas a riolíticas, de hasta 900 m de espesor, sobreyaciendo a un basamento jurásico-cretácico constituido por series sedimentarias ricas en materia orgánica (Figura II.5 ) (Canet et al., 2010).

Forma parte de ENT, provincia que se extiende desde Nayarit en el oeste, hasta Veracruz en el este y que constituye un arco volcánico continental relacionado con la subducción de las Placas de Cocos y Rivera bajo la placa de Norteamérica, a lo largo de la trinchera Mesoamericana (Molnar et al, 1969).

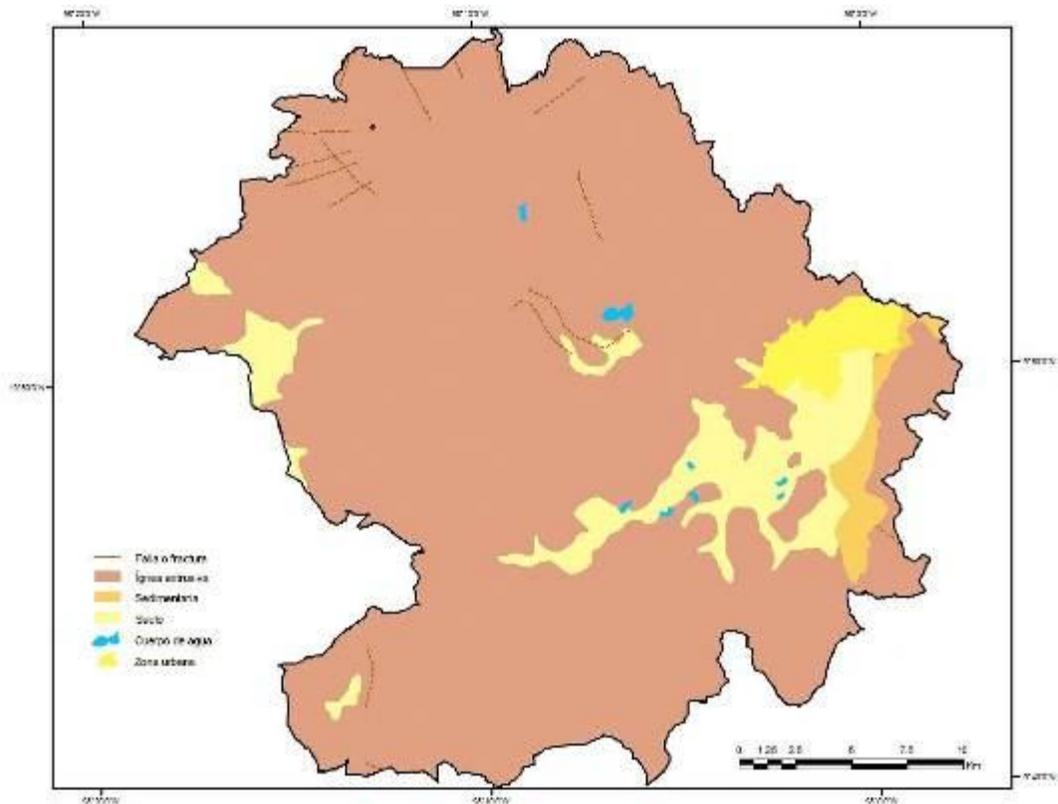


Figura II.5. Mapa geológico simplificado de Chignahuapan, Puebla. La mayor parte del municipio está conformado por roca ígnea extrusiva. INEGI, 2009.

## 2.2 Vulcanismo: generalidades

El vulcanismo se produce cuando el material fundido del interior de la Tierra es extruido a la superficie a través de grietas, fisuras u orificios.

A este material que sale se lo denomina lava, por lo general es diverso tanto en elementos como en minerales, además de incluir gases que se desprenden en forma tranquila o violenta. Una propiedad importante de la lava es su viscosidad, la cual aumenta con el contenido de sílice. El enfriamiento y solidificación pueden producirse lo mismo en el interior de la Tierra, antes de alcanzar la superficie, que al derramarse en ésta, o después de haber escurrido más de 20 km (Lugo, 1996).

### **2.2.1. Tipos de materiales**

El material depende de la temperatura por ejemplo, el material básico, se caracteriza por tener una temperatura que va de 1000 a 1200°C, aproximadamente.

Este material es bajo en contenido de sílice, por lo cual tiene una mayor fluidez, y en consecuencia, el desprendimiento de gases suele ser más rápido, origina erupciones que no son explosivas. Por el contrario, dan origen a erupciones donde predomina la fracción líquida o lava. (Williams et al, 1979)

Por su parte, el material ácido tiene temperaturas que van a los 600°C aproximadamente, estos son ricos en sílice, contrario de los materiales básicos, sus erupciones suelen ser violentas, con gran desprendimiento de gases y piroclastos.

Para el área de estudio, el tipo de material que se presenta es variado, suele haber rocas basálticas al noroeste y sureste y en la porción central predominan las riolitas y dacitas (Canet et al., 2010)

### **2.2.2. Tipos de volcanes**

Como se mencionó anteriormente, los volcanes pueden clasificarse de acuerdo con las características de sus productos volcánicos, o bien conforme al tipo de erupciones que presentan.

Es importante mencionar que el vulcanismo es la manifestación superficial del magmatismo, por lo que el vulcanismo es el fenómeno de la eyección de material fundido de capas internas de la Tierra, que es llevado a la superficie y esa expulsión de lava puede darse en tres formas (Lugo, 1996):

**Escurrimiento:** cuando la lava se derrama del volcán dando origen a las coladas de lava.

**Lluvias de piroclastos:** resultan de la lava incandescente que asciende hacia la superficie y es arrojada con una gran fuerza por los gases que forman parte de la lava. En el aire se disgregan y enfrían, precipitándose como partículas de diversos tamaños.

**Flujos de piroclastos:** son masas de material lávico que es arrojado también desde el cráter de un volcán, en grandes cantidades, altas temperaturas y contenido gaseoso, pero desplazándose a gran velocidad por las laderas. Se depositan en grandes extensiones, e incluso a distancias de más de 20 km.

A continuación se describen los tipos de volcanes que de acuerdo a sus características principales pudieron haber originado calderas, (Lugo, 1996; Pedraza, 1996):

**Estromboliano:** erupciones explosivas discontinuas, el tipo de magma es parcialmente ácido y básico, la actividad explosiva va de débil a violenta, algunas estructuras formadas alrededor son conos de escoria.

**Vulcaniano:** erupciones explosivas violentas llegan a formar estructuras de conos de ceniza y cráteres de explosión.

**Peleano:** formación de nubes ardientes, su actividad explosiva es muy violenta, llegan a formar domos y conos de ceniza (II.6).

**Pliniano:** expulsión de grandes cantidades de material volcánico, en grandes cantidades y a una altura considerable, pueden producir colapso del edificio volcánico y formación de calderas.

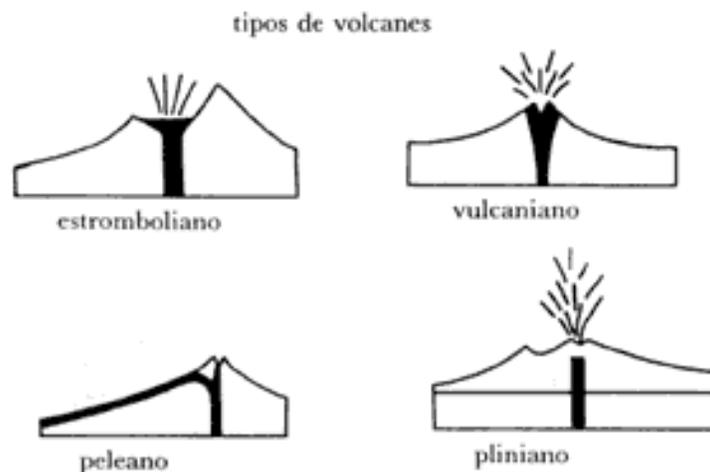


Figura II.6. Tipo de volcanes según Lacroix (Lugo, 1996).

## 2.3 Calderas

Las calderas se reconocen en las regiones volcánicas de la Tierra, aunque son mucho menos comunes que los otros tipos de volcanes. Las calderas son la expresión de una actividad violenta y peligrosa de erupciones. En México hay varias calderas bien definidas, formadas en los últimos dos millones de años; los estudios geológicos demuestran que en el (ETN) hay numerosas calderas antiguas y, como tales, no bien conservadas, pero que se pueden reconocer por algunos vestigios en el relieve y por el tipo de secuencias de rocas volcánicas. (Lugo, 1989)

Las calderas se encuentran entre los rasgos volcánicos más espectaculares y activos en la Tierra. Los sismos, las grietas del suelo, levantamiento o subsidencia y la actividad térmica, tales como aguas termales, géiseres y lodo hirviendo son comunes en algunas calderas. La actividad térmica es causada por interacciones complejas entre el magma y el agua subterránea en la corteza terrestre. El nivel de actividad volcánica e hidrotermal en una caldera reciente puede ser intermitente, con ciclos de meses o años, o persistente durante décadas o siglos. Aunque la mayoría de los fenómenos que ocurren en una caldera no concluyen con una erupción, la posibilidad de erupciones explosivas violentas merece un estudio científico detallado, dada su peligrosidad potencial (Brantley, 1994). Las erupciones encargadas de la formación de las calderas ocurren en promedio una vez cada mil años (Wohletz et al., 1992).

Las calderas son de forma circular y se forman cuando la estructura volcánica se hunde sobre la cámara magmática parcialmente vacía que se sitúa por debajo. Si bien la mayoría de las calderas presenta un hundimiento producido después de una erupción explosiva, esto no es así en todos los casos.

Las calderas de gran tamaño se forman cuando un cuerpo magmático ácido (félsico) se ubica cerca de la superficie curvando de esta manera las rocas superiores. Posteriormente, una fractura en el techo permite al magma rico en gases y muy viscoso ascender hasta la superficie, donde expulsa, de manera explosiva, enormes volúmenes de material piroclástico, fundamentalmente cenizas y fragmentos de pumita.

Estos materiales forman coladas piroclásticas que pueden alcanzar velocidades de 100 km/h. Cuando se detienen, los fragmentos calientes se fusionan para formar una toba soldada que se asemeja a una colada de lava solidificada. Finalmente, el techo se derrumba dando lugar a una caldera. Este proceso puede repetirse varias veces en el mismo lugar.

La caldera puede estar segmentada o delimitada por fallas normales, radiales, transversales o longitudinales, así como por diques y domos, y presentar bloques hundidos en grados diversos.

Las calderas más extensas tienen aproximadamente unos 60 kilómetros de diámetro y están asociadas con erupciones y expulsiones de material piroclástico. En el caso de Acoculco, la caldera tiene un diámetro de 18 km (López et al., 2009).

Las fracturas que circundan las calderas actúan como conductos de alimentación del magma, lo que da lugar a diques anulares. Mientras que el compartimiento del magma vacío, el centro del volcán dentro de la fractura del anillo comienza a derrumbarse. El derrumbamiento puede ocurrir como resultado una sola erupción cataclísmica, o bien en etapas, como resultado una serie de erupciones. El área total que se derrumba puede tener centenares o millares de km<sup>2</sup>.

Por lo general, el magma de las calderas es rico en sílice, por lo que los principales productos son ignimbritas, tobas, riolitas y otras rocas ácidas. El magma rico en sílice tiene muy alta viscosidad; consecuentemente, los gases tienden a quedar atrapados dentro del magma. Cuando el magma se acerca a la superficie de la Tierra y por lo tanto sufre una descompresión, los gases se exsuelven rápidamente, causando la explosión del magma y la separación de cenizas volcánica (Figura II.7).

Si la actividad volcánica continúa, el centro de la caldera puede sufrir un levantamiento que dé lugar a un domo resurgente, por ejemplo, en Yellowstone, Wyoming, EUA (Wohletz et al., 1992).

## **2.4 Alteración hidrotermal**

La alteración hidrotermal es un término general que incluye la respuesta mineralógica, textural y química de las rocas a un cambio ambiental, en térmicos químicos y termales, en presencia de agua caliente, vapor o gas. La alteración hidrotermal ocurre a través de la transformación de fases minerales, crecimiento de nuevos minerales, disolución de minerales y/o precipitación, y reacciones de intercambio iónico e isotópico entre los minerales constituyentes de una roca y el fluido caliente que circuló por la misma.

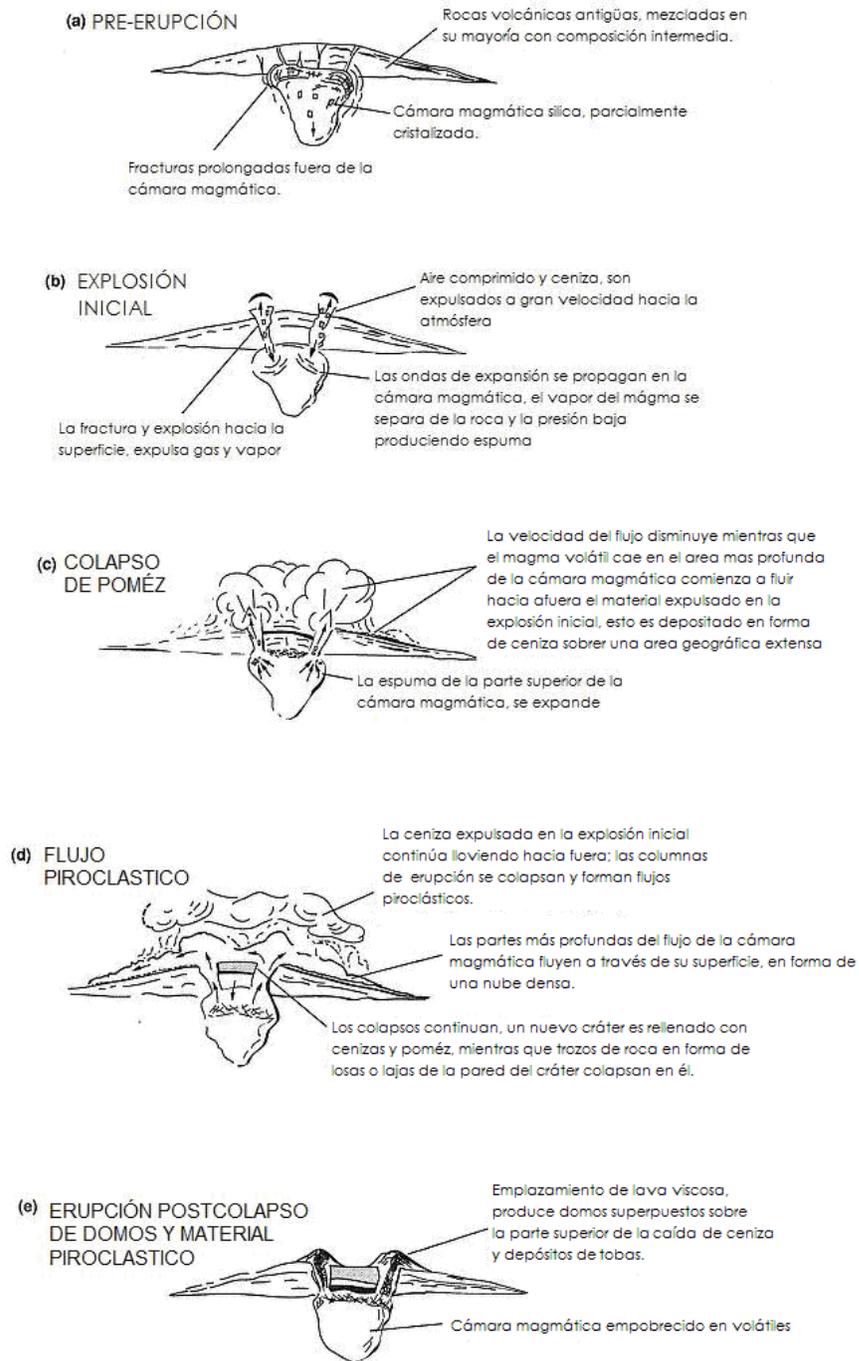


Figura II.7. Etapas de erupción y colapso de una caldera. Las etapas van desde la pre-erupción (letra a) hasta la e, la cual muestra la formación de los domos (tomado de Wohletz et al., 1992).

### 2.4.1. Tipos de alteración hidrotermal

Meyer y Hemley (1967) realizaron una clasificación de alteraciones hidrotermales basándose en los tipos de roca:

**Propilítica:** Presencia de epidota y/o clorita y ausencia de un apreciable metasomatismo catiónico o lixiviación de álcalis o tierras alcalinas; los volátiles como H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> y S pueden agregarse a la roca, y comúnmente se presentan también albita, calcita y pirita. Este tipo de alteración representa un grado bajo de hidrólisis de los minerales de las rocas, y por lo mismo su posición en zonas alteradas tiende a ser marginal.

**Argílica intermedia:** Importantes cantidades de caolinita, montmorillonita, esmectitas y/o arcillas pobremente cristalizadas, principalmente remplazando plagioclasa; puede haber sericita acompañando; el feldespato potásico de las rocas puede estar fresco o también argilitizado. Hay una significativa lixiviación de Ca, Na y Mg de las rocas. La alteración argílica intermedia representa un grado más alto de hidrólisis relativo a la alteración propilítica.

**Sericítica o cuarzo-sericítica:** Ambos feldespatos (plagioclasas y feldespato potásico) son transformados a sericita y cuarzo, con cantidades menores de caolinita. Normalmente los minerales máficos también están completamente destruidos.

**Argílica avanzada:** Gran parte de los minerales de las rocas se hallan remplazados por dickita, caolinita, pirofilita, diásporo, alunita y cuarzo. Este tipo de alteración representa un ataque hidrolítico extremo de las rocas, tal que incluso se rompen los enlaces del aluminio en los silicatos, originándose sulfato de Al (alunita) y óxidos de Al (diásporo). En casos extremos la roca puede ser transformada a una masa de sílice oquerosa residual (“*vuggy silica*” en inglés).

**Potásica:** Alteración de plagioclasas y minerales máficos a feldespato potásico y/o biotita. Esta alteración corresponde a un intercambio catiónico (cambio de base) con la adición de K a las rocas. A diferencia de las anteriores este tipo de alteración no implica hidrólisis y ocurre en condiciones de pH neutro o alcalino a altas temperaturas (principalmente en el rango 350°–550°C). Por esta razón, frecuentemente se refiere a la

alteración potásica como tardi-magmática y se presenta en la porción central o núcleo de zonas alteradas ligadas al emplazamiento de plutones (e.g. en pórfidos cupríferos).

#### **2.4.2. Productos de la alteración hidrotermal (minerales, rocas)**

La susceptibilidad ante la alteración es variable en los minerales primarios de las rocas. El más reactivo es el vidrio volcánico, frecuentemente alterado primero a ópalo, esmectitas, calcita, zeolitas y luego a minerales.

Corbett y Leach (1998) publicaron un diagrama de clasificación de los minerales de alteración hidrotermal en que se incluyen los principales grupos de minerales asociados a sistemas hidrotermales dependiendo del pH:

**Grupo de la sílice:** Estos son los únicos minerales estables en forma significativa en fluidos de pH bajo (<pH 2); (Stoffregen, 1987).

- Sílice opalina, cristobalita y tridimita ocurren en ambiente superficial de un sistema hidrotermal. Típicamente a temperaturas <100°C.
- Cuarzo es el mineral principal a mayores temperaturas. A pH más altos y a temperaturas <100°C se forma sílice amorfa. E incluso, un fluido a 200°C puede formar sílice amorfa si este se enfría rápidamente. El cuarzo está siempre presente prácticamente a >100°C.
- Calcedonia generalmente se forma en el rango 100°–200°C.

**Grupo de la alunita:** Un fluido con un pH ligeramente superior a 2 puede formar alunita en un amplio rango de temperaturas (Stoffregen, 1987). Esta se presenta con andalucita a altas temperaturas (típicamente >350°–400°C) y con corindón a temperaturas mayores (>400°–450°C).

Se han reconocido cuatro ambientes de formación de alunita (Rye et al., 1992) con base en datos isotópicos de S y O. Las condiciones de formación de la alunita también pueden inferirse por las formas cristalinas, por el marco geológico y las paragénesis mineralógicas.

1.- Alunita calentada por vapor (*steam-heated*); se desarrolla en ambientes superficiales por la oxidación de fluidos con gas H<sub>2</sub>S, el cual deriva de un sistema hidrotermal en ebullición en profundidad. La alunita depositada de esta agua calentada por vapor es usualmente de grano muy fino en cristales pseudocúbicos. Esta alunita puede encontrarse hasta profundidades de 1 a 1.5 km, en sistemas en los cuales aguas sulfatadas ácidas descienden en un sistema hidrotermal que se desvanece. Este tipo de alteración se puede encontrar en la caldera de Acoculco.

2.- Alunita supergénica; se desarrolla a partir de la producción de ácido sulfúrico por meteorización de sulfuros (principalmente pirita). Esta exhibe un hábito pseudoacicular pobremente cristalino (generalmente se asocia a otros minerales supergénicos como jarosita).

3.- Alunita magmática; se deriva de fluidos de fuente predominantemente magmática y forma cristales bien formados de grano grueso con forma tabular que rellenan fracturas, las cuales se infiere que se han depositado directamente de fluidos ricos en volátiles, cementan brechas y depósitos en huecos lixiviados como pseudomorfos de fenocristales o clastos. La alunita formada a mayor temperatura, donde puede estar intercrecida con moscovita y/o andalucita, puede estar presente como grandes cristales irregulares que incluyen cuarzo y otras fases. En este ambiente la alunita puede estar presente como cristales prismáticos radiales.

**Grupo del caolín:** Estos minerales derivan de la acción de fluidos de pH moderadamente bajo (pH ~4) y coexisten con alunita en un rango de pH transicional (pH 3- 4). La halloysita (arcilla del grupo del caolín) se presenta principalmente como producto de alteración, y se forma en condiciones hidrotermales de muy baja temperatura.

La caolinita se forma a profundidad somera en condiciones de baja temperatura (<150-200°C), y la pirofilita se forma a profundidad mayor y a mayor temperatura. En un rango intermedio entre ambos se forma dickita (Hemley et al., 1964).

**Grupo de la Illita:** En fluidos con un pH 4–6 dominan los minerales del grupo de la illita y coexisten con el grupo del caolín en pH del fluido 4–5, dependiendo de la temperatura y salinidad del fluido. La relación profundidad/temperatura del grupo de la illita está bien documentadas, tanto de cuencas sedimentarias como de campos geotermales activos. A baja temperatura se presenta esmectitas (<100°–150°), interestratificados de illita–esmectita alrededor de 100°–200°C, illita a aproximadamente 200°–250°C, y moscovita >250°C. La sericita es una fase de grano fino que es transicional entre la illita y la moscovita bien cristalizada.

El contenido de esmectitas dentro de las arcillas interestratificadas de illita–esmectita decrece progresivamente al aumentar la temperatura sobre el rango 100°–200°C. La cristalinidad de la illita y sericita aumentan con la temperatura y pueden estimarse con análisis por difracción de rayos X (DRX). Los cambios de cristalinidad de la moscovita también pueden ser monitoreados con DRX; al aumentar la temperatura hay un cambio progresivo desde una mica desordenada a una moscovita bien cristalizada.

**Grupo de las cloritas:** En condiciones levemente ácidas a neutras de pH las cloritas y los carbonatos son dominantes, coexistiendo con el campo de estabilidad de la illita en ambientes a pH de 5–6.

**Grupo de los calcosilicatos:** Estos minerales se forman en condiciones de pH neutro a levemente alcalino. En condiciones frías se forman zeolitas, clorita, carbonatos y epidota, seguida de anfíboles secundarios (actinolita), se desarrollan progresivamente a mayores temperaturas.

Las zeolitas hidratadas (natrolita, chabazita, mesolita, mordenita, estilbita, heulandita) predominan en condiciones frías (150°–200°C), mientras que las menos hidratadas como la laumontita (150°–200°C) y wairakita (200°–300°C) se presentan progresivamente en niveles más profundos y calientes del sistema hidrotermal. En algunos sistemas se encuentra prehnita y/o pumpellyíta a temperaturas de 250°–300° C, asociada a veces con epidota.

La epidota se presenta como granos incipientes pobremente cristalinos alrededor de 180°–200°C y como fases bien cristalizadas a temperaturas mayores (>220°–250°C). La actinolita es estable en sistemas hidrotermales a temperaturas >280°–300°C.

Los carbonatos se encuentran en un amplio rango de pH (neutro a alcalino) y de temperatura, y se asocian con caolín, illita, clorita, y fases calcosilicatadas. Una zonación de minerales carbonatados que se correlaciona con el aumento de pH se encuentra en muchos sistemas hidrotermales.

Carbonatos de Fe-Mn (siderita, rodocrosita) coexisten con caolín y arcillas del grupo de la illita, mientras que carbonatos de Ca-Mn-Mg-Fe mezclados (rodocrosita-ankerita-kutnohorita-dolomita) coexisten con arcillas del grupo de la illita y cloríticas, y los carbonatos de Ca-Mg (calcita-dolomita) coexisten con clorita-minerales calcosilicatados.

Esta zonación se interpreta como el reflejo de la decreciente movilidad del Fe, Mn y Mg al aumentar progresivamente el pH del fluido. Los carbonatos se presentan típicamente en todos los niveles de sistemas hidrotermales, desde la superficie hasta ambientes de tipo pórfido o skarn.

Los feldespatos están asociados tanto con clorita como con minerales calcosilicatados. Los feldespatos secundarios son generalmente estables en condiciones de pH neutro o alcalino. La albita se presenta cuando los fluidos tienen una alta razón  $a(\text{Na}^+) / a(\text{K}^+)$  y feldespato potásico a bajas razones  $a(\text{Na}^+) / a(\text{K}^+)$ . La adularia es un feldespato potásico secundario de baja temperatura, propio de los sistemas epitermales, mientras que la ortosa es de alta temperatura dentro de ambiente de tipo pórfido (350°–550°C). La adularia también se presenta en condiciones de alta permeabilidad, es decir, con alto flujo de fluido, mientras que la albita se presenta en condiciones de menor permeabilidad.

Los sulfatos se encuentran en amplios rangos de temperatura y regímenes de pH en sistemas hidrotermales. Mientras la alunita (sulfato de aluminio) se forma en

condiciones de bajo pH (<3-4), la anhidrita (sulfato de calcio) se forma a pH más alto y temperatura 100°-150°C, y el yeso en ambientes más fríos. La jarosita es común como mineral supergénico, pero también se presenta en ambientes ácidos someros en sistemas geotérmicos activos.

Existen además varias fases minerales que contienen elementos halógenos (boro en turmalina, y flúor, cloro y fósforo en apatita), los cuales indican que los fluidos tuvieron una importante componente volátil magmática. Estos minerales comúnmente se asocian con sericita (mica formada a alta temperatura y de bajo a moderadamente bajo pH).

### **3. CAPITULO III.**

## **TÉCNICAS DEL PROCESAMIENTO**

Las técnicas de procesamiento son herramientas útiles en donde distintas combinaciones de bandas nos permiten hacer un análisis de los productos de alteración hidrotermal tales como clasificaciones. (Tommaso et al 2005, Lattus 2002).

### ***3.1 Clasificación supervisada***

Como su nombre lo indica, consiste en “supervisar” el proceso de clasificación, que es lo que garantiza la mayor precisión de la clasificación resultante. Estas técnicas se basan en la definición previa de polígonos de entrenamiento para cada una de las clases que se desean analizar. A partir de estos polígonos de entrenamiento se extraen los parámetros característicos de cada clase para posteriormente llevar a cabo la clasificación.

Las variables básicas a utilizar en el proceso de clasificación pueden ser directamente las diferentes bandas que constituyen una imagen (cada banda espectral es considerada una variable en este caso). (Chuvieco, 1996)

#### ***3.1.1 Método de paralelepípedo***

En este método, se calcula a cada firma espectral un valor máximo y mínimo. Estas se definen en grupos en forma de paralelepípedo que delimitan un conjunto de posibles valores para los puntos que suponen pertenecientes a la misma clase.

Un pixel se asigna a un tipo de grupo, si su valor para cada banda, está incluido dentro de los rangos de valores calculados para un determinado tipo de grupo. Si el valor del pixel para una banda o más no está dentro del rango correspondiente, se procede a revisar si pertenece a otro grupo, si el pixel no se puede clasificar dentro de algún grupo este se deja sin clasificar. (Chuvieco, 1996)

Puede ser que un pixel corresponda a una o más clasificaciones, es por eso que en este método pueden aparecer pixeles clasificados a varias clases (Figura III.1).

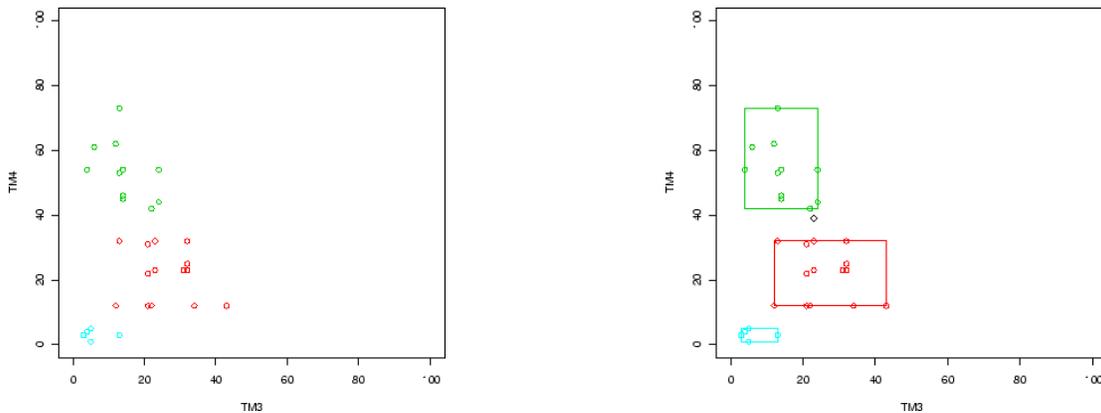


Figura III.1. En la imagen izquierda se muestra cómo los pixeles están en un principio, después de aplicar el método de paralelepípedo sería el resultado en la imagen derecha. (Universidad de Murcia <http://www.um.es/>)

### 3.1.2 Mínima distancia

Consiste en suponer que los centros de las áreas de entrenamiento se asemejan mucho a los centros de las clases, y en asociar los puntos de la imagen a la clase cuyo centro sea el más cercano.

Tiene el inconveniente de no tener en cuenta la variabilidad interna de cada clase, lo que hace posible que haya puntos que perteneciendo a una clase que presente una cierta varianza sean asignados a otras de menor varianza pero cuyo centro resulta más cercano (Figura III.2).

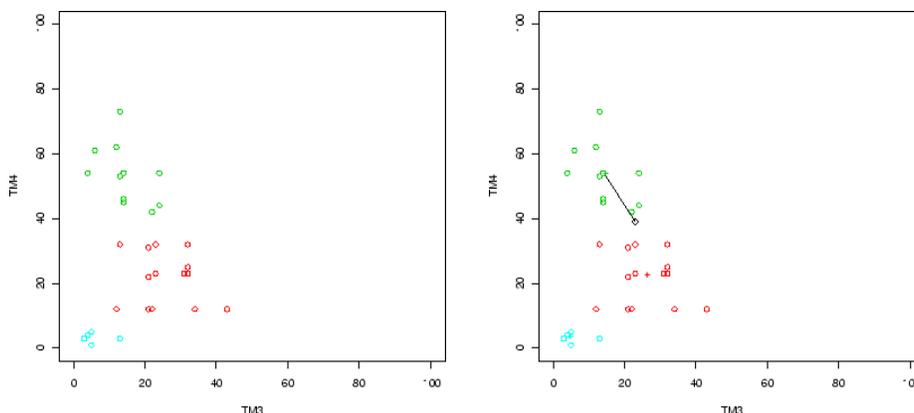


Figura III.2. Aplicación del método de mínima distancia (Universidad de Murcia <http://www.um.es/geograf/sig/teledet/clasific.html>).

### 3.1.3 Máxima probabilidad

En este método se utilizan técnicas estadísticas para calcular una función de probabilidades para cada firma espectral. Un píxel es asignado a la clase donde tiene mayores probabilidades de pertenecer (Figura III.3).

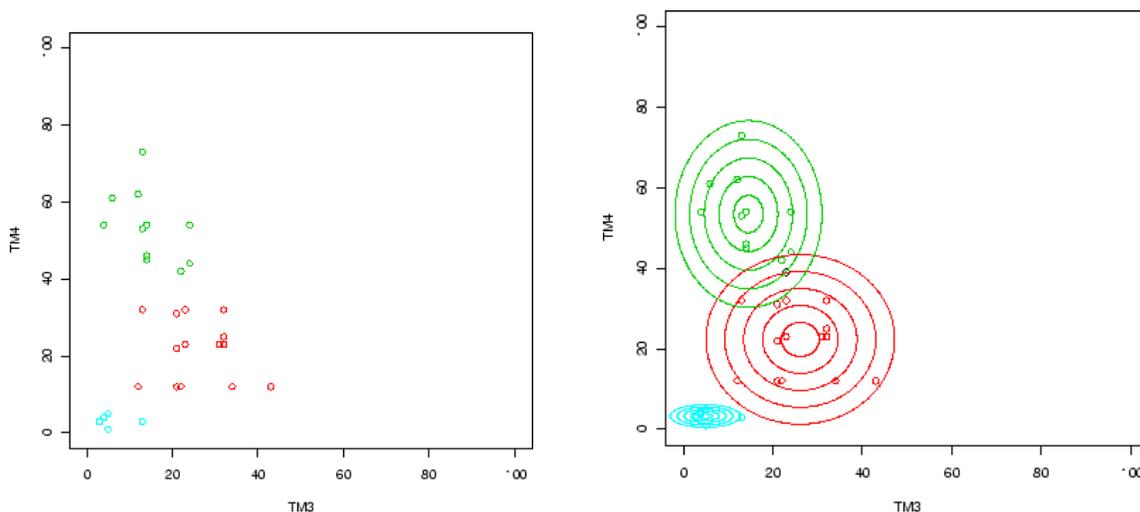


Figura III.3. Los círculos muestran la clase donde es más probable que el píxel pertenezca. (Universidad de Murcia, <http://www.um.es/geograf/sig/teledet/clasific.html>)

## 3.2 Realce visual

El realce visual es la transformación de imágenes mediante la manipulación de distintas bandas o valores de píxeles. Cada transformación genera una “nueva imagen” con un realce en el que sobresalen las coberturas de interés. (Chuvieco, 1996)

### 3.2.1 Composición a color

Esta técnica también se conoce como composición en falso color, se utiliza el sistema de despliegue simultáneo de tres canales (azul, verde y rojo). Consiste en hacer diferentes combinaciones de color, para resaltar aspectos importantes. Esta técnica es útil y comúnmente utilizada para interpretación geológica a partir de una imagen de satélite.

Estas firmas espectrales son comparadas con firmas espectrales de bibliotecas espectrales (biblioteca ASTER <http://speclib.jpl.nasa.gov/>).

### **3.3 Realce espectral**

Existen otros casos de procesamiento de imágenes que permiten modificar los datos originales de las imágenes de tal manera que se facilita su interpretación visual por medio de la generación de una “nueva imagen” (Tommaso et al, 2005; Ruiz Armenta, 1995; Lattus 2002).

#### **3.3.1 Cociente de bandas**

El cociente de bandas consiste en una división del valor de un píxel dentro de una banda entre el valor del píxel correspondiente dentro de otra banda (Vincent, 1997).

Este proceso se realiza después de haber hecho las correcciones atmosféricas. Las bandas seleccionadas para un proceso de cocientes espectrales son importantes porque aumentan la información, mientras que suprimen otro tipo de información de la superficie terrestre, como expresiones topográficas.

Varios autores señalan que los cocientes de bandas más aptos para la localización de materiales que indiquen alteración hidrotermal son: banda 3/ banda 1 (Landsat) porque permite distinguir a los materiales ferrosos (óxidos) y el cociente de la banda 5/ banda 7 (Landsat) que genera un realce en los hidróxilos (arcillas), (Ruiz et al 1995, Lattus 2002, Tommaso et al 2005, Marín et al 2003, Anzil 2010).

En el cociente de bandas se encuentran aquellas en donde una representa la máxima reflectividad del material de interés y por tanto sus valores son cercanos a 0, mientras que la otra banda presenta los valores de máxima absorbancia con valores cercanos a 255. La división entre dichas bandas dará como resultado que tonos más brillantes mostrarán los materiales de interés, mientras que los tonos oscuros no pertenecen a los materiales tales como óxidos o hidróxilos.

### **3.3.2 Análisis de Componentes Principales**

El análisis de componentes principales (ACP) es una técnica de realce de imagen para desplegar el máximo contraste espectral de las “n” bandas espectrales. En esencia el ACP consiste en una transformación matemática que genera imágenes nuevas referidas como componentes o ejes. El componente o ejes, son combinaciones lineales de las imágenes originales entre si y cada imagen nueva genera una correlación espectral distinta con respecto a las otras imágenes nuevas. La mayor proporción de la variabilidad de los datos está presente sobre el primer componente disminuyendo esta variabilidad en los componentes siguientes. La suma de la variabilidad de todos los componentes es igual al total de la variabilidad presente en las imágenes originales.

Para el ACP es importante el concepto de matriz de covarianza, ya que en ella se ve si existe afinidad entre las respuestas de las “n” bandas, si las bandas están altamente relacionadas los valores fuera de la diagonal principal de la matriz de covarianza son más grandes en comparación con los valores fuera de la diagonal, que están muy cercanos a cero. A partir de la matriz de covarianza se calcula la transformada de componentes principales. (Campbell, 2002).

## **4. CAPÍTULO IV METODOLOGÍA**

Para el presente trabajo se utilizaron dos imágenes Landsat con un número clave en fila de 26 y números clave en columna de 47 y 48. Ambas imágenes fueron unidas mediante la herramienta “mosaic” del programa IDRISI Taiga, de los días 26 de marzo y 23 de abril del año 2000.

Se utilizó además una imagen ASTER con clave 1B2345676 del día 23 mayo del año 2003.

Las diferentes técnicas de procesamiento descritas en el capítulo anterior fueron aplicadas tanto a las imágenes Landsat como a las imágenes ASTER, los resultados de dichas técnicas se muestran a continuación.

### **4.1 Clasificación supervisada**

Se utilizaron las bandas del visible e infrarrojo medio en el caso de las Landsat, mientras que en las ASTER se utilizaron sólo las bandas del infrarrojo medio.

Para obtener los polígonos de entrenamiento se realizaron distintas combinaciones en falso color. Las coberturas que más predominaron en la imagen fueron a las que se les realizaron los polígonos de entrenamiento, aun cuando no fueran los materiales de interés, ya que el objetivo es descartar áreas en las imágenes.

Las firmas espectrales resultantes fueron comparadas, con la librería espectral de la NASA (<http://speclib.jpl.nasa.gov/>)

Se comenzó con la digitalización de los polígonos de entrenamiento, estos se realizaron dependiendo de la coloración de los pixeles, que indican distintas coberturas de suelo, y el resultado de esos polígonos son firmas espectrales que indican los diferentes usos de suelo que hay en la imagen. Posteriormente se crean las firmas espectrales, en cada una de las bandas de las imágenes Landsat.

Una vez procesadas las imágenes Landsat y ASTER se hizo una verificación en campo. El mapa final que resultó de las técnicas de percepción remota fue la base para la toma

de muestras en sitios donde se localizan los hidróxilos y los óxidos (materiales potenciales de encontrarse en sistemas hidrotermales).

#### 4.1.1 Firmas espectrales

Las dos firmas espectrales que han resultado de los polígonos de entrenamiento para los materiales de interés (óxidos e hidróxilos) se muestran en las figuras IV.2. y IV.3.

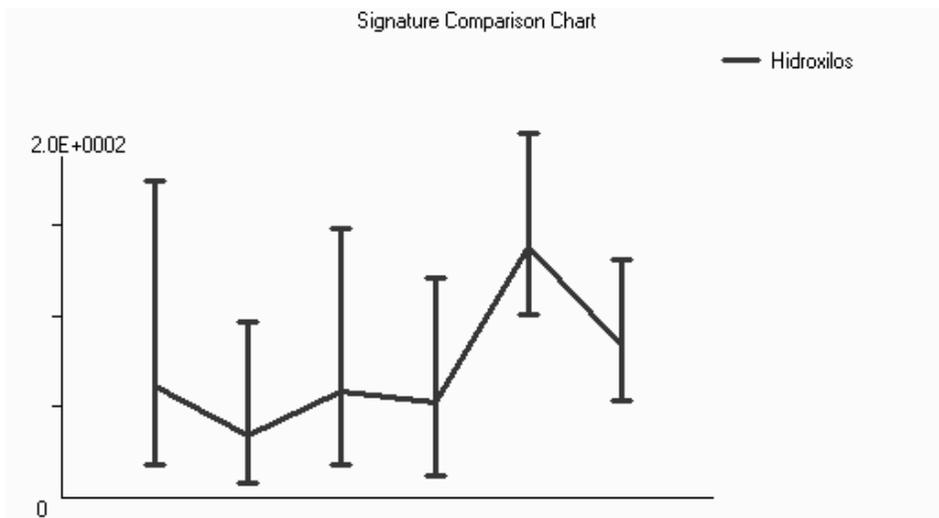


Figura IV. 2. Firmas espectral de hidróxilos. La línea roja muestra las diferentes reflectancias en las bandas 1,2,3,4,5 y 7 respectivamente. El pico más alto de la gráfica representa la reflectancia en la banda 5, mientras que las menores reflectancias se muestra en la banda 2 y 7.

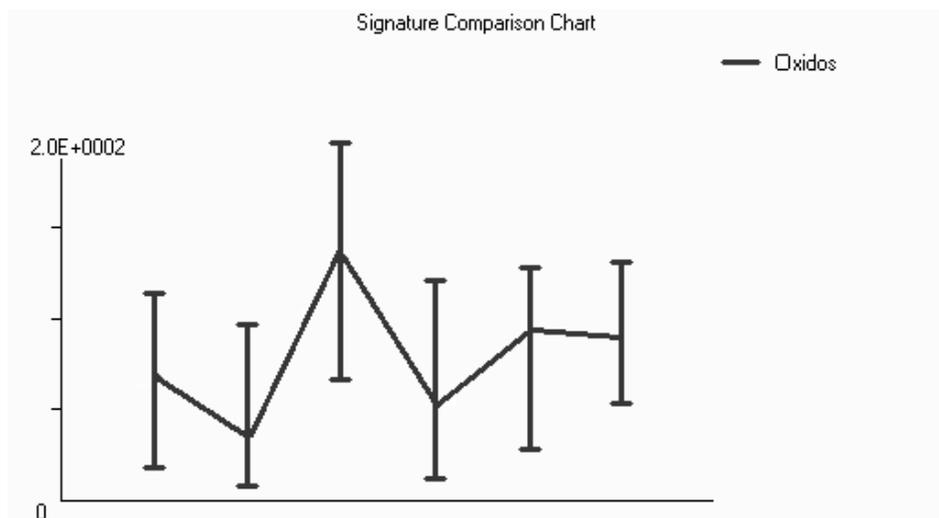


Figura IV.3. Firmas espectrales de óxidos. La línea roja hace referencia a las diferentes reflectancias en las bandas 1,2,3,4,5 y 7 respectivamente. El pico más alto hace referencia a la mayor reflectancia, y este es observado en la banda 3, mientras que los picos con menor reflectancia los encontramos en la banda 1 y 2

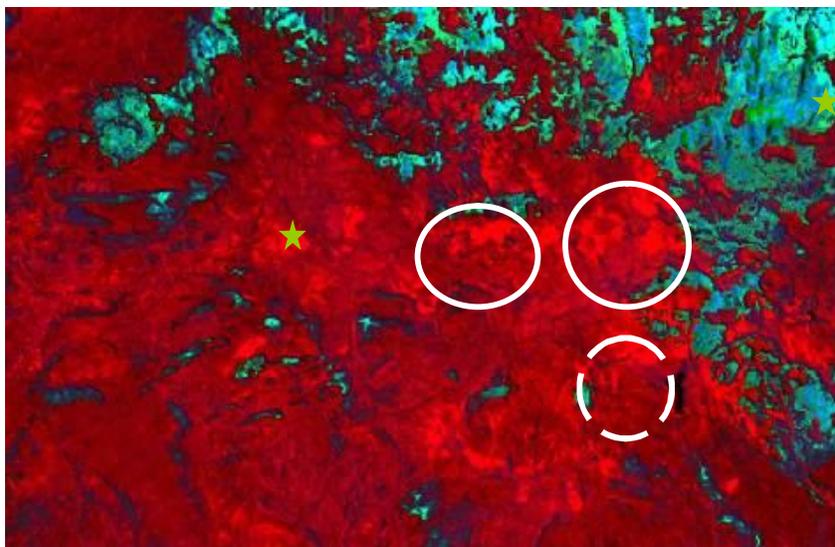
Las firmas espectrales cumplen con las características de presentar la máxima reflectancia en banda 5 mientras que en banda 7 presenta una absorbancia, (para el caso de los hidróxilos), aunque la mayor absorbancia debería de ser la banda 2 también existe una absorbancia en la banda 7, mientras que en los óxidos la máxima reflectancia se presenta en la banda 3, mientras que la máxima absorbancia se presenta en la banda 2, sin embargo, la banda 1 presenta también una absorbancia mayor y de acuerdo con distintos autores la banda 1 es la característica de materiales oxidados.

## 4.2 Realce visual.

### 4.2.1 Composición a color

Para obtener los hidróxilos se utilizó un falso color que combinó los cocientes de bandas 5/4 (que atenúa la vegetación) en el canal rojo; cociente de bandas 4/3 (cociente que realza la vegetación) en el canal verde y cociente de bandas, 5/7 (cociente característico de los hidróxilos) en el canal azul. Los hidróxilos destacarían en magenta.

Las zonas donde se presentan los hidroxilos, son las del noroeste de la imagen. Los colores verde claro y verde oscuro son vegetación sana, los cuales se destacan en la parte norte de la imagen, las zonas moradas, destacan los cuerpos de agua (Figura IV.4.).



Aoculco

Figura IV.4. Resultado de composición de color imágenes Landsat. En los círculos blancos se muestran las zonas con hidroxilos que se encontraron con la técnica de composición a color

Se utilizó la banda 5 porque esta presenta mayor reflectancia en los hidróxilos, mientras que la banda 7 es la que presenta la mayor absorbanza en los mismos.

En la figura IV.5. se utilizaron las bandas 7 en el canal rojo, la banda 5 en el canal verde y la banda 3 en el canal azul. Los tonos rosa más claro muestran a los óxidos localizados al norte del poblado de Aocolco.

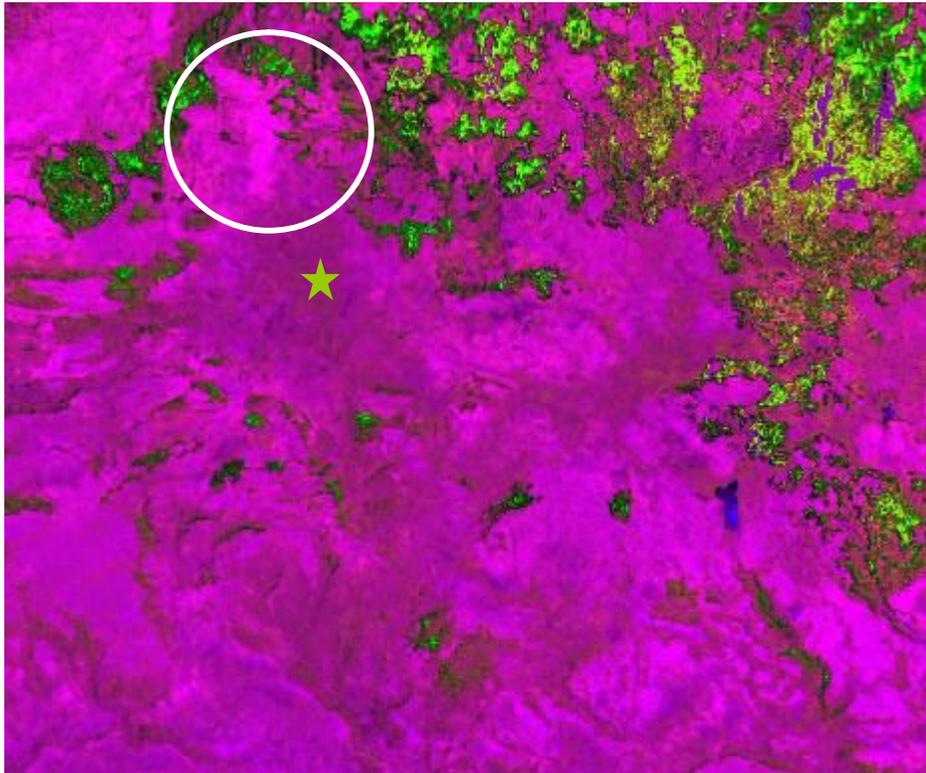


Figura IV.5. Resultado de composición de color imágenes Landsat. En el círculo blanco se presentan los tonos color magenta con mayores valores de brillo, esto indica la presencia de hidroxilos en la zona.

Los procesamientos de falso color aplicados en las imágenes Landsat se muestran en las Figuras IV.6. y IV.7. Para el caso de la figura IV.6. el falso color utilizado fue para resaltar a los hidróxilos. Mediante el cociente  $1/3$  en el canal rojo (que atenúa la vegetación), el cociente  $5/7$  en el canal verde (característico de los hidróxilos) y el cociente  $2/3$  (que resalta a la vegetación) en el canal azul. Los tonos cian muestran la presencia de hidróxilos al noreste de la zona de estudio.

En la figura IV.7. se aplicó un falso color en la imagen Landsat, en el canal rojo contiene la banda 5 (que contiene los valores de brillo más altos para los hidróxilos), en el canal azul las 1 (que resalta materiales alterados) y en el canal verde se 7

La figura IV.8. contiene un falso color aplicado a una imagen ASTER que contiene las bandas 8/6 (que muestra un alta reflectancia en los hidróxilos), la banda 4 (que presenta una alta absorbanza en los hidróxilos) y la banda 9 (la única banda dentro de este falso color que presenta una gran absorbanza en los hidróxilos).

Una vez procesadas las imágenes Landsat y ASTER se hizo una verificación en campo. El mapa final que resultó de las técnicas de percepción remota fue la base para la toma de muestras en sitios donde se localizan los hidróxilos y los óxidos (materiales potenciales de encontrarse en sistemas hidrotermales).

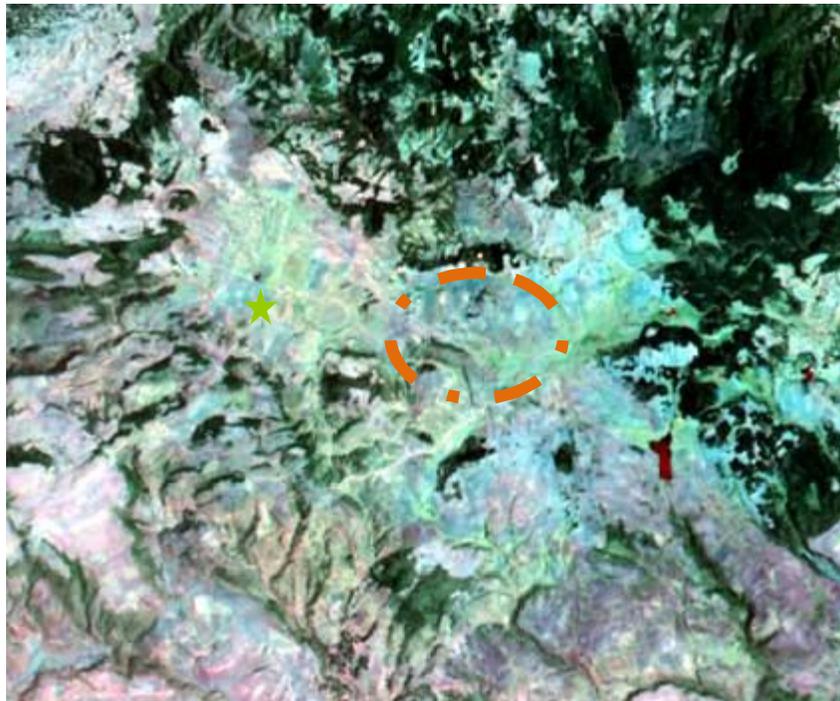


Figura IV.6. Resultado de composición de color imágenes Landsat. Donde los hidroxilos se muestran en el color azul (circulo anaranjado).

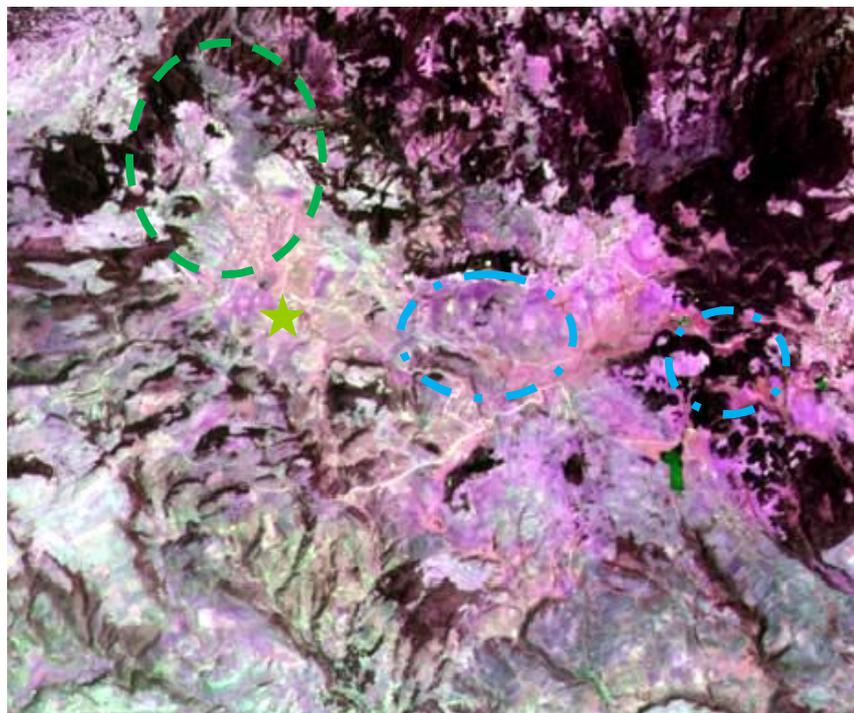
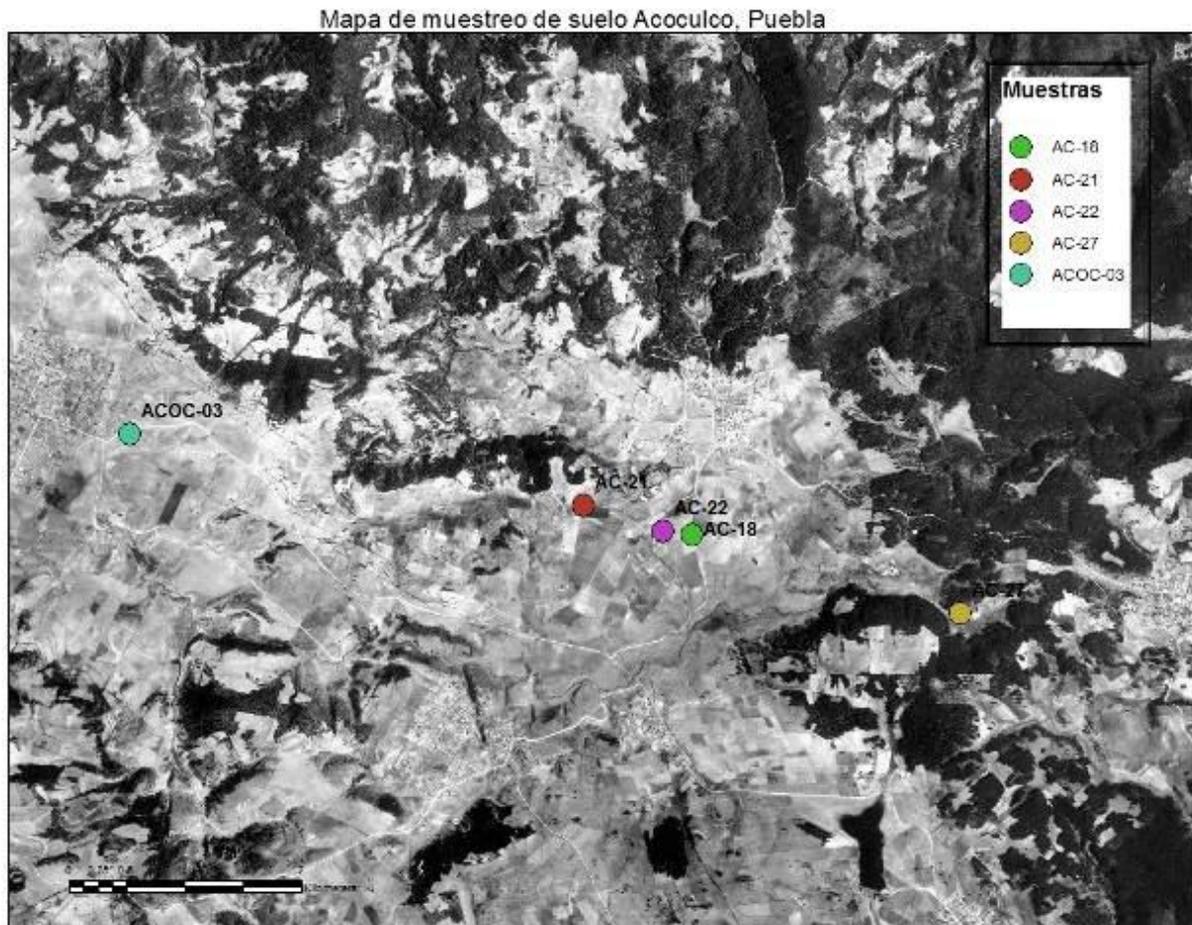


Figura IV.7. Resultado de composición de color imágenes Landsat. La imagen destaca a los hidroxilos en colores morados



Figura IV.8. Resultado de composición de color imágenes ASTER. Mientras que en esta combinación los hidroxilos se destacan en color verde

Con las coordenadas tomadas en campo a través de un GPS fueron ubicados dentro del mapa base (Figura IV.9). Las muestras colectadas corresponden a roca superficial y suelo. Las claves utilizadas para diferenciar a los hidróxilos de los óxidos fue AC y ACOC respectivamente, seguido de un número secuencial (Tabla 10).



Las muestras tomadas fueron analizadas a través de un espectroradiómetro en el Instituto de Geofísica de la UNAM. Las gráficas obtenidas del espectroradiómetro fueron comparadas con las firmas espectrales de la biblioteca Spectral International INC.

El resultado de la imagen muestra que la disposición de los hidróxilos está en la parte noreste de la zona de estudio, la mezcla entre los colores morado y magenta muestran

también la presencia de óxidos, estos localizados en la parte norte del poblado de Acoculco.

## 5. CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Método de paralelepípedo

Para este método se utilizó el comando “piped” se utilizaron 6 firmas espectrales, estas firmas fueron el resultado de los polígonos de entrenamiento antes mencionado.

Este método fue el más acertado respecto a los otros métodos de clasificación aplicados, a pesar de que quedaron pixeles sin clasificar.

En la Figura V.1, se puede ver como en la parte noreste se encuentra la mayor vegetación mientras que en el centro es donde se localiza la mayor cantidad de hidróxilos y óxidos.

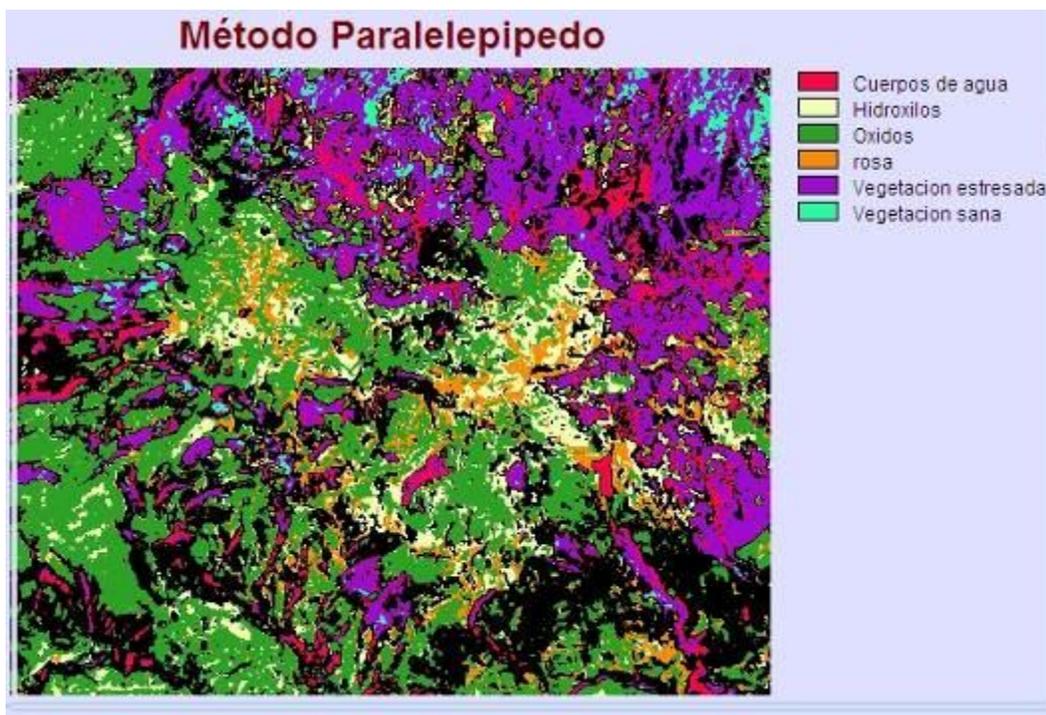


Figura V.1. Resultado del método de paralelepípedo imagen Landsat, donde el color negro no pertenece a ninguna clasificación ya que en este método pueden resultar pixeles que no pertenecen a algún grupo.

### 5.1.1 Método de mínima distancia

Utilizando las mismas firmas espectrales obtenidas de la clasificación supervisada. Este método no fue de mucha ayuda ya que es muy generalizado y nos marca que existe en todo el lugar una gran cantidad de óxidos y rosa, que este nombre se le dio ya que en el momento que se realizaron los polígonos no se tenía claro de que material se trata y da un color rosa (Figura V.2.).

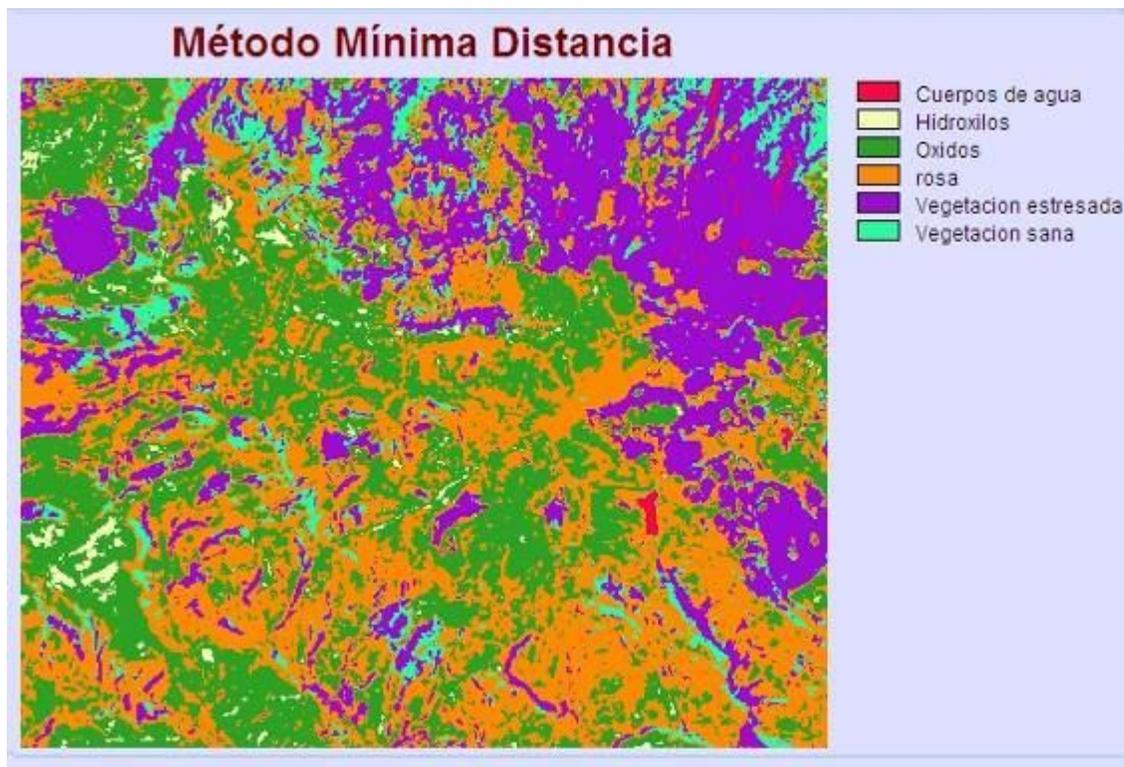


Figura V.2. Resultado del método de mínima distancia imagen Landsat. Los tonos verde y amarillo muestran los materiales de interés. El tono verde se localiza al centro de la imagen y en algunas porciones del occidente, mientras que los tonos amarillos sólo se encuentran esporádicamente en la porción occidental.

### 5.1.2 Método de máxima probabilidad

En la Figura V.3., correspondiente al área de estudio, se observa una amplia predominancia de hidróxilos en comparación con el resto de las coberturas que se encuentran en esta zona. Este resultado es bastante incierto, ya que no es una tendencia marcada en los dos métodos anteriores.

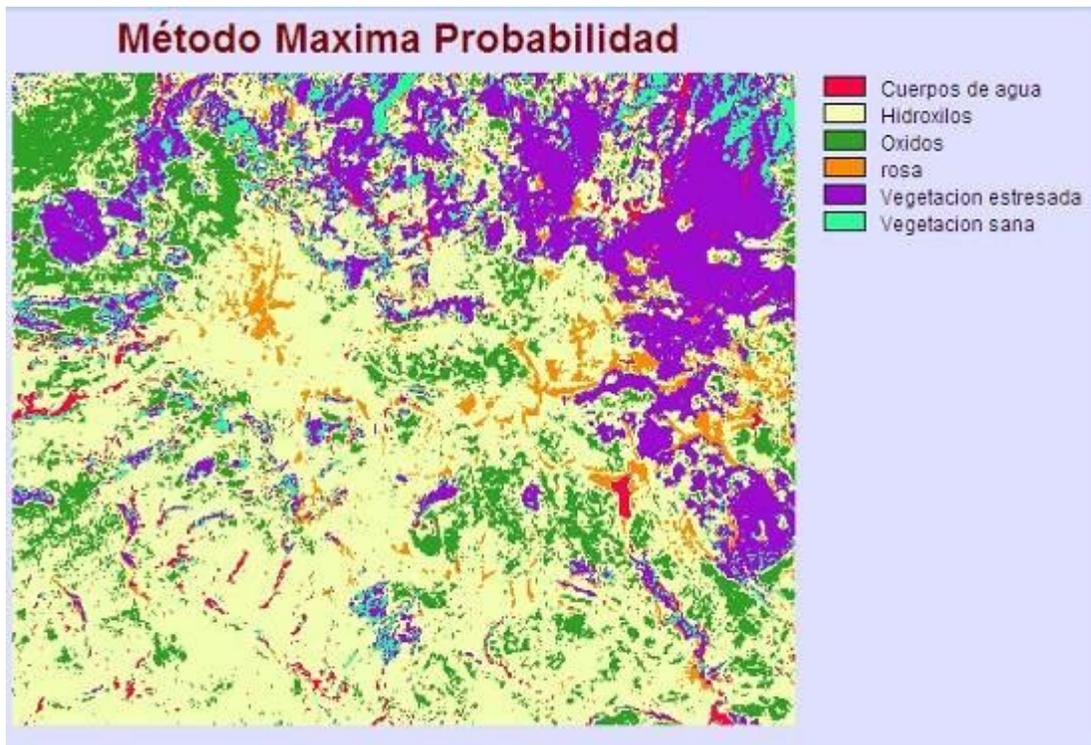


Figura V.3. Resultado del método de mínima distancia imagen Landsat. Los hidroxilos (color amarillo) abarcan la mayor área de la imagen, mientras que los óxidos, (color verde) muestran pequeñas porciones al occidente y sureste.

De forma general la clasificación supervisada aporta un primer criterio de localización. El método del paralelepípedo es el que aporta un resultado más detallado de las coberturas existentes en el área de estudio, sin embargo, se requiere de otras técnicas comparativas para la localización específica de cada uno de los materiales, sobre todo de aquellos minerales que son de interés para la localización de sistemas hidrotermales.

## **5.2 Realce espectral.**

### **5.2.1 Cociente de bandas**

Este método se aplicó a los dos tipos de imágenes, ASTER y Landsat.

Para las imágenes Landsat la Banda 3 sobre 1, es un cociente de óxidos. Se eligieron dichas bandas debido a la reflectancia y absorción que tienen éstas en las firmas espectrales. Los cocientes de bandas coinciden con los tonos más claros (blanco y gris

claro) que se encuentran en la Figura V.4., la cual representa a los óxidos en la porción noroeste del área de estudio.

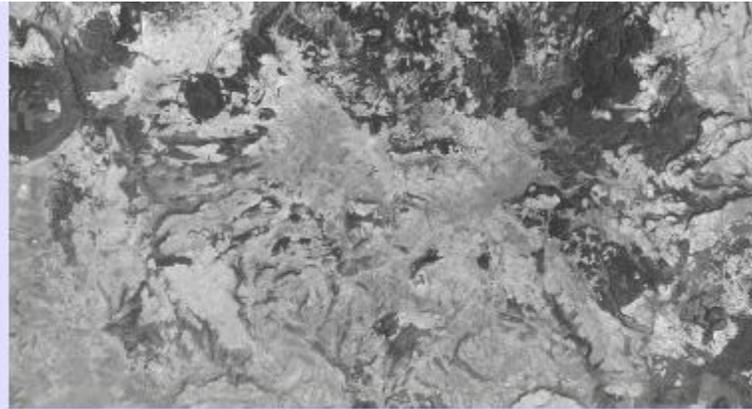


Figura V.4. Resultado de cociente de bandas imagen Landsat entre la banda 3 y la 1. Los tonos blancos (cuyos valores de brillo son los más cercanos a 255) representan las zonas con presencia de óxidos.

Banda 4 sobre 3, banda de vegetación. Es importante minimizar los efectos espectrales causados por la cobertura vegetal, por ello, este cociente fue importante para poder discernir las zonas de vegetación de nuestros materiales de interés (Figura V.5.).

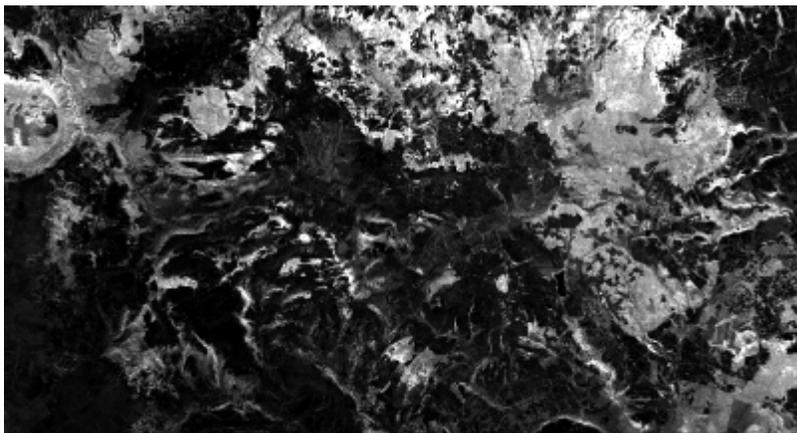


Figura V.5. Resultado del cociente de bandas 4 entre 3 en la imagen Landsat. Los tonos más brillantes (son tonos claros debido a que tienen valores cercanos a 255) muestran la vegetación zana dentro del área de estudio. Este cociente es útil para discriminar aquellas zonas en donde se encuentre vegetación y al mismo tiempo óxidos o hidroxilos.

Utilizando las dos bandas de la imagen Landsat más características para distinguir la localización de los hidróxilos (banda 5 como numerador, que representa una máxima reflectancia y banda sobre 7 como denominador, que representa la máxima

absorbancia da como resultado los sitios al este del poblado de Acoculco, como las áreas más potenciales de contener hidróxilos. Este resultado coincide con el falso color de la figura IV.4., la cual, también contiene un sitio con presencia de hidróxilos al este del poblado de Acoculco (Figura V.6.).



Figura V.6. Resultado de cociente de bandas, imagen Landsat bandas 5 entre 7. Los tonos claros que se presentan al oeste del poblado de Acoculco, coinciden con los hidroxilos localizados con la técnica de falso color.

Utilizando los cocientes de bandas anteriormente descritos para establecer una composición a color en donde el cociente 5/7 fue colocado en el canal azul, el cociente 3/1 situado en el canal verde y por último el cociente 4/3 puesto en el canal rojo dio como resultado la imagen de la Figura V.7., en donde la vegetación se muestra en tonalidades rosas. La zona de vegetación más extensa se localiza en la parte noreste de la imagen. El color verde pertenece a los óxidos, que se encuentran en la mayoría de la zona, mientras que los hidróxilos se encuentran en las zonas azules, esta zona no se encuentra bien definida.

Para las imágenes ASTER se aplicó un cociente de bandas entre la banda 5-6, 7-8, y 7-3 posteriormente un cociente de banda entre los cuatro. Los resultados de los cocientes aplicados a dicha imagen muestran en la Figura V.8. que los óxidos se ven de color más blanco.

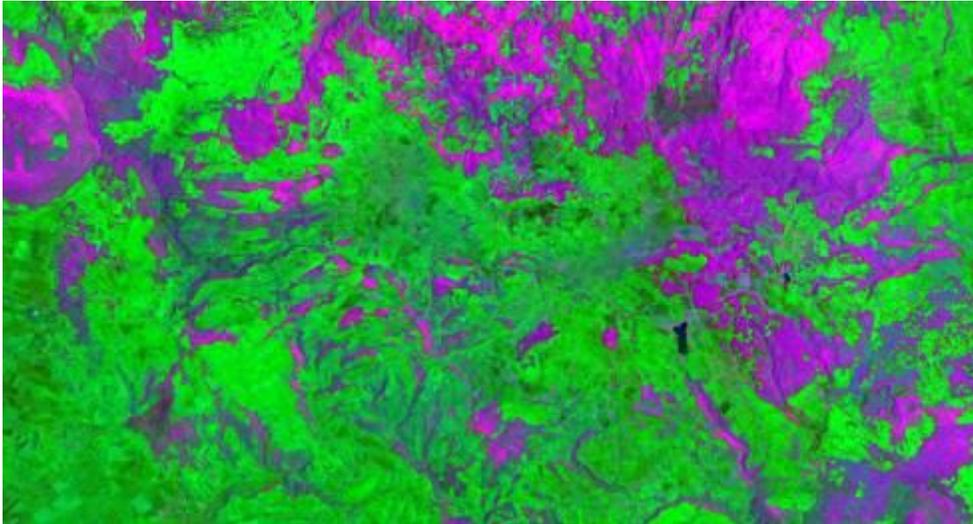


Figura V.7. Resultado de falso color Landsat con los cocientes de bandas. En tonos magenta se presenta la vegetación; en color verde, el cual, abarca la mayor parte se encuentran los óxidos y en pequeñas porciones se localizan los tonos azules, en donde se presentan los hidroxilos.

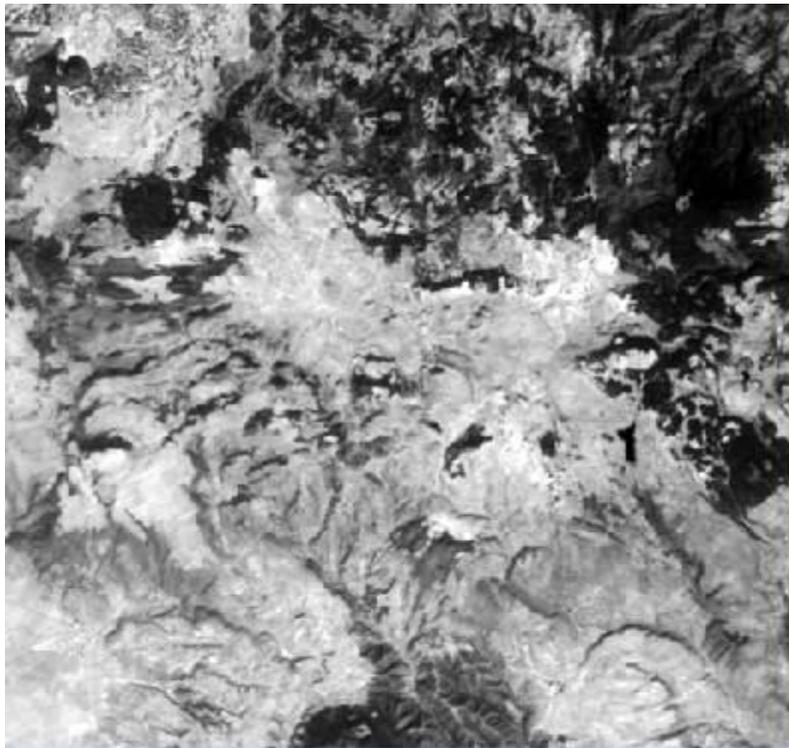


Figura V.8. Cociente de bandas 5,6,7 y 8 de la imagen, ASTER. La imagen muestra un cociente de bandas en donde resaltan los óxidos con tonos claros (valores cercanos a 255).

### 4.3.2 Análisis de Componentes Principales

En la tabla 4 vemos los valores de varianza y covarianza de los datos en las imágenes Landsat, la varianza más pequeña corresponde a la banda 2 mientras que la más grande corresponde a la banda 5. La mayor covarianza la tienen la banda 5 y 7, por otro lado la mínima corresponde a la banda 2 y banda 4.

Tabla 3. Matriz de varianza- covarianza Landsat

	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 7
Banda 1	140.141849	88.103667	173.947923	57.439077	388.321694	292.682519
Banda 2	88.103667	57.203524	112.849991	38.566524	243.901146	185.39662
Banda 3	173.947923	112.849991	226.637701	72.417589	488.520949	375.840591
Banda 4	57.439077	38.566524	72.417589	69.067111	168.451855	108.673612
Banda 5	388.321694	243.901146	488.520949	168.451855	1335.46576	959.558995
Banda 7	292.682519	185.39662	375.840591	108.673612	959.558995	729.059048

La matriz de correlación se muestra en la tabla 5; en ella los valores más cercanos a 1, muestran la alta correlación que existe. Las bandas con mayor correlación son banda 2 con banda 3, y las menos correlacionadas son las bandas 4 y 7.

Tabla 4. Matriz de correlacion Landsat

	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 7
Banda 1	1	0.984008	0.976044	0.583832	0.897618	0.915654
Banda 2	0.984008	1	0.991115	0.613569	0.882442	0.907839
Banda 3	0.976044	0.991115	1	0.578818	0.887975	0.924605
Banda 4	0.583832	0.613569	0.578818	1	0.554656	0.484292
Banda 5	0.897618	0.882442	0.887975	0.554656	1	0.972465
Banda 7	0.915654	0.907839	0.924605	0.484292	0.972465	1

En la Tabla 6 podemos ver las componentes generadas a partir de la matriz de covarianza, los valores característicos obtenidos y la varianza correspondiente a cada componente.

La componente 1 (C1) tiene una contribución positiva de todas las bandas con un mayor valor en la banda 5 que contiene el 94.58 % de la varianza, por lo que no revela rasgos espectrales significativos sino únicamente información de la topografía y la sombra. La componente 2 (C2) tiene el 2.75% de varianza y la mayor contribución la hace la banda 4.

La mayor diferencia entre el máximo valor de la banda 4 (reflectancia alta de la vegetación) y el mínimo valor de la banda 3 (baja reflectancia de la vegetación, se encuentra en la componente 3. En la componente 4 se tiene mayor diferencia entre la banda 5 y 7 (alta y baja reflectancia de hidróxilos). Finalmente, el componente 5 en donde existe mayor diferencia entre la banda 3 y la banda 1.

Tabla 5. Componentes Principales Landsat

COMPONENTE	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6
% Varianza	94.570311	2.748427	2.024841	0.508122	0.130564	0.017737
Valor característico	2418.70658	70.293078	51.78683	12.995612	3.339266	0.453634
Banda 1	0.225106	0.42619	-0.127321	-0.404234	0.740483	-0.199395
Banda 2	0.142378	0.320378	-0.075723	-0.141601	-0.07027	0.91998
Banda 3	0.285732	0.58809	-0.255015	-0.110182	-0.619351	-0.334276
Banda 4	0.09462	0.43789	0.780299	0.428105	0.078729	-0.031004
Banda 5	0.737313	-0.413364	0.359918	-0.372828	-0.129983	-0.007844
Banda 7	0.542982	-0.085164	-0.41787	0.694355	0.200144	0.033391

Los valores numéricos de las componentes son valores de brillantez, al ser vistos en una imagen, los positivos son tonos brillantes y los negativos son tonos oscuros. Para

poder realizar un realce de la brillantez se deben buscarlos mayores valores de las componentes en las bandas de mayor reflectancia. Las bandas de mayor reflectancia son: 3 para óxidos, 4 para vegetación y 5 para hidróxilos, estos deben tener un valor positivo para que se visualicen en colores claros.

Una vez analizados los componentes principales, se realizó una imagen en falso color con los componentes 2, 3 y 5 (Figura V.9.).

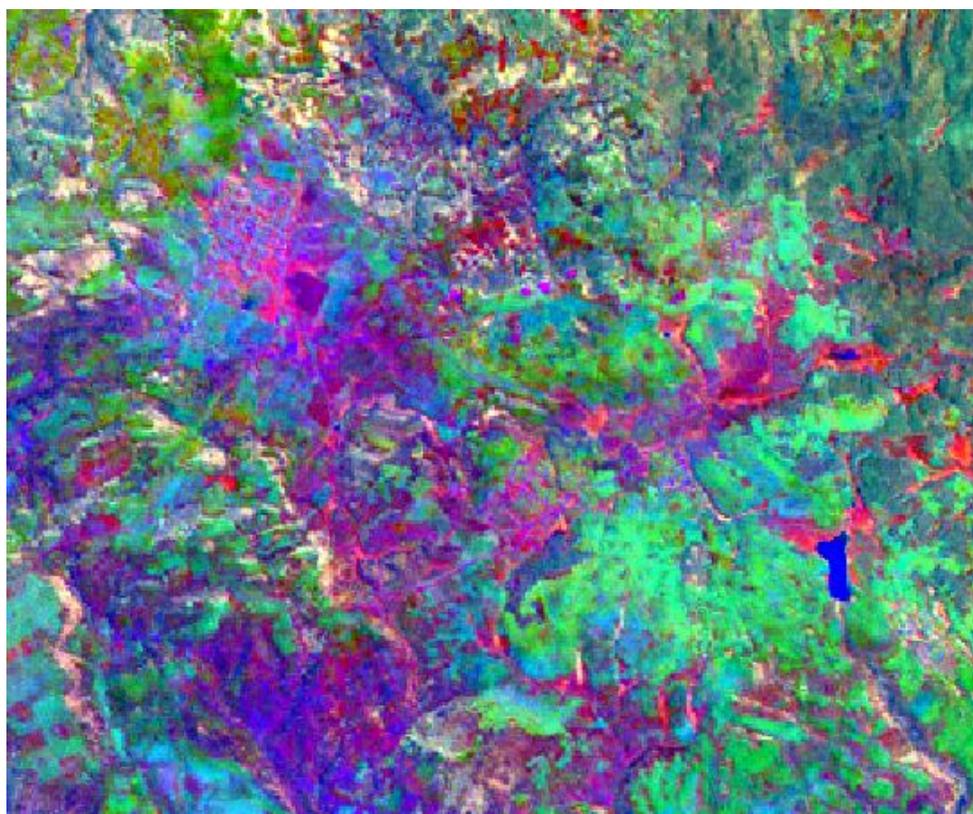


Figura V.9.Falso color de componentes principales en los canales RGB, con las componentes 3, 4 y 5 respectivamente. Los tonos cian representan la vegetación, con tonos rojos y magentas se identifican a los hidroxilos y los tonos verde son óxidos

El ACP fue aplicado tanto a imágenes Landsat como en las ASTER. La diferencia principal fue la utilización de bandas. En las imágenes Landsat sólo se utilizó el infrarrojo medio y la porción del visible, mientras que en la imagen ASTER, se utilizaron las bandas del infrarrojo cercano e infrarrojo medio.

En la tabla 7 se observan los valores de varianza y covarianza obtenidos de la imagen ASTER. La varianza más pequeña corresponde a la banda 7 mientras que la más grande corresponde a la banda 4. La mayor covarianza la tienen la banda 6 y 4; por otro lado la mínima varianza corresponde a la banda 9 y banda 7.

Tabla 6. Matriz de varianza y covarianza ASTER

VAR/COVAR	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7	Banda 8	Banda 9
Banda 4	1732.968364	1545.484239	1660.814888	1527.759998	1607.047402	1555.877825
Banda 5	1545.484239	1407.434091	1509.414849	1380.214493	1456.666584	1410.097894
Banda 6	1660.814888	1509.414849	1631.126064	1483.513195	1566.915253	1513.552117
Banda 7	1527.759998	1380.214493	1483.513195	1404.669089	1471.447131	1408.17223
Banda 8	1607.047402	1456.666584	1566.915253	1471.447131	1558.996551	1490.098443
Banda 9	1555.877825	1410.097894	1513.552117	1408.172230	1490.098443	1446.831635

La matriz de correlación se muestra en la tabla 8. En ella los valores, más cercanos a 1, muestran la alta correlación que existe. Las bandas con mayor correlación son banda 5 y 6, mientras que la menor correlación se encuentra en las bandas 8 y 4. A diferencia de las imágenes Landsat, en esta matriz las imágenes ASTER tienen en su mayoría información abundante ya que la diferencia entre la banda 8 y 4 es de 0.018498 mientras que en las Landsat es de 0.506858.

Tabla 7. Matriz de correlacion ASTER

COR MATRX	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7	Banda 8	Banda 9
Banda 4	1	0.98959	0.98783	0.979203	0.977712	0.982587
Banda 5	0.98959	1	0.99621	0.981625	0.983385	0.988158
Banda 6	0.98783	0.99621	1	0.980078	0.982605	0.985246
Banda 7	0.979203	0.981625	0.980078	1	0.99434	0.987779
Banda 8	0.977712	0.983385	0.982605	0.99434	1	0.992164
Banda 9	0.982587	0.988158	0.985246	0.987779	0.992164	1

Los resultados que arrojó la matriz de componentes fue igual que los resultados obtenidos de las imágenes Landsat, en la componente C1, todos los valores fueron positivos con un mayor valor en la banda 5. La C1, contiene el 98.82 % de la varianza por lo que no revela rasgos espectrales significativos sino únicamente información de la topografía y la sombra. La componente 2 C2, tiene el 0.620718 % de varianza y la mayor contribución la hace la banda 7.

Tabla 8. matriz de componentes Principales

COMPONENTE	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6
% Varianza	98.825231	0.620718	0.245054	0.181239	0.0757	0.052066
Valor característico	5.929513	0.037243	0.014703	0.010874	0.004542	0.003124
Banda 4	0.40738	-0.432989	-0.754484	-0.197143	0.195144	-0.019244
Banda 5	0.408901	-0.364387	0.313151	0.095852	-0.418296	-0.646374
Banda 6	0.408419	-0.394183	0.407596	0.358251	0.265724	0.55922
Banda 7	0.407801	0.490367	-0.312989	0.458851	-0.488717	0.214216
Banda 8	0.408296	0.488502	0.103057	0.065081	0.657941	-0.383298
Banda 9	0.408692	0.212765	0.240776	-0.780271	-0.211207	0.276219

Con los resultados obtenidos de los procesamientos mencionados anteriormente con las imágenes Landsat y la imagen ASTER, se hicieron polígonos de los materiales de interés. Los polígonos mostraban la localización de los óxidos e hidróxilos en el área de estudio (Figura V.10.)

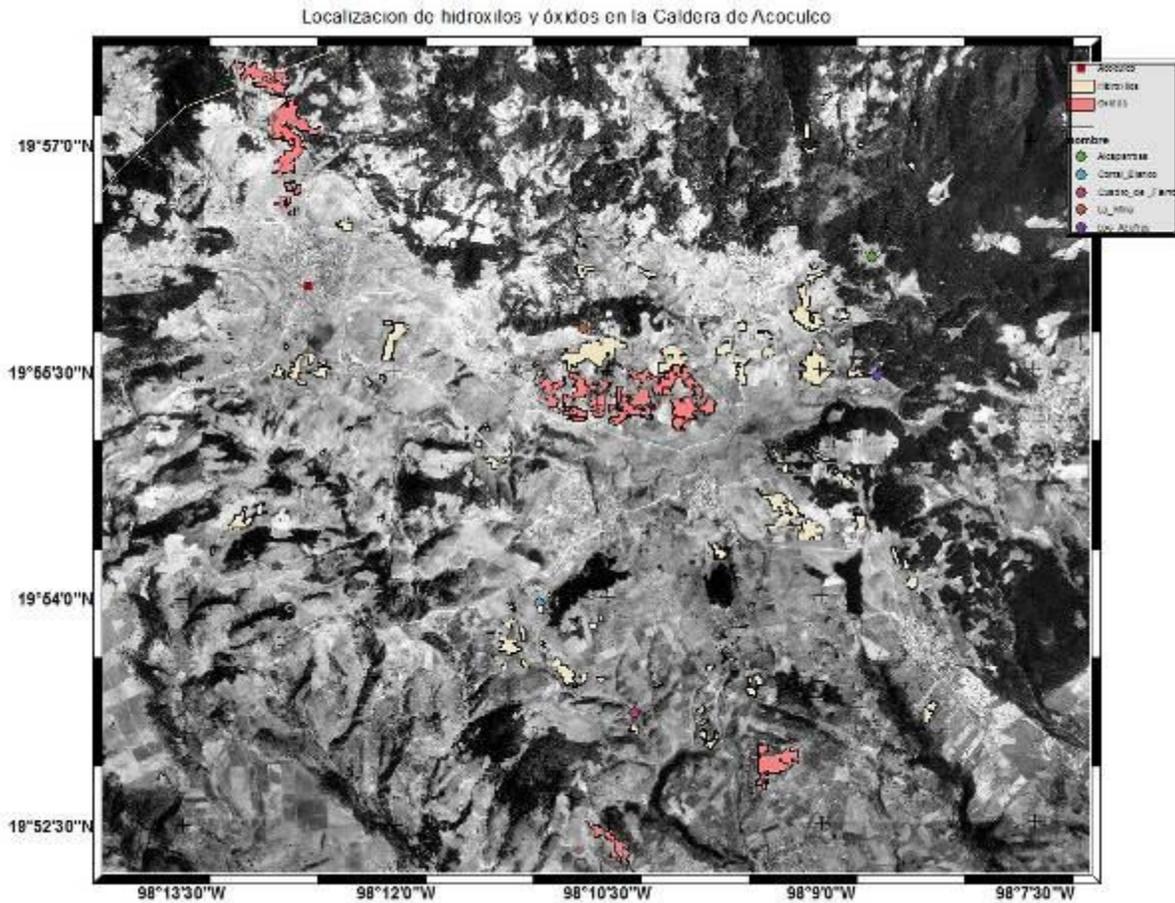


Figura V.10. Mapa resultante de aplicar las diferentes técnicas donde el color rosa representa los óxidos y los amarillos los hidróxilos.

La comparación entre gráficas dieron como resultados la presencia de arcillas como la alunita, illita y esmectita en los puntos identificados como hidróxilos. En los puntos marcados como óxidos se encontraron algunos materiales oxidados (ver apartado anexo). De acuerdo con los minerales y las arcillas encontrados, se puede constatar que los puntos verificados en campo son sitios potenciales de contener materiales que conforman a un sistema hidrotermal.



Figura V.11. Mapa de muestreo suelos Acozulco, Puebla. El círculo azul muestra a AC-18, el círculo rojo indica AC-22, El círculo magenta hace referencia a ACOC-03, el círculo verde militar es AC-21, finalmente el círculo cian es, AC-27

Tabla 9. De muestreo

NOMBRE	FECHA	LATITUD	LONGITUD	DESCRIPCION	MUESTRAS
AC-18	01-mar-12	19° 55' 31.01" N	98° 09' 36.05" W	AFLORAMIENTO	AC18A, B, C, D, E
AC-21	02-mar-12	19° 55' 39.04" N	98° 10' 06.09" W	AFLORAMIENTO	AC-21 A, B, C
AC-22	02-mar-12	19° 55' 32.04" N	98° 09' 44.09" W	AFLORAMIENTO	AC-22
AC-27	03-mar-12	19° 55' 09.02" N	98° 08' 21.02" W	AFLORAMIENTO	AC-27 A, B, C
ACOC-01	03-may-12	19° 56' 45.02" N	98° 12' 17.01" W	AFLORAMIENTO	ACOC-01
ACOC-02	03-may-12	19° 56' 07.09" N	98° 12' 07.03" W	CANTERA	ACOC-02
ACOC-03	03-may-12	19° 55' 59.05" N	98° 12' 13.00" W	AFLORAMIENTO	ACOC-03
ACOC-04	05-may-12	19° 53' 17.04" N	98° 10' 21.04" W	AFLORAMIENTO	ACOC-04
ACOC-05	05-may-12	19° 53' 04.06" N	98° 10' 22.02" W	AFLORAMIENTO	ACOC-05
ACOC-06	05-may-12	19° 55' 32.00" N	98° 12' 57.08" W	AFLORAMIENTO	ACOC-06

Las muestras tomadas fueron analizadas a través de un espectroradiómetro en el Instituto de Geofísica de la UNAM. Las gráficas obtenidas del espectroradiómetro fueron comparadas con las firmas espectrales de la biblioteca Spectral International INC.

### 5.3 Discusión

Comparando los resultados de la clasificación supervisada, el método que dio mejor resultado fue el mapa de paralelepípedo, ya que este mapa tiene clasificaciones similares al mapa de resultados finales, que se generó a partir de todas las técnicas, sin embargo no fue decisivo este método, sólo sirvió como comparativo.

Las imágenes de satélite ASTER, arrojaron mejores resultados en el método de realce espectral, ya que se requería un mayor detalle en cuanto a los materiales que se encontraban en la superficie terrestre y las imágenes ASTER al contener mayor número de bandas dentro del infrarrojo en comparación con las Landsat aportan un mayor nivel de detalle. También es importante porque se obtuvieron más puntos para verificar el campo como son los puntos al este de la localidad de Acoculco, que con las imágenes Landsat no se habían considerado para muestreo.

El realce visual generó grandes áreas en donde podían ser localizados los hidróxilos y los óxidos. Esta generalidad impide hacer una verificación de campo precisa. Por ello, las técnicas de percepción remota que generan realces espectrales fueron las más útiles para las verificaciones en campo. Dichas técnicas discriminan mejor las respuestas espectrales de los elementos que hay sobre la superficie terrestre, dando como resultado pequeñas áreas con los materiales de interés.

Las firmas espectrales obtenidas con el espectrorradiómetro fueron útiles porque permiten la comparación entre las firmas espectrales obtenidas en los polígonos de entrenamiento (por medio de técnicas de percepción remota) y las firmas espectrales que se encuentran en las bibliotecas de laboratorios espectrales. El cruce de información entre las tres firmas comparadas permite confirmar el tipo de minerales o arcillas que se encuentran en la caldera de Acoculco y con ello saber si el área presenta características de sitios con sistemas hidrotermales potenciales.

Las imágenes Landsat son más fáciles de manipular en comparación con las imágenes ASTER y además, son adquiridas de forma gratuita, sin embargo, las imágenes ASTER tienen una mayor resolución espectral. La mayor cantidad de bandas localizadas en el

infrarrojo que contienen las imágenes ASTER fue decisiva en la elaboración del mapa base, el cual tuvo una mayor precisión al ubicar los puntos con hidróxilos.

Las arcillas como la alunita, la illita y la esmectita según Maskev 2001, López 2009, Prol 1996, son características de los sistemas hidrotermales, es por ello que se puede concluir que hay características de estos sistemas en el sitio de estudio.

Sin embargo, los aportes de este trabajo deben ser sustentados y verificados con trabajos geológicos, geoquímicos y pruebas de laboratorio más a detalle (láminas delgadas, microscopia, difracción de rayos X, microsonda, etc.), ya que alguna arcilla u otros materiales que también son característicos o indicadores de los sistemas hidrotermales potenciales no se pueden encontrar con percepción remota.

## 6. Bibliografía

1. Aguirre Raúl, 2009, *“Conceptos de Geomática y estudios de caso en México”*, UNAM, Instituto de Geografía, México, 365 pp.
2. Anzil Patricia, 2010, *“Discriminación de rocas ultramáficas y su encajonante metamórfico, mediante el procesamiento de imágenes satelitales Landsat 7 ETM+, Sierra Chica, Córdoba”* Revista de la Asociación Geológica Argentina Vol. 66, 557-564 pp.
3. Armstead Christopher, 1989, *“Geothermal energy review of research and development”*, UNESCO, Limusa, Paris, Francia, 499pp.
4. Brantley Steven, 1994, *“Volcanoes of the United States”*, USGS General Interest Publication, Estados Unidos en: [http://vulcan.wr.usgs.gov/Glossary/Caldera/description\\_caldera.html](http://vulcan.wr.usgs.gov/Glossary/Caldera/description_caldera.html)
5. Browne Patrick, 1996, *“Geochemical characterisation of hydrothermally altered ignimbrites in active geothermal fields from the central Taupo Volcanic Zone, New Zealand”*, Journal of Volcanology and Geothermal research, Vol. 73, 79-97pp.
6. Canada Centre of Remote Sensing et al, (CCRS/CCT), 1997, *“Fundamentals of Remote Sensing, Canada”*, 252 pp en: [http://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/files/pdf/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals\\_e.pdf](http://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/files/pdf/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_e.pdf)
7. Canet Carles et al, 2010, *“A statistics-based method for the short-wave infrared spectral analysis of altered rocks: An example from Acochulco Caldera, Eastern Trans- Mexican Volcanic Belt”*, Journal of Geochemical Exploration, Vol.105, 1-10 pp.
8. Campbell James, 2002, *“Introduction to remote sensing”*, Guilford Press, Nueva York, Estados Unidos 621pp.
9. Carleton Mark, 1991, *“Satellite remote sensing in climatology”*, Belhaven Press, Londres, 291 pp.
10. Carleton Mark, 1991a, *“Satellite climatology of “polar lows” and broadscale climatic associations for the Southern Hemisphere”*. International Journal of Climatology”, Vol.10, 219-246pp.
11. Corbett Greg et al., 1998, *“Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration, and Mineralization”*, Society of Economic Geologist, Australia, No. 6 237 pp.
12. Corrales Rafael, 2010, *“Caracterización de alteración hidrotermal y dinámica de cobertura de suelos mediante métodos de teledetección, en el valle de Cholueteca,*

- Honduras*”, Tesis para obtener grado de maestría en Ordenamiento y Gestión del territorio, Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH), Honduras.
13. Chuvieco Emilio, 1996, *“Fundamentos de teledetección especial”*, Ediciones RIALP, Madrid España, 568pp.
  14. De la Torre Yarza, 1992, *“Volcanes de México”*, UNAM Instituto de Geografía, México, 48-53pp.
  15. Ferrari Luca, et al, 1999, *“Space-time patterns patterns of Cenozoic arc volcanism in central México: From the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt”*, *Geology* 27, 306 pp.
  16. Francis Peter, 2004, *“Volcanoes”*, Editorial Oxford University Press, Estados Unidos, 536pp.
  17. Gibson Paul, 2004, *“Introductory remote sensing: Principles and Concepts”*, Nova Science Publishers, Nueva York, Estados Unidos, 189pp.
  18. Goetz, et al., 1985, “Imaging spectrometry for earth remote sensing: Science”, 228, pp 1147-1153.
  19. Gottsmann Joachim, et al., 2008, *“Caldera volcanism: analysis, modelling and response”*, Elsevier, Oxford, 516pp.
  20. Gregg Vane et al., 1985, *“Imaging spectrometry for earth remote sensing. Science ”*, 228, pp 1147-1153.
  21. Hemley Jones, et al., 1964, *“Chemical aspects of hydrothermal alteration with emphasis on hydrogen metasomatism.”* *Economic Geology*, Vol.64, 538-569pp.
  22. Hendry Albert, et al., 1985, “Chemical differences between minerals from mineralizing and barren intrusions from some North American porphyry copper deposits”, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol.89. No.4 317-329pp.
  23. Hubert Barnes, 1967, *“Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits”*, Primera Edición, Holt, Rinehart and Winston Inc. Publication, 500p.
  24. Huízar Rafael, 2005, *“La Laguna de Tecocomulco geo-ecología”*, UNAM Instituto de Geología, México, 20pp.
  25. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2000, “Censo General de población y vivienda 2000, Puebla” en: [http://www.inegi.org.mx/lib/Olap/consulta/general\\_ver4/MDXQueryDatos.asp?#Regreso&c=10261](http://www.inegi.org.mx/lib/Olap/consulta/general_ver4/MDXQueryDatos.asp?#Regreso&c=10261)
  26. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2007, *“Boletín de los sistemas nacionales estadístico y de información Geográfica”*, INEGI, Vol. 3, No 1 123-140. en:

[http://www.inegi.gob.mx/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/espaciales/BoletinSNEIG/2007/Bsneig6.pdf](http://www.inegi.gob.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/espaciales/BoletinSNEIG/2007/Bsneig6.pdf)

27. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2009, "*Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Chignahuapan, Puebla*", INEGI.
28. Kidder Stanley, 1995, "*Satellite Meteorology an introduction*", Academic Press, Estados Unidos, 446 pp.
29. Lattus José, 2002, "*Detección de minerales utilizando clasificación por arboles de decisión en imágenes ASTER*", Universidad de Chile, Chile.
30. Lira Jorge, 1987, "*La percepción remota: nuestros ojos desde el espacio*", Fondo Cultura Económica, México, 151pp.
31. López Aida et al., 2009, "Hidrothermal activity in the Tulancingo-Acocolco Caldera complex central México: Exploratory studies", *Geothermics*, Vol.38. No.3 279-293 pp.
32. Lugo José, 1989, "*Diccionario Geomorfológico*", UNAM Instituto Geografía, México DF, 28 pp.
33. Lugo José, 1996, "*La superficie de la Tierra: un vistazo a un mundo cambiante*", Fondo de Cultura Económica, México DF, pp. 42-54.
34. Machatschek Federico, 1951, "*Terminología geomorfológico*", Instituto de estudios geográficos Argentina, Buenos Aires, Argentina, pp. 26.
35. Marín Graciela et al, 2003, "*Procesamiento y productos ASTER del área de Sierra de Famatina, Provincia de la Rioja, República Argentina*", INPE, Brasil, 815-822 pp.
36. Martínez Julio, 2005, "*Percepción Remota: Fundamentos de teledetección espacial*", Comisión Nacional del Agua, México, 62 pp.
37. Maskev Víctor, 2001, "*Metalogénesis*", Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Chile, 20pp. En: <http://www.cec.uchile.cl/~fegallar/Metalogenesis.pdf>
38. Maskev Víctor, 2001a, "*Alteración Hidrotermal*", Facultad de ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago de Chile, 14pp en: <http://www.cec.uchile.cl/~vmaksaev/ALTERACION.pdf>
39. Meyer, et al.; 1967, "*Wall Rock Alteration*". *Geochemistry of Hydrothermal, Ore Deposits*, Primera Edición, Hubert L. Barnes , Holt, Rinehart and Winston, Inc. Publication, 166-235.
40. Molnar, et al; 1969, "*Tectonics of the caribbean and Middle America regions from focal mechanisms and seismicity*", *Geology Society, Am. Bulletin*, vol. 80, Nueva York pp. 1639-1684.

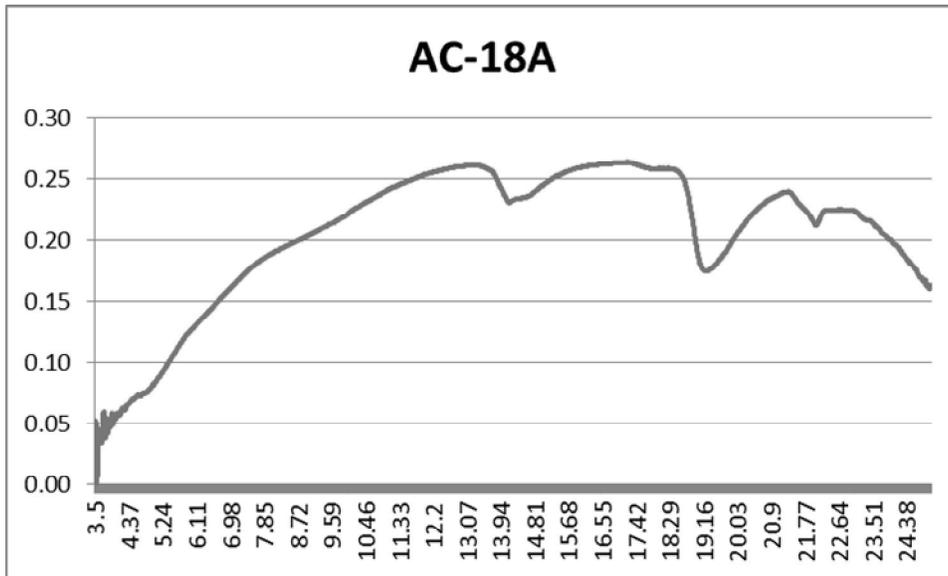
41. Pedraza Javier, 1996, "*Geomorfología: Principios, métodos y aplicaciones* "; Rueda, España, 414pp.
42. Pérez Carlos, et al., 2006, "*Teledetección Nociones y aplicaciones.*", Universidad de Salamanca, España, 343 pp.
43. Prol Rosa M., 1996, "*El calor de la Tierra*", Fondo de Cultura Económica, México, 105 pp.
44. Prol Rosa M., Ruiz Juan R., 1995, "Técnicas de procesamiento de imágenes en la exploración de yacimientos minerales de origen hidrotermal", *Física de la Tierra*, No.7, pp. 105-138.
45. Rencz Andrew, 1999, "*Remote sensing for the Earth sciences*", John Wiley & Sons Inc., Estados Unidos de America, 745pp.
46. Ruiz-Armenta et al., 1995, "*Técnicas de procesamiento de imágenes en la exploración de yacimientos minerales de origen hidrotermal*", *Física de la Tierra*, No.7, pp. 105-138.
47. Rye Robert et al, 1992, "The stable isotope geochemistry of acid sulfate alteration: *Economic Geology*", Vol.87, No.2, 225-262 pp.
48. Salinas Adolfo, 2006, "*Geografía*", Pearson, México, 192 pp.
49. Slapak Sara, 1988, "Sistemas ambientales complejos: Herramientas de análisis espacial. Karszenbarum, Haydee". En: *Procesamiento de imágenes satelitales para gestión ambiental*. Capítulo. 8, Eudeba, Argentina.
50. Sobrino José et al., 2000, "Teledetección", servicio de publicaciones Universidad de Valencia, España, 355 pp.
51. Stoffregen Robert, 1987, "Genesis of acid-sulfate alteration and Au-Cu-Ag mineralization at Summitville, Colorado", *Economic Geology*, Vol. 82, 1575-1591pp.
52. Tomasso I Di et al, 2005, "Mapeo de alteración hidrotermal a partir de datos ASTER en el pórfido de Cu - Mo El Infiernillo, Mendoza, Argentina", INPE, Brasil, 1765-1773 pp.
53. Viñals Jaime, 2008, "*Guatemala Tierra de volcanes*", Empresa eléctrica de Guatemala, Guatemala, 150 pp.
54. Vincent Robert, 1997, "*Fundamentals of geological and environmental remote sensing*", Prentice Hall, New Jersi, Estados Unidos, 370 pp.
55. Wicander Ree et al, 2000, "*Fundamentos de geología*", Thomson Editores, Estados Unidos.
56. Williams Howel, 1979, "*Volcanology*", Freeman Editor, Estados Unidos, San Francisco, 397 pp.
57. Wohletz Kenneth et al., 1992, "*Volcanology and geothermal energy*", University of California Press, Estados Unidos, 141-175pp.

## Páginas en internet

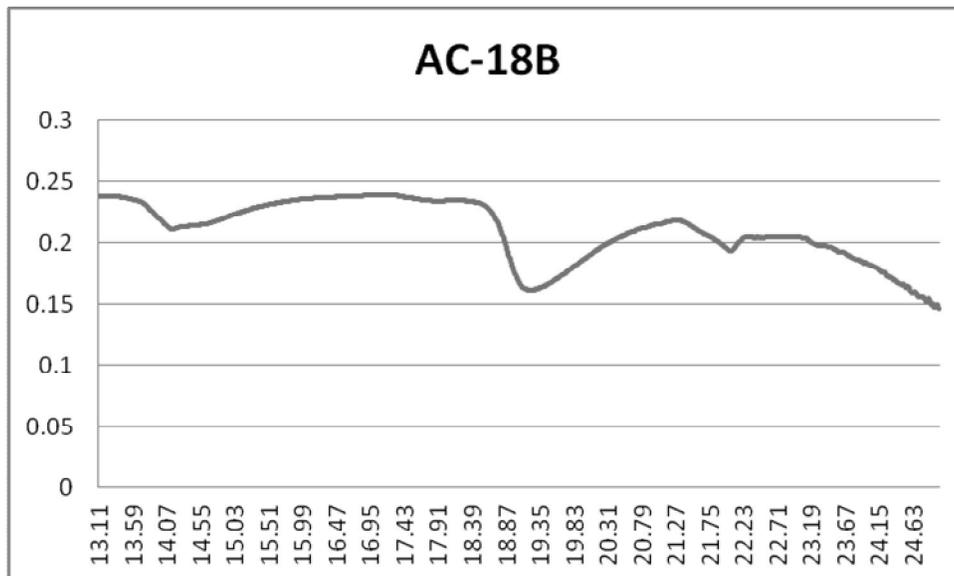
1. ASTER <http://asterweb.jpl.nasa.gov/characteristics.asp>. Consultada en agosto 2012
2. Enciclopedia de los municipios [http://www.e-local.gob.mx/wb/ELOCAL/ELOC\\_Enciclopedia#](http://www.e-local.gob.mx/wb/ELOCAL/ELOC_Enciclopedia#) consultada en febrero 2012
3. Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC)  
[http://gds.aster.ersdac.jpacesystems.or.jp/gds\\_www2002/entrance\\_e/gdshistory\\_e/set\\_gdshistory\\_e.html](http://gds.aster.ersdac.jpacesystems.or.jp/gds_www2002/entrance_e/gdshistory_e/set_gdshistory_e.html) consultada en agosto 2011
4. U.S. Geological Survey (USGS) <http://glovis.usgs.gov/> Consultada en mayo 2011
5. Instituto Nacional de Estadística y Geografía  
<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/ImgSatelite/Elementos.aspx>.  
Consultada en septiembre 2011
6. National Aeronautics and Space Administration NASA  
<http://science.hq.nasa.gov/kids/imagers/ems/waves3.html>. Consultada en febrero 2012
7. Servicio Meteorológico Nacional (SMN) <http://smn.cna.gob.mx/> .Consultada en noviembre 2011
8. Jet Propulsion Laboratory, Biblioteca spectral <http://speclib.jpl.nasa.gov/> . Consultada en marzo 2012
9. Universidad de Murcia <http://www.um.es/geograf/sig/teledet/clasific.html> . Consultada en mayo2012

# ANEXO

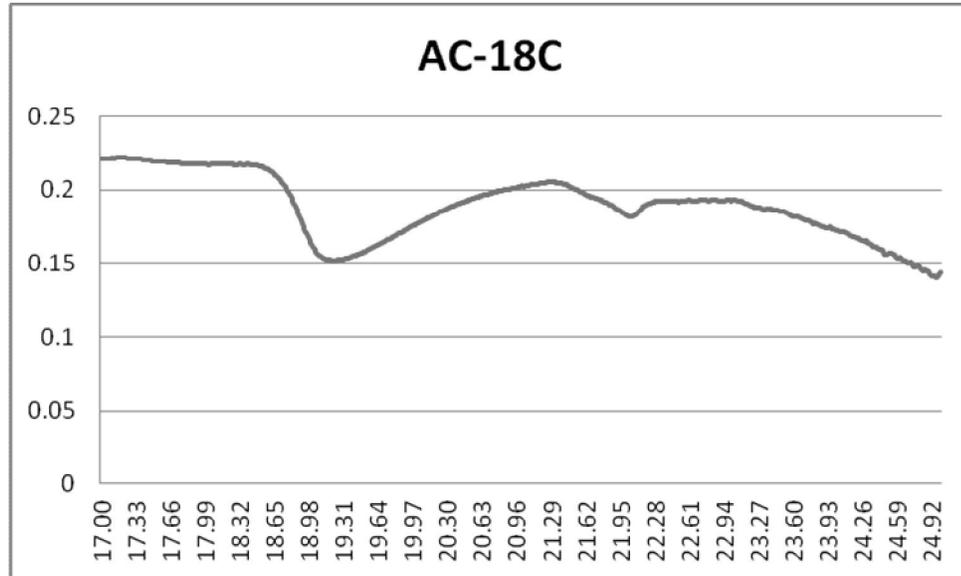
Resultados de las firmas espectrales por medio del espectrómetro infrarrojo



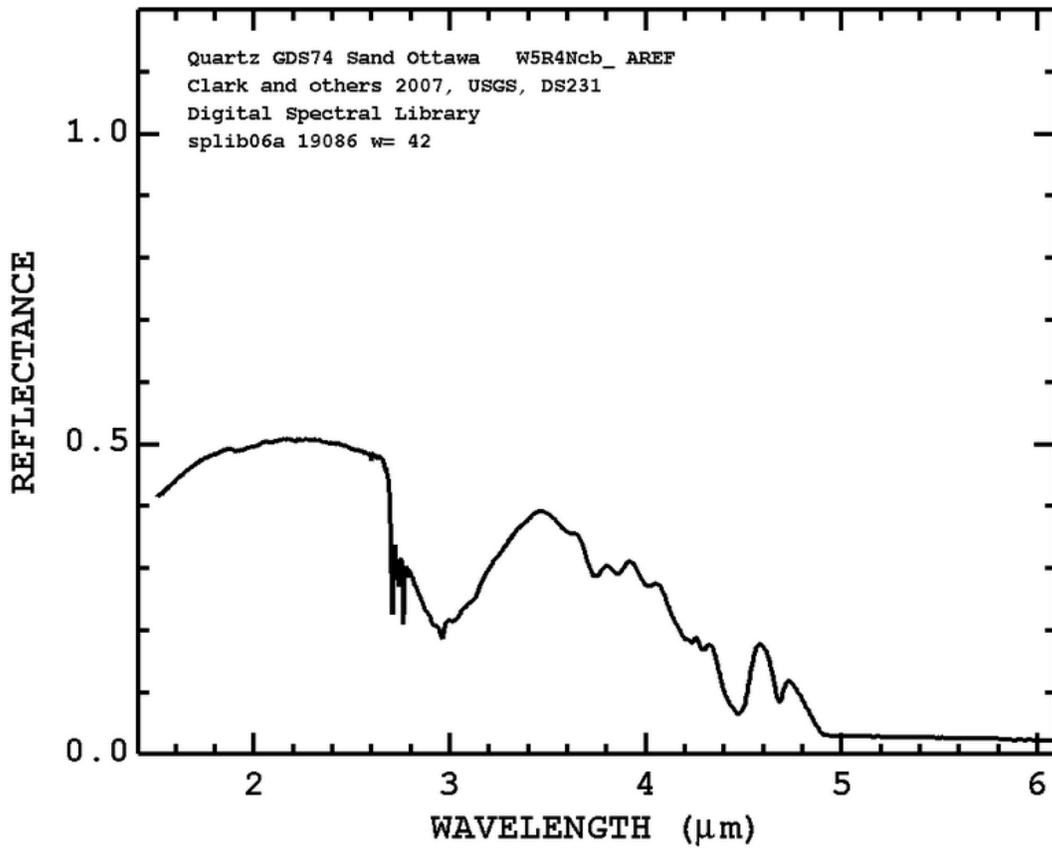
Firma espectral de la muestra AC-18A



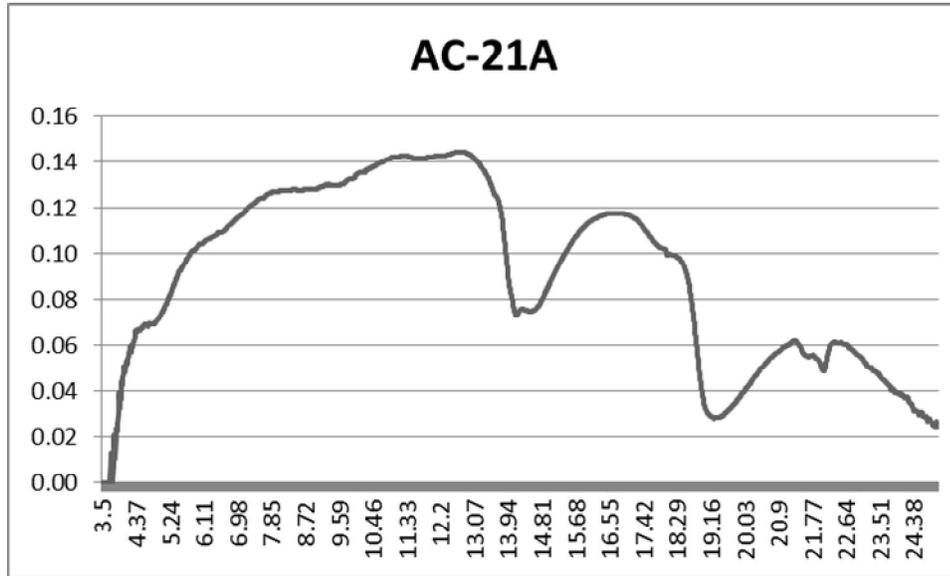
Firma espectral de la muestra 18B



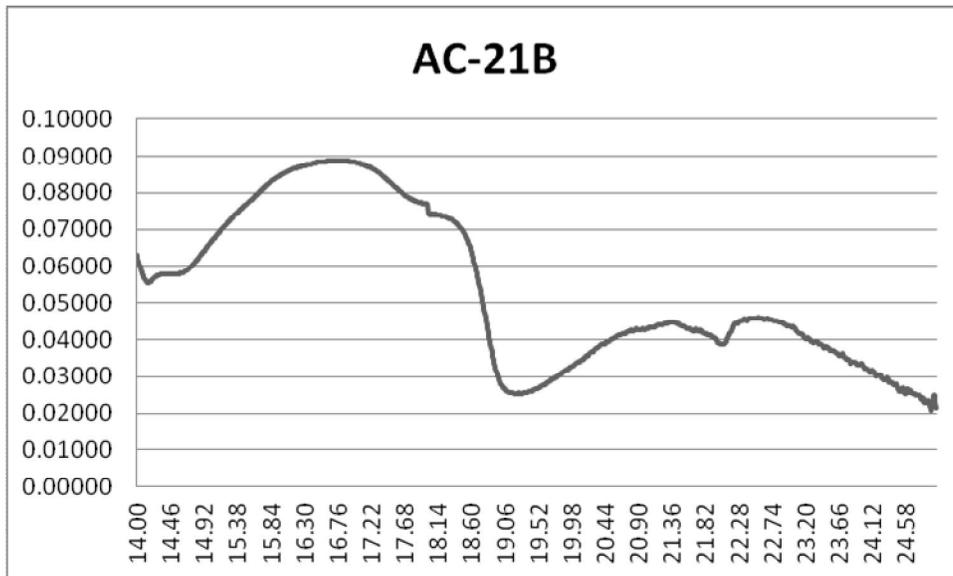
Firma espectral de la muestra AC-18C



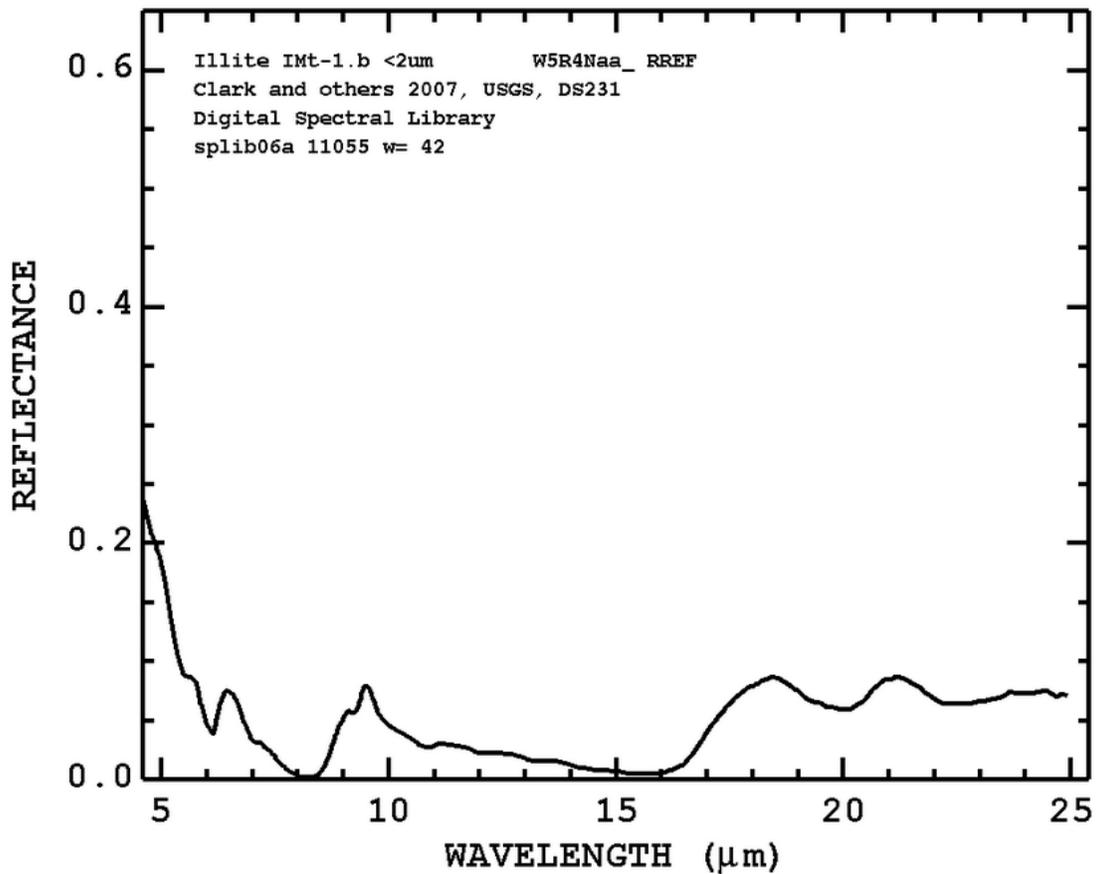
Firma espectral del mineral cuarzo, donde se ve la similitud con la firma espectral tomada de la muestra AC-18 (Librería espectral de la NASA 2012)



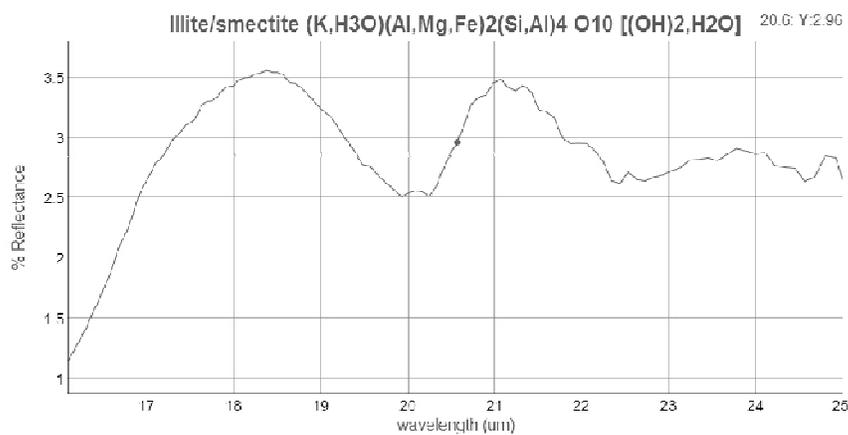
Firma espectral de la muestra AC-21A



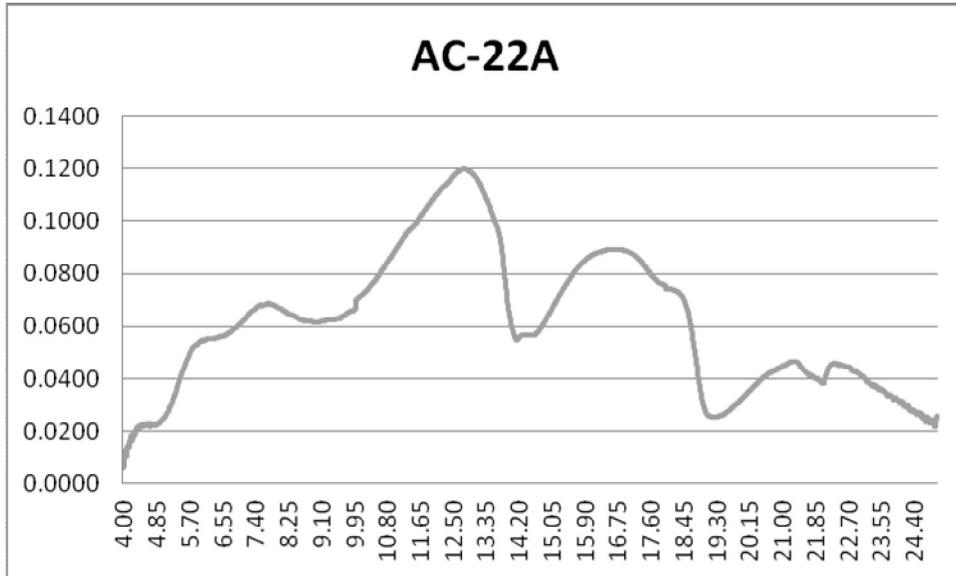
Firma espectral de la muestra AC-21B



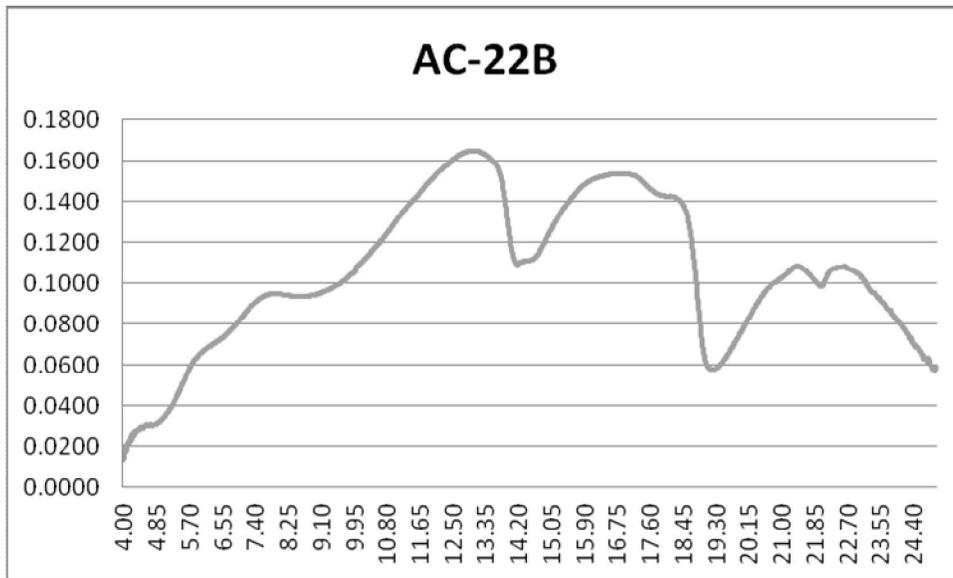
Firma espectral illita (Librería espectral de USGS, 2012)



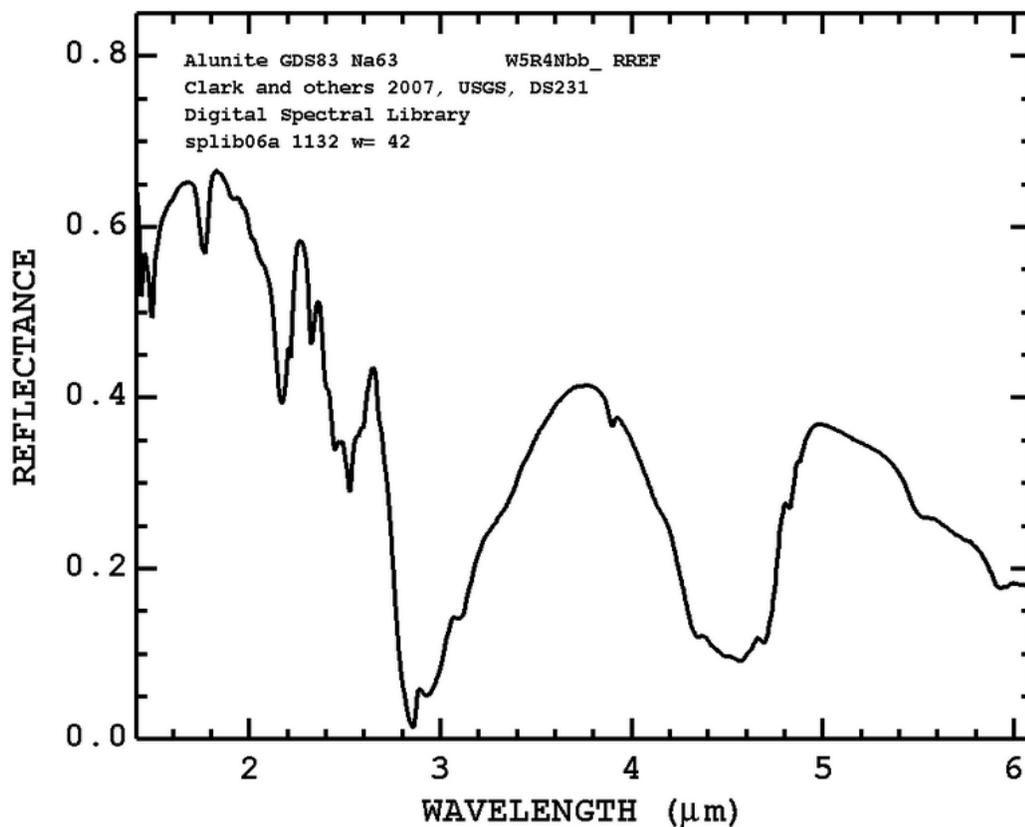
Firma espectral illita/esmectita (Librería espectral de la NASA, 2012)



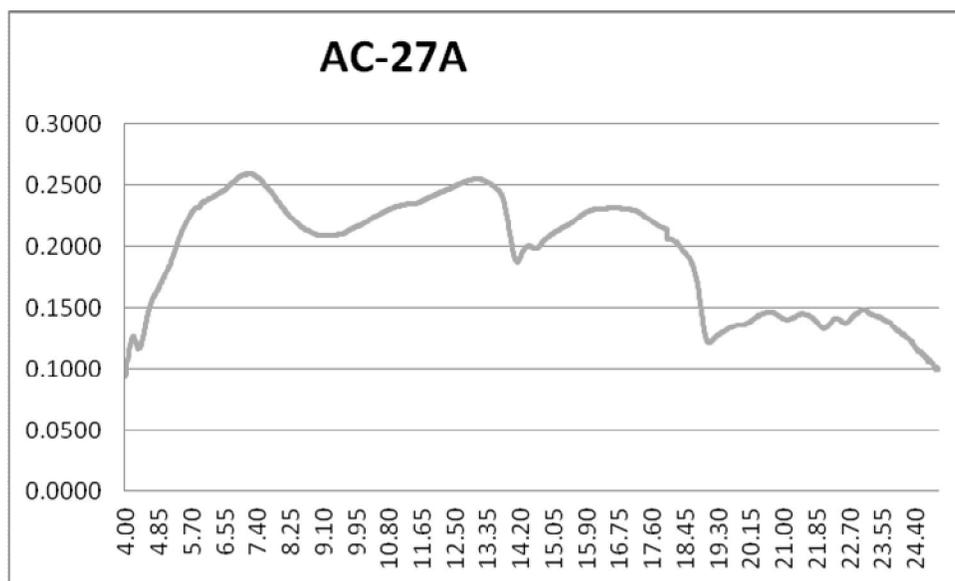
Firma espectral de la muestra AC-22A



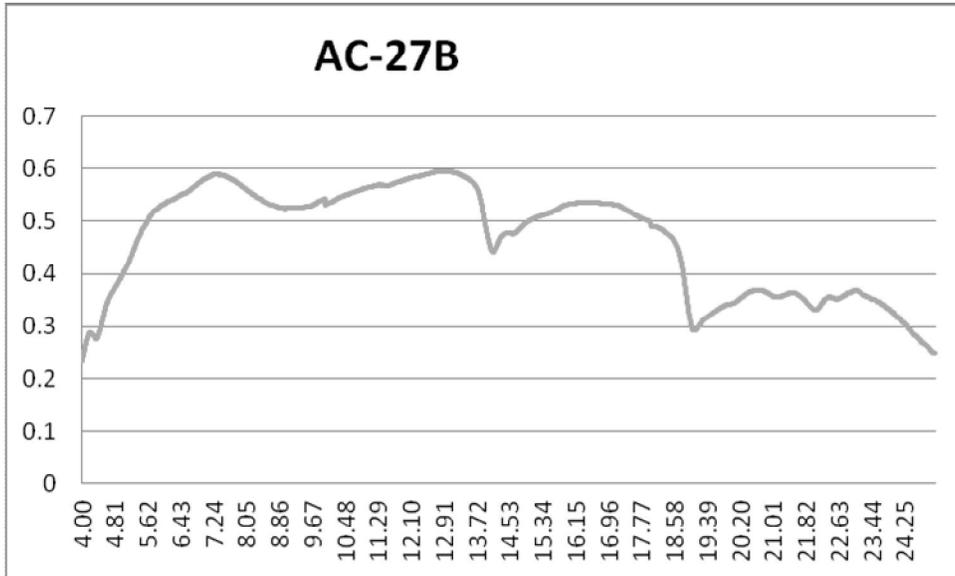
Firma espectral de la muestra AC-22B



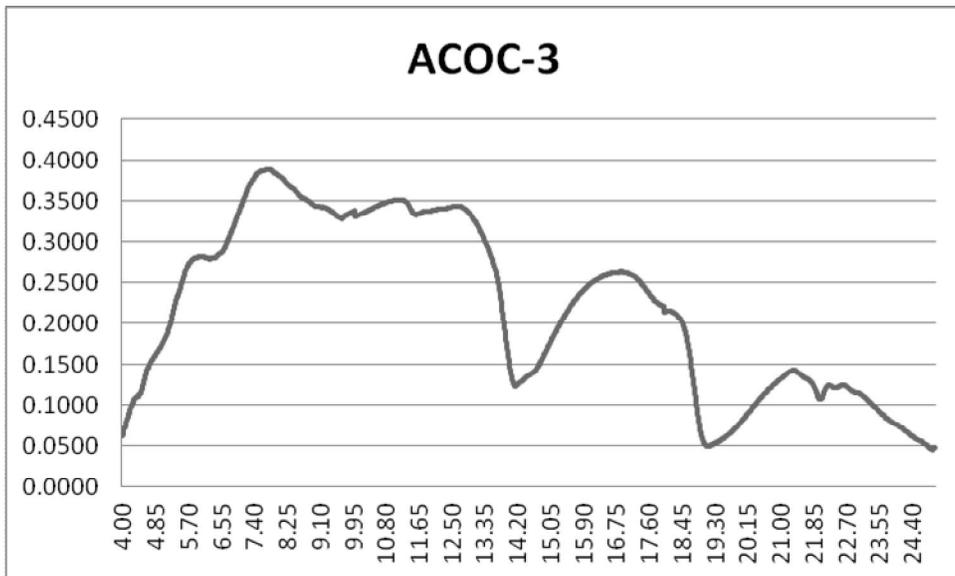
Firma espectral del mineral alunite, donde se ve la similitud con la firma espectral tomada de la muestra AC-22 (Librería espectral de la USGS 2012)



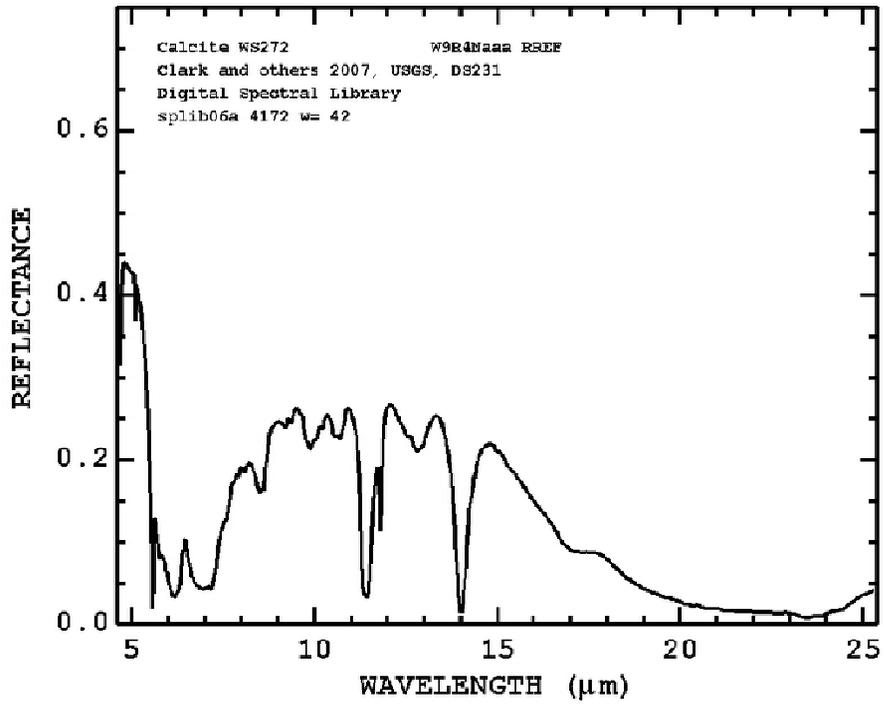
Firma espectral de la muestra AC-27A



Firma espectral de la muestra AC-27B



Firma espectral de la muestra ACOC-3



Firma espectral del mineral calcita, (Libería espectral de la USGS 2012)

Área de estudio.



AC-18 Deposito de caída de bloques y cenizas donde se podía distinguir cuarzo.



AC-18 C, Muestra obtenida en campo donde se puede distinguir cuarzo y ópalo.



AC-21 C , En esta muestra se puede apreciar el gran grado de alteración, en color amarillento, en el lugar se percibía un fuerte olor a azufre.



Muestra AC-21A, Según la firma espectral dio como resultado illita/esmectita



AC-22, Cantera, donde explotan arena silica, existen piedras pómez y ceniza de color predominantemente blanco, también se observa una zona color amarilla próxima a una oxidación.



AC-22, Según la firma espectral dio como resultado alunita.



AC-27, La roca localizada en este punto era una roca riolita; en este punto también se tomó muestra de suelo el cual contenía sublimados de azufre.



ACOC3, En la muestra se ven pequeños fragmentos de obsidiana y opalo en una matriz de roca ígnea.



AC-01 Los Azufres, donde las aguas alcanzaban altas temperaturas y como su nombre lo indica se percibía un olor a azufre.