



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**LOCALIZACIÓN DE ZONAS CON
POTENCIAL GEOTÉRMICO USANDO
TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA, EN
EL CENTRO-ORIENTE DE SONORA,
MÉXICO**

TESIS

Para obtener el título de
INGENIERA GEOFÍSICA

P R E S E N T A

KARLA ALINE LÓPEZ LARA

DIRECTOR DE TESIS

DRA. ROSA MARÍA PROL LEDESMA



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017

Agradecimientos

Si tuviera que enumerar a todos aquellos seres que de alguna manera han contribuido en las vivencias que permitieron la realización de este trabajo, probablemente abarcaría muchas páginas. Sin embargo, haré público mi agradecimiento para aquellos que directamente me apoyaron en este esfuerzo:

A la mujer que además de darme la vida, me enseñó a no tener miedo y a esforzarme por alcanzar mis objetivos. Por siempre darme palabras de aliento, por respetar mis decisiones y apoyarme incondicionalmente.

A mi padre, de quien aprendí a luchar contra toda forma de mediocridad. Quien me enseñó con el ejemplo a ser una persona amable, generosa, empática, respetuosa, inteligente, prudente, etc.

A mi hermano Ulises, por ser mi eterno cómplice y confidente, por transmitirme sus consejos y experiencias que han sido útiles para forjar mi propio sendero.

A mi asesora Rosa María Prol, por ser mi guía en esta tesis. Por tener vocación, paciencia, convicción y pasión al ayudar a los estudiantes en su búsqueda por la verdad a través del camino de la ciencia.

A Augusto Rodríguez, Luca Ferrari, Oswaldo Sánchez y Claudia Arango por sus consejos y correcciones en el presente trabajo. Por su compromiso y dedicación de apoyar a nuevas generaciones de profesionistas en Ciencias de la Tierra.

A la UNAM, mi alma mater, por ser una universidad del pueblo para el pueblo que me brindó además de conocimientos técnicos y científicos, cultura, deporte y diversión, factores que contribuirán directamente en mi realización profesional.

A la facultad de Ingeniería, al Instituto de Geofísica y al proyecto P-01 CeMIE-Geo “Mapas de Gradiente Geotérmico y Flujo de Calor para la República Mexicana” por la beca otorgada, que fue de gran utilidad para el desarrollo de la presente investigación.

Al pueblo mexicano en general, que pagó con sus impuestos mi educación. Le agradezco la oportunidad y me siento afortunada y comprometida en poder regresarle parte de lo que me dio aplicando mis conocimientos para el progreso de la sociedad mexicana menos favorecida. A mis amigos y amigas, que me enseñaron la diversidad de pensamiento que puede existir, que no tenemos que ser iguales para estar juntos. Con los que compartí momentos mágicos que fueron de gran motivación para mi carrera.

A los árboles, las montañas, los ríos, los mares y a todos los animales, en especial a mi perro Wakamole, que me regalaron secretos de armonía y poder, enseñándome que la comunicación y el entendimiento van más allá de cuestiones humanas.

Por un país sin explotados ni explotadores...

ÍNDICE

RESUMEN	6
ABSTRACT	7
1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. Identificación del problema	9
1.2. Justificación	9
1.3. Objetivos	10
1.3.1. Objetivo general	10
1.3.2. Objetivos específicos	10
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1. Energía geotérmica	11
2.2. Etapas de exploración de un proyecto geotérmico	12
2.3. Energía geotérmica en México	14
2.4. Fundamentos de Percepción Remota	15
2.4.1 Definición	15
2.4.2 Desarrollo histórico	15
2.4.3 Aplicaciones	16
2.4.4 Elementos en la Percepción Remota	18
2.4.5 Principio físico de la Percepción Remota	20
2.4.6 Firma espectral	24
2.4.7 Propiedades espectrales de algunos materiales de nuestro interés	24
2.4.8 Asociaciones minerales producto de alteración hidrotermal	27
2.4.9 Tipos de resolución en los instrumentos	35
2.5. Especificaciones del sensor ASTER	38
3. ÁREA DE ESTUDIO	41
3.1. Localización	41
3.2. Geología regional	41
3.3. Geología local	44

3.4. Antecedentes de exploración en el área de estudio	49
4. METODOLOGÍA	49
4.1. Materiales	49
4.1.1. Hardware y software	49
4.1.2. Imágenes	50
4.2. Preprocesamiento	51
4.2.1. Corrección por Crosstalk (Crosstalk correction)	51
4.2.2. Apilamiento de capas (Layerstacking VNIR-SWIR bands)	53
4.2.3. Cambiar bandas intercaladas (Interleave bands BSQ-BIL)	53
4.2.4. Análisis estadístico	54
4.2.5. Corrección atmosférica	54
4.3. Procesamiento	55
4.3.1. Realce espectral	55
4.3.2. Realce espacial	59
5. RESULTADOS	61
5.1. Resultados del Preprocesamiento	61
5.1.1. Análisis estadístico	61
5.1.2. Corrección atmosférica	64
5.2. Resultados del Procesamiento	64
5.2.1. Realce espectral	64
5.2.2. Realce espacial	77
5.3. Integración de resultados	78
6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	81
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

RESUMEN

Esta tesis representa la primera etapa de un proyecto de exploración geotérmica, debido a que, usando técnicas remotas, es posible identificar evidencias superficiales (alteración hidrotermal y rasgos estructurales) que nos conduzcan a proponer sitios para realizar investigación geológica, geoquímica y geofísica a detalle con el objetivo de encontrar zonas prometedoras en Sonora, estado que actualmente no es considerado de importancia desde el punto de vista geotérmico.

El área de estudio se eligió a partir de la presencia de manifestaciones geotermales superficiales ubicadas en la región centro oriental de Sonora. Dichos manantiales, fueron reportados y analizados por Almirudis et al. (2015), cuyos resultados estiman temperaturas aproximadas de 150°C, calculadas con el geotermómetro de Na/K.

Se usaron imágenes provenientes del sensor ASTER L1T debido a que éstas cuentan con un amplio rango de información espectral en la región del VNIR-SWIR (9 bandas), además de la óptima resolución espectral, espacial, radiométrica y temporal para nuestros propósitos.

El procesamiento de las imágenes consistió en aplicar un realce espectral y espacial. Para el realce espectral, se usó el Análisis de Componentes Principales (*PCA* por sus iniciales en inglés) porque dicha técnica permitió distinguir zonas de vegetación, oxidación y de alteración fílica-argílica-argílica avanzada. Mientras que para el realce espacial se filtraron las imágenes para identificar lineamientos asociados a fallas y fracturas.

Posteriormente, la información espectral y espacial se integró y se relacionó con la ubicación de los manantiales y las zonas mineras. Al poner en un mapa lo anterior, fue posible proponer al menos tres zonas de interés: Tonibabi, Granados y Divisaderos, debido a que en estas regiones coexisten zonas con alteración hidrotermal y abundancia de patrones de fracturamiento, minas abandonadas, así como características geoquímicas adecuadas para inferir la presencia de anomalías geotérmicas.

ABSTRACT

This thesis represents the first stage within a whole geothermal exploration project because, by using remote techniques, it is possible to identify surface evidences (hydrothermal alteration and structural features) that may lead to suggest sites to make detailed geological, geochemical and geophysical research in order to find promising zones in Sonora, a state of no geothermal importance nowadays.

The study area was chosen because of the presence of shallow geothermal manifestations located in the center-east of Sonora. These hot springs were reported and analyzed by Almirudis et al. (2015), whose results estimate temperatures around 150°C, calculated with the Na/K geothermometer.

ASTER L1T images were used because they have a wide spectral information range in VNIR-SWIR (9 bands) region, but also the optimal spectral, spatial, radiometric and temporal resolution for our purposes.

The image processing consisted in applying a spectral and spatial enhancement. For the spectral enhancement, Principal Component Analysis (PCA) was used due to this technique allowed to distinguish vegetation, oxidation and phyllic-argillic-advanced argillic alteration zones. Meanwhile, for the spatial enhancement, the images were filtered to identify lineaments associated with faults and fractures.

Subsequently spectral and spatial information was integrated and related to the hot springs locations and mining areas. Mapping altogether, it was possible to propose at least three areas: Tonibabi, Granados and Divisaderos, because in these regions coexists hydrothermal alteration zones, faults and fractures, abandoned mines, as well as, suitable geochemical characteristics to infer the presence of geothermal anomalies.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a la alta demanda energética y al gran impacto ambiental que han generado los combustibles fósiles, han emergido alternativas limpias en la generación de electricidad. Un ejemplo de esto es la geotermia.

Para 2014, la geotermia representó el 0.4% de la generación de electricidad mundial (Hernández-Zúñiga, 2014 en González-Ruiz et al., 2015). De los 24 países en el mundo que en 2015 utilizaron la energía geotérmica para generar electricidad, México ocupó el cuarto lugar en importancia (González-Ruiz et al., 2015). Principalmente las anomalías termales se presentan a lo largo del Cinturón Volcánico Transmexicano y, en menor medida, en la región noroccidental del país.

Pese a su gran potencial e importancia mundial, para 2010 la geotermia en México generó sólo el ~3% de la energía eléctrica producida (Flores-Armenta & Gutiérrez-Negrín, 2011), estando aún muy por debajo de los combustibles fósiles (Figura 1).

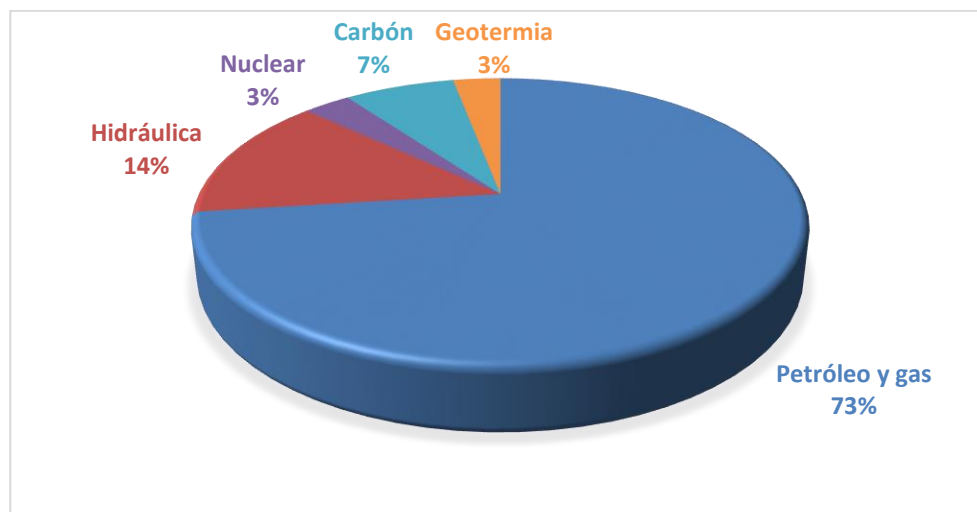


Figura 1. Fuentes de generación eléctrica total en México para 2010. Modificada de (Flores-Armenta & Gutiérrez-Negrín, 2011).

Por lo anterior, es importante que se lleven a cabo más trabajos de exploración con el fin de localizar sitios termales de interés distribuidos a lo largo de todo el país, los cuales planteen las bases para estudios cada vez más detallados.

1.1. Identificación del problema

La zona de estudio del presente trabajo se eligió a partir de que fueron reportadas 12 manifestaciones geotermales superficiales ubicadas en la región centro oriental del estado de Sonora, México (Almirudis et al., 2015). Dichos manantiales fueron analizados, cuyos resultados muestran que los fluidos termales tienen potencial para ser utilizados no solo para su uso directo, sino para la producción de electricidad con plantas de ciclo binario.

Este proyecto representa la primera etapa de exploración, debido a que, usando técnicas remotas, será posible identificar evidencias superficiales (alteraciones y rasgos estructurales) que nos conduzcan a delimitar una planeación eficiente de la exploración a detalle para la caracterización del yacimiento geotérmico.

1.2. Justificación

La aplicación de la Percepción Remota permite, entre otras cosas, detectar áreas de la superficie terrestre con alteración hidrotermal e identificar rasgos estructurales (Sabins, 1999), información que, si se suma con estudios geológico-estructurales, geoquímicos y geofísicos, permitirá elaborar mapas temáticos que sirvan de apoyo a las siguientes etapas de exploración de recursos geotérmicos.

La parte central de Sonora es un sitio atractivo para la exploración geotérmica debido a que:

- Existe intensa actividad tectónica asociada a eventos extensivos (e.g. *Basin and Range* y apertura del Golfo de California).
- Hay registros de vulcanismo del Cuaternario (Paz-Moreno et al., 2003).
- Existe proximidad con otros importantes campos (Cerro Prieto y Tres Vírgenes).
- Modelos geoquímicos preliminares del sistema hidrotermal y la aplicación de geotermómetros estimaron temperaturas de equilibrio a profundidad de 150°C (Almirudis et al., 2015).
- Es una región con yacimientos minerales de origen hidrotermal.
- Representa una región poco estudiada desde el punto de vista geotérmico.

Además, de acuerdo con reportes de la CFE y de Flores-Armenta & Gutiérrez-Negrín (2011), la zona que se pretende estudiar tiene alta y media factibilidad en la etapa de exploración (Figura 2).

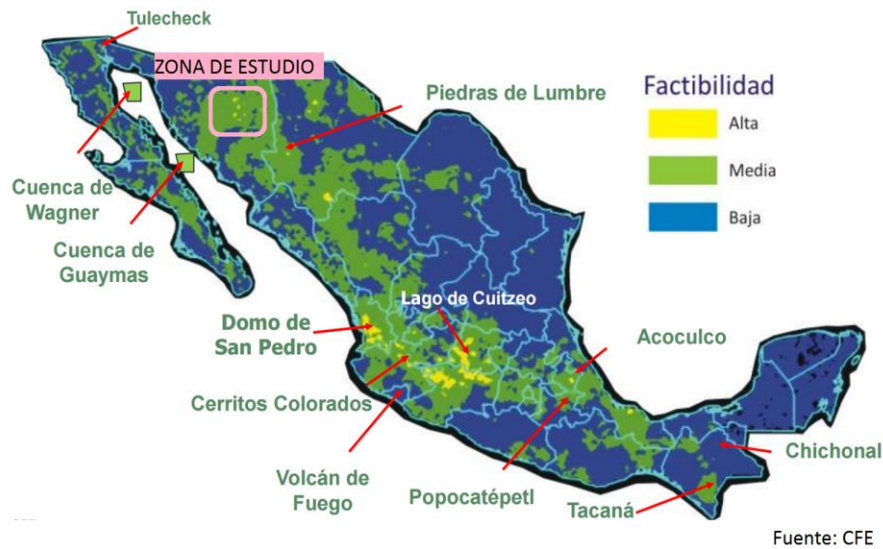


Figura 2. Mapa de factibilidad para la exploración geotérmica en México. Tomada de (Flores-Armenta & Gutiérrez-Negrín, 2011).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es hacer uso de las técnicas de Percepción Remota para el procesamiento digital de imágenes ASTER L1T para detectar zonas de alteración y lineamientos estructurales, asociadas a actividad hidrotermal, sirviendo como pauta en las siguientes etapas de exploración geotérmica en la parte centro oriental del estado de Sonora, México.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Realizar realce espectral de las imágenes satelitales ASTER L1T para mostrar una distribución de zonas con alteración hidrotermal.

2. Realizar un realce espacial de las imágenes satelitales ASTER L1T para localizar lineamientos estructurales (fallas y fracturas) asociados a la actividad tectónica de la zona de estudio.
3. Proponer zonas con potencial geotérmico, integrando los resultados de este estudio con la información de investigaciones previas (geoquímica, localización de zonas mineras, etc.), para la planeación de etapas avanzadas de exploración.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Energía geotérmica

La energía geotérmica está relacionada con el calor que proviene de la estructura interna de la Tierra y los procesos físicos que le ocurren, por ejemplo el decaimiento radioactivo de ciertos elementos (U, Th, K), la energía liberada durante los cambios de fase de ciertos materiales del manto, la fricción entre capas generadas por fallamiento e impactos, el calor latente liberado por la cristalización del magma, la conversión en energía térmica de la energía gravitacional, entre otras (Sierra & Pedro, 1998).

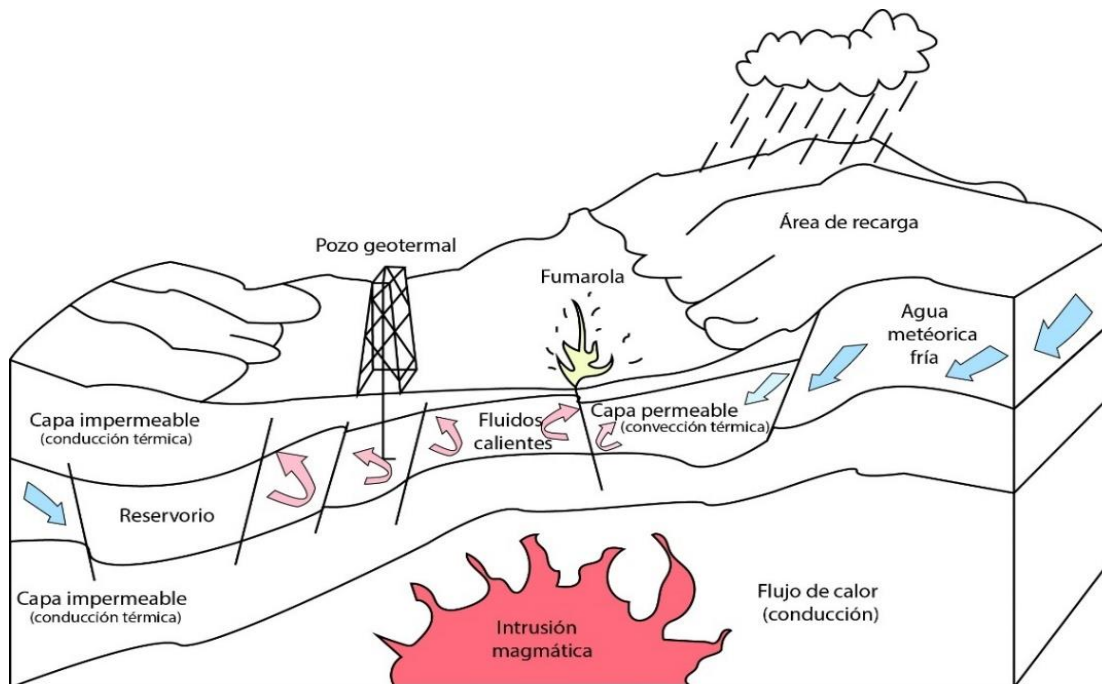


Figura 3. Modelo simplificado de un campo geotérmico. Modificada de (Barbier, 2002).

El calor terrestre es conducido hacia arriba, a través del manto y la corteza, por conducción y convección. Los fluidos geotermales se componen principalmente de agua de lluvia que penetra por zonas de recarga y que es calentada al entrar en contacto con los cuerpos intrusivos (Barbier, 2002). Adicionalmente, existen otros sistemas de fluidos con diversos orígenes (magmáticos, marinos, connatas y metamórficas), a su vez controlados por fallas, procesos compresivos, etc.

Si además se presentan cuerpos rocosos porosos y fracturados, limitados por rocas impermeables, se obtiene un reservorio geotérmico, el cual puede o no manifestarse en superficie (Figura 3).

Usualmente, para la exploración geotérmica se buscan indicadores como:

- Terrenos tectónicamente activos.
- Zonas de anomalías de flujo térmico superficial.
- Presencia de géiseres, fumarolas, manantiales, pozas de lodo, entre otros.
- Abundancia de minerales de alteración hidrotermal, tales como sílice, arcillas, carbonatos, sulfatos, fosfatos, boratos, zeolitas, etc.
- Composición geoquímica anómala de fluidos.
- Anomalías de temperatura.
- Presencia de rocas volcánicas de edades recientes.
- Abundancia de fallas.
- Anomalías de la vegetación.

2.2. Etapas de exploración de un proyecto geotérmico

Como en cualquier proyecto, es necesaria una planificación que involucre la determinación progresiva de zonas de mayor interés, reduciendo la escala y así, los costos de operación, pues una vez enfocados, se invertirá en métodos más precisos que nos permitan dar con el objetivo.

En la Figura 4 se sintetizan las etapas de exploración de un proyecto geotérmico propuesto por Barbier (2002) que va desde el reconocimiento regional hasta la propuesta y ejecución de pozos exploratorios.

El análisis de imágenes de satélite con métodos de Percepción Remota se utiliza en la etapa inicial de reconocimiento regional, debido a que el obtener información de la superficie a nivel regional de fallas, fracturas y alteración mineral, nos dará información de las zonas más interesantes para hacer exploración a detalle con técnicas geológicas, geoquímicas y geofísicas.

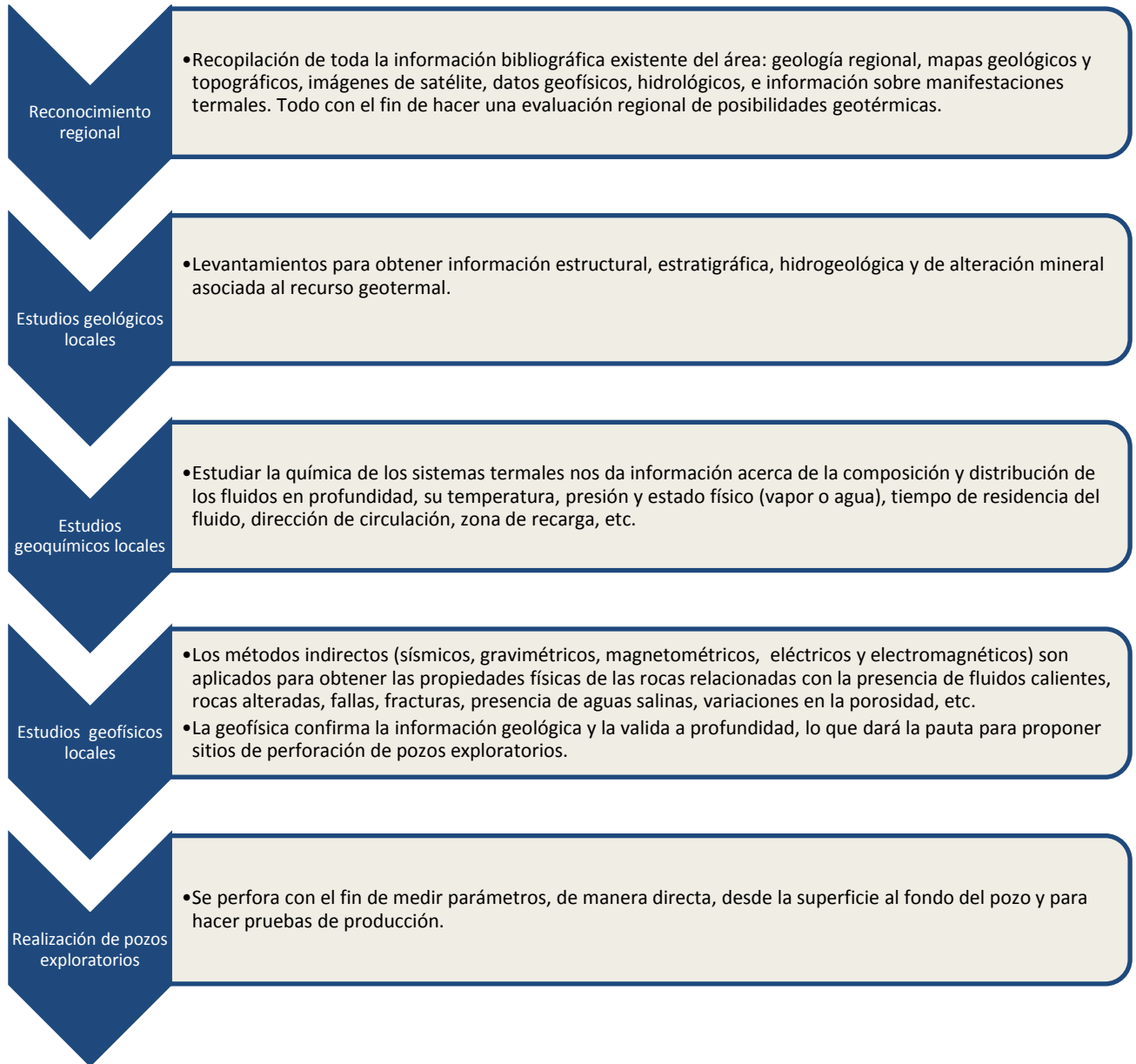


Figura 4. Etapas de exploración de un proyecto geotérmico. Elaboración propia con datos de (Barbier, 2002).

2.3. Energía geotérmica en México

La producción de energía a partir de la geotermia se inició en México con el campo geotérmico de Pathé, Hidalgo en 1959, actualmente fuera de operación, seguido de Cerro Prieto, Los Azufres, Los Humeros, Las Tres Vírgenes, que operan actualmente a cargo de la Comisión Federal de Electricidad. Además de prospectos sobresalientes como La Primavera (Cerritos Colorados), Jalisco y Acozulco, Puebla. Cabe mencionar que también existe el campo Domo San Pedro, Nayarit, que está a cargo de una empresa privada (Portal electrónico de CeMIEGeo¹). En la Tabla 1 se señalan algunas características de estos campos geotérmicos.

<i>Tabla 1. Características de los campos geotérmicos mexicanos en 2011. Elaboración propia con datos de (Flores-Armenta & Gutiérrez-Negrín, 2011; Gutiérrez-Negrín, 2012).</i>							
Campo geotérmico	Fecha de inicio de operación	Tipo de campo (ambiente geológico)	Capacidad instalada para 2011 [MW]	Capacidad operativa para 2011 [MW]	Electricidad generada en 2011 [GWh]	Número de pozos de producción	Número de pozos de inyección
Cerro Prieto, BC.	1973	Sedimentario (tipo D)	720	645	4547	172	16
Los Azufres, Mich.	1982	Complejo volcánico (Tipo B)	188	188	1576	39	6
Los Humeros, Pue.	1990	Caldera volcánica (Tipo C)	40	40	355	23	3
Las Tres Vírgenes, BCS.	2001	Complejo volcánico (Tipo B)	10	10	47	4	1
Total			958	883	6524	238	26

Adicionalmente se están desarrollando diversos trabajos de exploración y se han encontrado 276 sitios termales de interés (más de 1398 manifestaciones superficiales) en 20 de los 32 estados de México (Gutiérrez-Negrín, 2012).

2.4. Fundamentos de Percepción Remota

2.4.1 Definición

La Percepción Remota es el arte, técnica o práctica de hacer inferencias a partir de imágenes tomadas por sensores a distancia, utilizando la radiación electromagnética reflejada y emitida por la superficie terrestre (Campbell & Wynne, 2011; Joseph, 2005).

2.4.2 Desarrollo histórico

La fotografía puede considerarse como el primer paso en el desarrollo de la Percepción Remota, mientras que los globos aerostáticos, en Francia, y las palomas, fueron las primeras plataformas elevadas utilizadas. La primera fotografía tomada de un avión fue en Italia en 1909.

Posteriormente las fotografías aéreas fueron una importante herramienta de reconocimiento militar en la Guerra Civil Americana y en la Primera y Segunda Guerra Mundial (Joseph, 2005).

A principios de los sesentas, la Administración Aeronáutica y Espacial Nacional de Estados Unidos (NASA) estableció un programa de Percepción Remota para impulsar la observación con sensores remotos en instituciones de Estados Unidos (Campbell & Wynne, 2011).

El desarrollo de los satélites hizo que la Percepción Remota tuviera una nueva era, pues la observación sistemática de la Tierra comenzó con el lanzamiento del *Television Infrared Observation Satellite* (TIROS-1) en 1960, diseñado con fines meteorológicos.

La primera fotografía multiespectral de espacio fue tomada en la misión Apolo 9 en 1968 usando cuatro cámaras y distintos filtros.

En 1972 fue lanzado el primer satélite espacial dedicado al manejo de los recursos, ERTS-1 (*Earth Resources Technology Satellite*), con el fin de adquirir datos de la superficie de la Tierra de forma sistemática y repetitiva. En 1975 estos satélites cambiaron su nombre a LANDSAT (Joseph, 2005).

El programa LANDSAT sirvió como modelo para el desarrollo de otros satélites de observación de la Tierra diseñados y operados por diversas organizaciones en todo el mundo. Por ejemplo: el primer satélite de percepción remota con radar (SEASAT), lanzado en 1978; el primer satélite con capacidades estereoscópicas (SPOT), puesto en marcha en 1985 por Francia; el IRS (*Indian Remote Sensing*) lanzado por la India en 1988; el JERS, lanzado por Japón; el Satélite de observación Marina (MOS); los satélites de radar ERS (*European Radar Satellite*), impulsados por la Unión Europea en 1991 y en 1995; el RADARSAT por Canadá en 1995, entre otros (Chandra & Ghosh, 2006).

A partir de los ochentas surgió una segunda generación de instrumentos para la adquisición de información con sensores remotos con características hiperespectrales y con un mayor detalle en la resolución espacial. Por ejemplo, en 1999 fue lanzado IKONOS, cuya resolución espacial va de 1 a 4 metros, lo que ha abierto nuevos campos de aplicación.

2.4.3 Aplicaciones

Las principales aplicaciones de la Percepción Remota se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de las aplicaciones de la PR. Modificada de (Sobrino et al., 2000; Chandra & Ghosh, 2006).

Atmósfera	Tierra		Océano	Hielo-Nieve	Aspectos ambientales
	Escala global	Escala local			
<ul style="list-style-type: none"> • Humedad atmosférica. • Temperatura atmosférica. • Vientos atmosféricos. • Características de nubes, gases y precipitación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Albedo y reflectividad. • Topografía. • Humedad del suelo. • Vegetación. • Temperatura superficial de la Tierra. • Evolución de desastres naturales (incendios, inundaciones, volcanes, sequías). 	<ul style="list-style-type: none"> • Agricultura: identificación y extensión de cultivos, predicción de cosechas, determinación del vigor y estrés en la vegetación. • Cartografía de usos de suelo y evolución de cambios en el paisaje (extensión de zonas urbanas, desertificación, etc.). • Hidrología: cartografía de zonas afectadas por inundaciones e identificación de zonas vulnerables, análisis de calidad de aguas, control de extracción de agua en acuíferos, seguimiento de zonas húmedas, estimación de volúmenes de agua almacenada en cuencas. • Geología: identificación de lineamientos estructurales y alteraciones minerales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Biología marina: detección de organismos marinos en la superficie. • Gestión de zonas costeras: evaluación de cambios en la línea de costa, control de vertidos de agua, dinámica litoral. • Temperatura superficial del mar. • Oceanografía: identificación de patrones de turbidez y circulación; características de oleaje y remolinos. • Batimetría y corrientes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Topografía de la capa de hielo. • Límite, cubierta y profundidad de la nieve. • Límite, espesor del hielo oceánico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Biogeografía: inventario de recursos forestales, cartografía de zonas afectadas por incendios, establecimiento de zonas de riesgo. • Detección de contaminación en cuerpos de agua superficiales. • Detección de contaminación en aire y suelo.

2.4.4 Elementos en la Percepción Remota

Los elementos básicos que hacen posible la Percepción Remota son: fuente de energía, cobertura terrestre, sensores y plataformas, sistemas de recepción, y usuario final (Figura 6). La instrumentación actúa como un sistema cuya función es captar la energía procedente de la superficie terrestre, codificarla y enviarla a un sistema de recepción.

a) Sensores y plataformas

La plataforma es el medio que lleva instalado al sensor, por ejemplo, satélites, aviones, drones, etc.; mientras que el sensor es el dispositivo que adquiere la información, es decir, el que registra la radiación electromagnética. Los sensores pueden ser activos o pasivos (Figura 5).

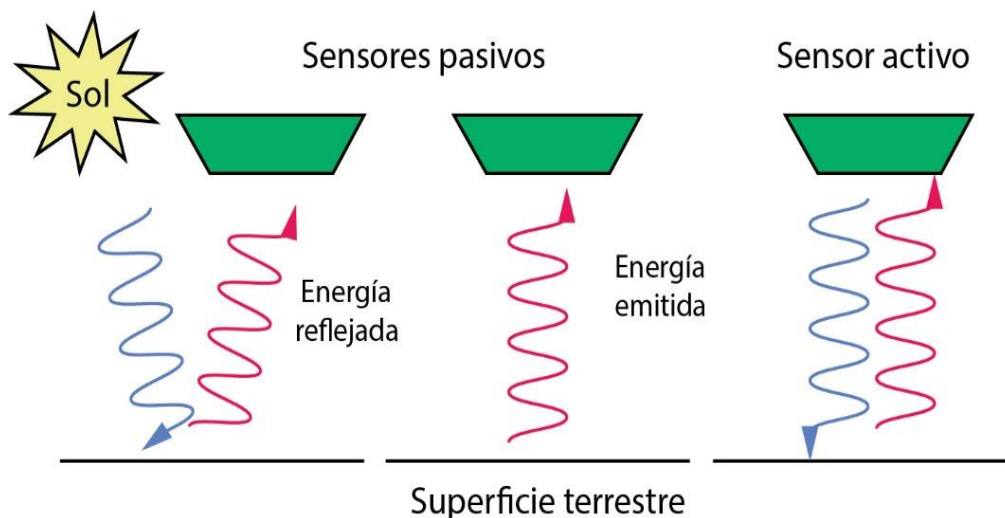


Figura 1. Sistemas pasivos y activos. Modificada de (Bakker et al., 2009).

b) Fuente de energía

Los sistemas pasivos usan como fuente de energía la radiación electromagnética proveniente del sol y posteriormente registran la radiación que es reflejada o emitida por los materiales de interés. Por otro lado, los sistemas activos utilizan una fuente de energía electromagnética artificial y luego registran la radiación que llega al sensor (Figura 5).

c) Objeto de estudio

Nuestro objeto a examinar son las coberturas terrestres formadas por distintas masas de vegetación, suelos, agua o construcciones urbanas, que reciben la señal procedente de la fuente de energía y la reflejan de acuerdo con sus características espectrales.

d) Sistema de recepción terrestre

El sistema de recepción es donde se recibe la información transmitida por el sensor y la plataforma. Se procesa y graba en un formato adecuado, y después de algunas correcciones, se distribuye a los usuarios finales.

e) Usuario final

El usuario final es quien hace uso de la interpretación de las imágenes procesadas para resolver una problemática en cuestión.

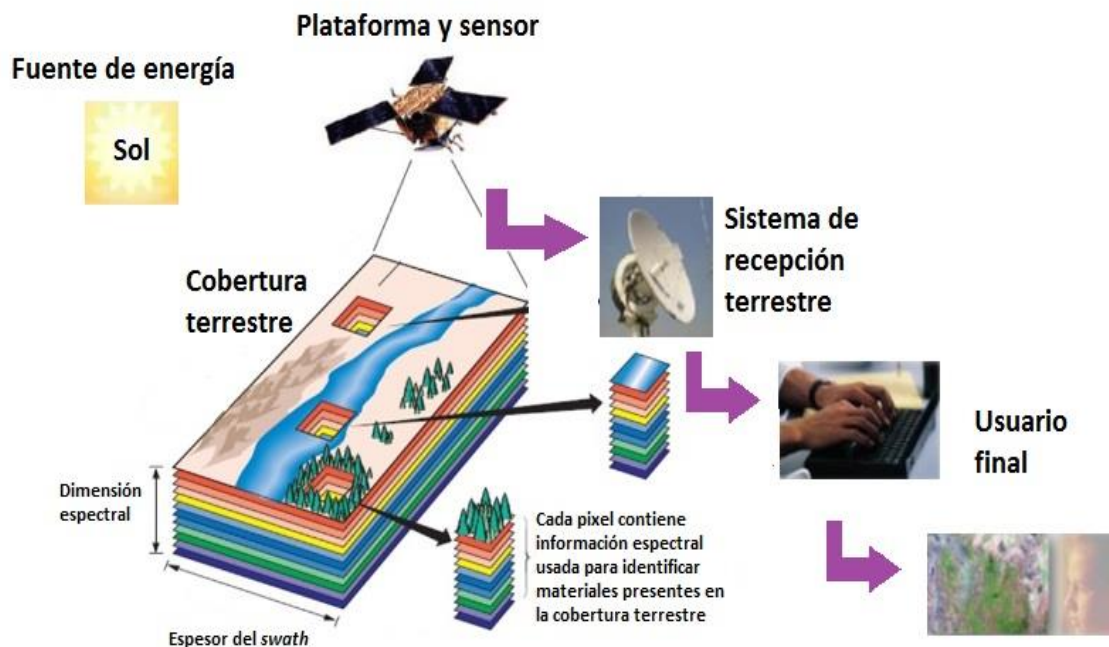


Figura 2. Elementos de la Percepción Remota. Modificada de (Shaw & Burke, 2003).

2.4.5 Principio físico de la Percepción Remota

2.4.5.1 Energía electromagnética

La radiación electromagnética es la transmisión de energía electromagnética emitida, transmitida y propagada en un medio y puede ser modelada por ondas o por el transporte de fotones (Chandra & Ghosh, 2006).

Las ondas electromagnéticas se producen por las interacciones entre el campo eléctrico y el campo magnético, y su dirección de propagación es ortogonal a ambos campos (Bakker et al., 2009).

Dichas ondas pueden ser caracterizadas por su frecuencia, longitud de onda, intensidad, dirección de propagación, etc (Figura 7). La longitud de onda (λ) es la distancia entre las crestas sucesivas de la onda. Mientras que, la frecuencia se refiere al número de ciclos de una onda por unidad de tiempo. La relación entre la longitud de onda y la frecuencia es inversa.

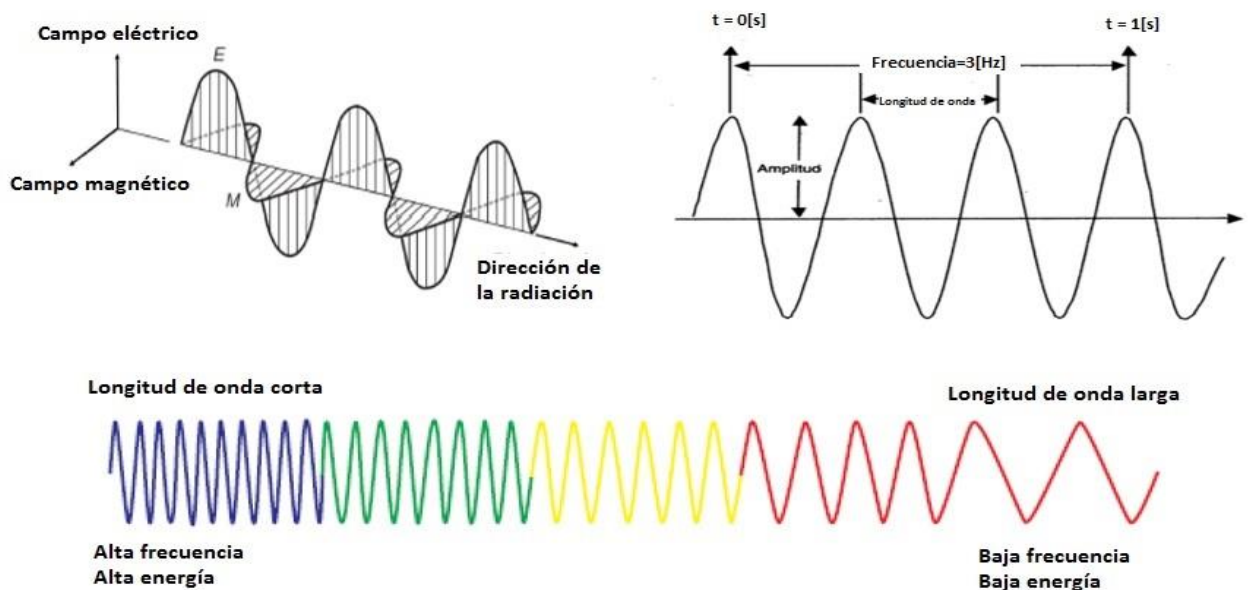


Figura 3. Elementos de las ondas electromagnéticas. Modificadas de (Bakker et al., 2009).

2.4.5.2 Espectro Electromagnético

El espectro electromagnético es una representación esquemática de la clasificación de las ondas electromagnéticas de acuerdo a su longitud de onda. Las divisiones del espectro son establecidas por conveniencia y sus límites pueden estar traslapados entre regiones adyacentes (Figura 8).

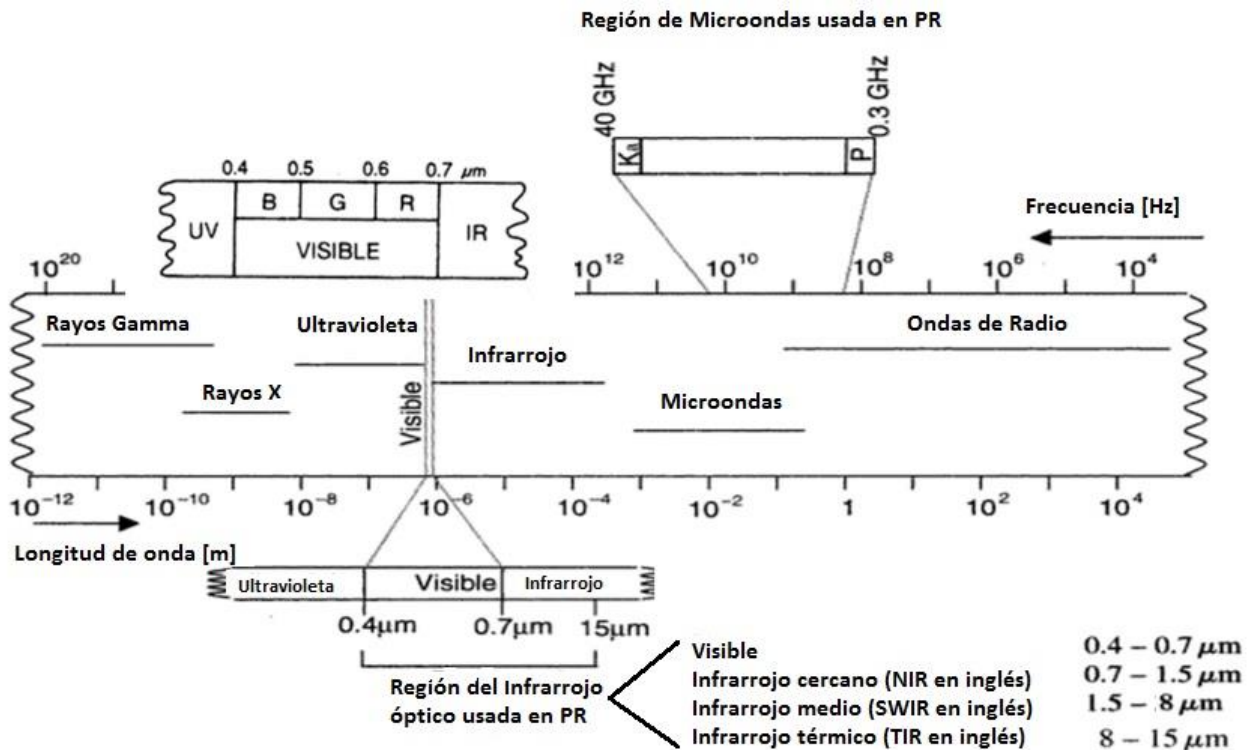


Figura 4. Regiones del Espectro Electromagnético. Modificada de (Joseph, 2005).

El espectro se extiende desde los rayos gamma hasta las ondas de radio, sin embargo, para la Percepción Remota, adquiere relevancia la región infrarroja y la de las microondas (Joseph, 2005).

La región del infrarrojo consiste en un segmento del espectro electromagnético relativamente largo comparado a la región del visible, que va de 0.7 a 15.0 μm . El infrarrojo está dividido en varias regiones, como se muestra en la Figura 8.

En el presente trabajo solo se utilizará la región del visible, el infrarrojo cercano (NIR) y una porción del infrarrojo de onda corta (SWIR).

2.4.5.3 Fenómenos en la propagación de ondas electromagnéticas

Al interactuar con la atmósfera y con la superficie terrestre, la radiación electromagnética sufre diversos fenómenos físicos que se describen en la Figura 9 y en la Tabla 3.

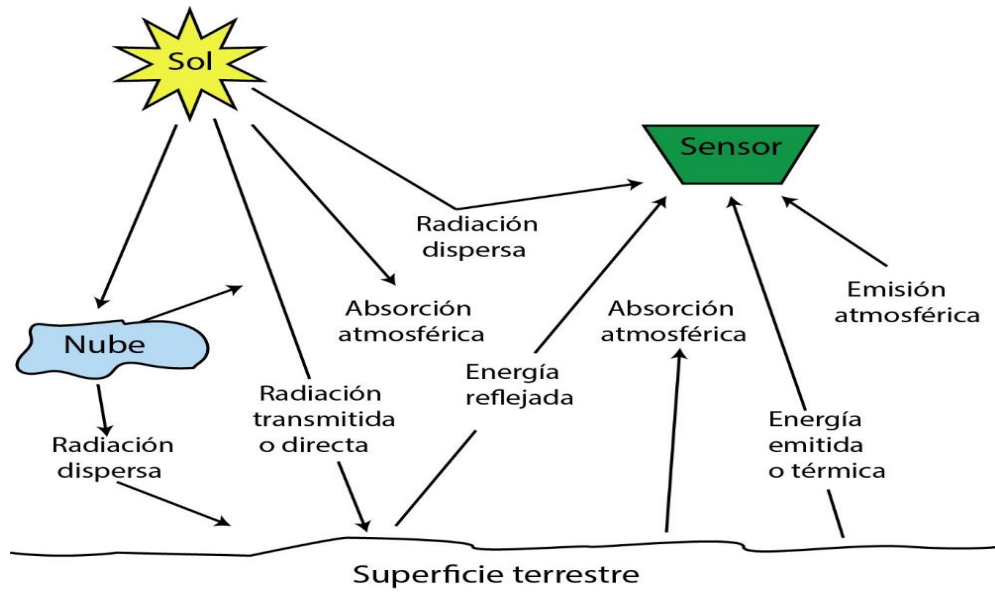


Figura 5. Fenómenos de interacción de las ondas electromagnéticas. Modificada de (Bakker et al., 2009).

Tabla 3. Fenómenos de interacción de las ondas electromagnéticas. Elaboración propia con información de (Bakker et al., 2009; Levin, 1999).

Interacción con la atmósfera	Dispersión (scattering) Propagación aleatoria de radiación electromagnética como resultado de la interacción con varios componentes en la atmósfera.	Rayleigh	<ul style="list-style-type: none"> Se presenta cuando la longitud de onda de la radiación es más grande que el diámetro de las partículas que encuentra a su paso. Esta forma de dispersión es proporcional a la inversa de la cuarta potencia de la longitud de onda. La generan diversos gases en la atmósfera, tales como O₂ y N.
		Mie	<ul style="list-style-type: none"> Se presenta cuando la longitud de onda de la radiación es similar al tamaño de la partícula responsable de la dispersión. La generan partículas de polvo, polen, aerosoles, vapor de agua. La cantidad de dispersión es inversamente proporcional a la longitud de onda.
		No selectiva	<ul style="list-style-type: none"> Se presenta cuando la longitud de onda de la radiación es inferior al diámetro de la partícula. El término no selectiva hace referencia a que la dispersión no depende de la longitud de onda. Se observa como niebla blanca o grisácea, donde todas las longitudes de onda visibles se encuentran dispersas por igual. La generan grandes gotas de agua o grandes partículas de polvo o polen, cristales de nieve, hielo, etc.
	Absorción Ocurre cuando la atmósfera actúa como filtro atenuando fuertemente la transmisión de la radiación en algunas frecuencias a través de la atmósfera.	Causada por O₂	El oxígeno filtra la radiación ultravioleta por debajo de 0.1 [μm], cortos sectores del infrarrojo térmico y las microondas.
		O₃	El ozono elimina la radiación ultravioleta inferior a 0.3 [μm], así como un sector de 27 [mm] de microondas.
		Vapor de agua	Absorbe ondas en torno a los 0.6, 2 y 6 [μm].
CO₂		El dióxido de carbono absorbe la parte del infrarrojo térmico hasta 15 [μm], y del infrarrojo medio de 2.5 a 4.5 [μm].	
Refracción Es una flexión de los rayos que ocurre cuando pasa la radiación a través de las distintas capas de la atmósfera debida al cambio en sus propiedades físicas.	<p>El ángulo que define la trayectoria del rayo flexionado está dado por la Ley de Snell:</p> $n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2$ <p>Donde:</p> <p>n_1: índice de refracción del medio 1 n_2: índice de refracción del medio 2 θ_1: ángulo de refracción del medio 1 θ_2: ángulo de refracción del medio 2</p>		
Interacción con la superficie terrestre	Reflexión Ocurre cuando un rayo se redirige al chocar con una superficie no transparente. <u>Reflectancia:</u> Es la capacidad de un medio para reflejar energía. Se puede expresar como la razón: $\text{Reflectancia} = \frac{\text{Radiación reflejada}}{\text{Radiación incidente}}$	Difusa	<ul style="list-style-type: none"> Ocurre cuando la energía incidente se dispersa más o menos igual en todas las direcciones. Para la radiación en el visible, muchas superficies de la naturaleza pueden ser ejemplos de reflectores difusos.
	Transmisión Ocurre cuando la radiación pasa a través de una sustancia sin atenuarse significativamente.	Especular	<ul style="list-style-type: none"> Se presenta cuando la superficie es lisa en relación con la longitud de onda. Redirige casi toda la radiación incidente en una sola dirección. En la radiación del visible, la reflexión especular puede ocurrir con superficies como espejos, metales lisos o cuerpos de agua calmada.
			Transmitancia: Es la capacidad de un medio para transmitir energía. Se puede expresar como la razón: $\text{Transmitancia} = \frac{\text{Radiación transmitida}}{\text{Radiación incidente}}$

2.4.5.4 Ventanas atmosféricas

Como resultado de la absorción atmosférica, la observación se reduce a determinadas bandas del espectro electromagnético, conocidas como ventanas atmosféricas, que son aquellos rangos de longitud de onda donde la radiación puede atravesar la atmósfera y llegar hasta la superficie terrestre (Figura 10).

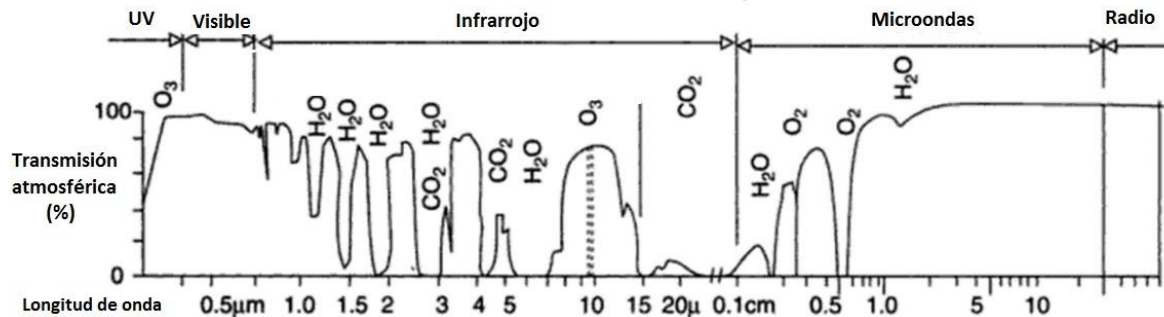


Figura 6. Ventanas atmosféricas. Se indican los gases responsables de la absorción. Modificada de (Sabins, 1997, en Joseph, 2005).

2.4.6 Firma espectral

Cuando la radiación electromagnética interactúa con diversos cuerpos, éstos la reflejan, absorben, dispersan o transmiten. La variación relativa de la energía reflejada o emitida en función de la longitud de onda constituye lo que se denomina firma espectral (Sobrino J, et al., 2000).

De acuerdo con su composición química, distintos materiales reflejan y absorben energía de manera distinta, a través del fenómeno llamado “modos vibracionales”, creando así este patrón único que es usado para identificar dichos materiales remotamente.

2.4.7 Propiedades espectrales de algunos materiales de nuestro interés

Las características que deben ser consideradas en cualquier espectro, para la identificación de compuestos vienen dados por los rasgos de absorción, los cuales cambian de forma, profundidad respecto al eje vertical, y posición respecto al eje horizontal (longitud de onda), que nos indican zonas de energía generada por la vibración de ciertas moléculas y radicales.

Las principales coberturas que podemos identificar en la superficie terrestre se clasifican en:

- a. Vegetación
- b. Cuerpos de agua
- c. Nieve y hielo
- d. Actividad antropogénica
- e. Suelos, rocas y minerales

Vegetación

La vegetación sana, tiene una respuesta espectral típica que se puede ver en la Figura 11, donde se percibe que en la región del visible (0.4-0.7 μm) la reflectancia es inferior al 10% y la mayor parte de la radiación es absorbida por la clorofila, que debido a sus rasgos de absorción, produce dos mínimos en la banda del azul (0.45 μm) y del rojo (0.66 μm), mientras que su máximo relativo está en 0.55 μm , haciendo que las hojas se vean verdes. Sin embargo, es muy notable que los verdaderos valores máximos de reflectancia están en la zona del infrarrojo cercano (0.7-1.5 μm).

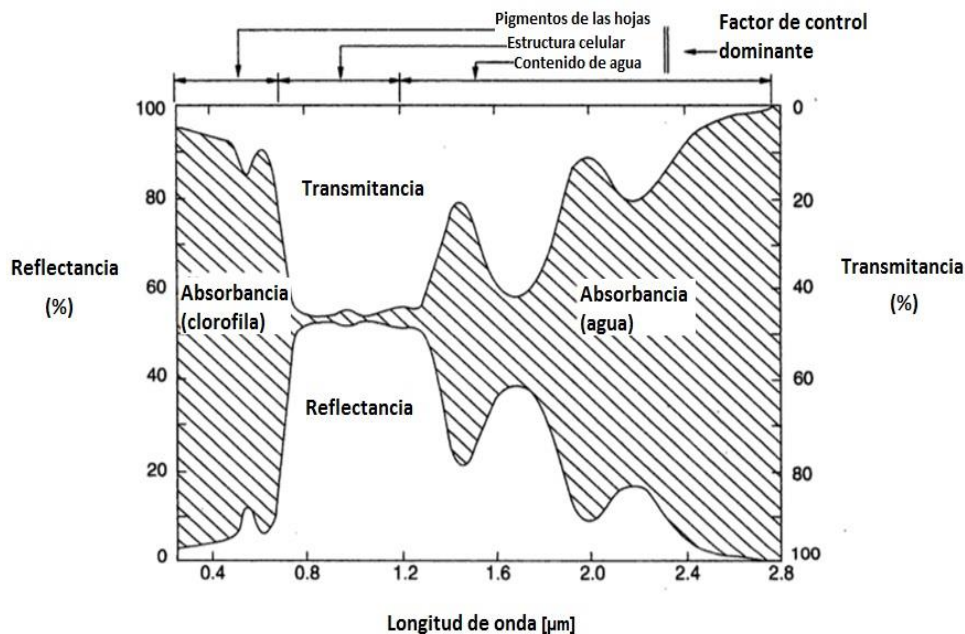


Figura 7. Rasgos espectrales de la vegetación sana. Modificada de (Joseph, 2005).

La sección del infrarrojo medio (1.3-2.5 [μm]) se denomina zona hídrica, ya que en ella las propiedades ópticas de las hojas están determinadas por su contenido de agua. En condiciones de hidratación normales ambos valles son profundos y marcados cerca de 1.4 y 1.9 [μm]. En condiciones de estrés hídrico estos son menos marcados aumentando su reflectividad (Sobrino, 2000).

Cuerpos de agua

El agua absorbe la mayor parte de la radiación en la región infrarroja óptica del espectro electromagnético (Figura 12). Su reflectividad se ve afectada por condiciones como el contenido de materia orgánica disuelta o sedimentos suspendidos. Incluso, en aguas limpias es posible obtener información batimétrica con técnicas remotas (Joseph, 2005).

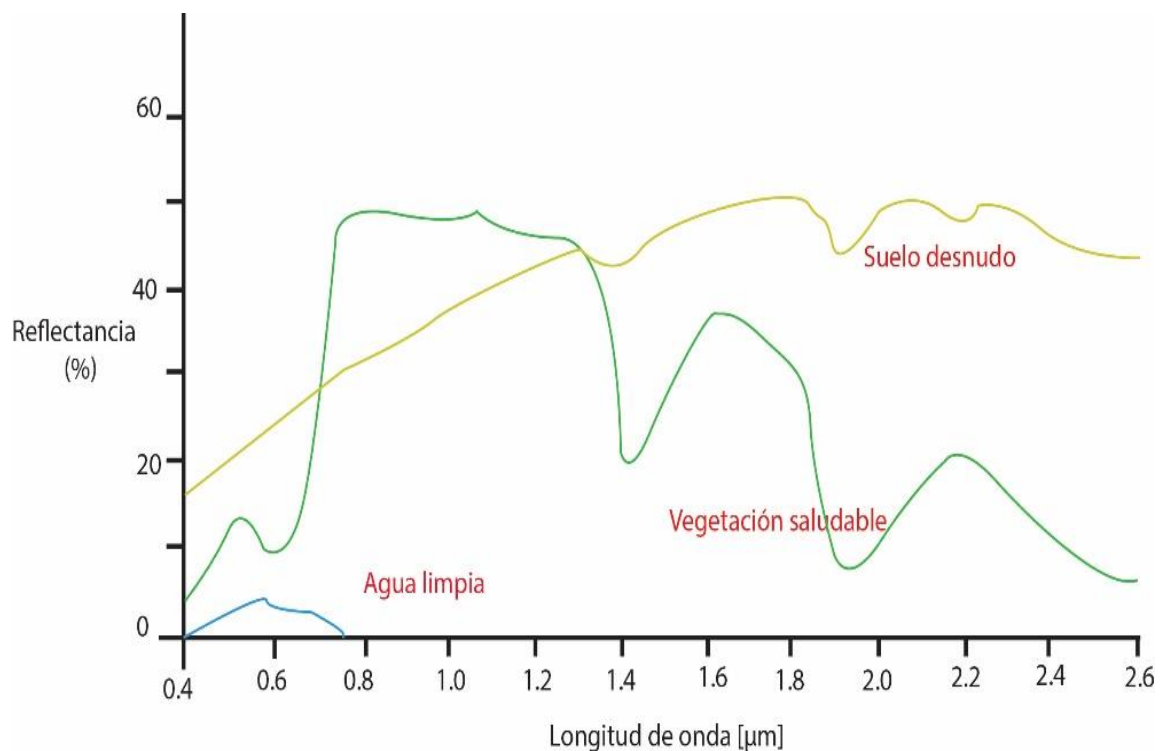


Figura 8. Rasgos espectrales del agua limpia, vegetación saludable y suelo desnudo.

Suelos

Los factores que hacen que la reflectividad varíe en los suelos son su composición química, el contenido de agua (los suelos secos reflejan más energía), la textura, la cantidad de materia orgánica, etc. (Sobrino, 2000).

Los suelos desnudos (sin vegetación) muestran una curva casi horizontal, pero ligeramente ascendente desde el visible al infrarrojo cercano (Figura 12).

En la Figura 13 se muestran los espectros para algunas rocas sedimentarias, tales como calizas, lutitas y areniscas.

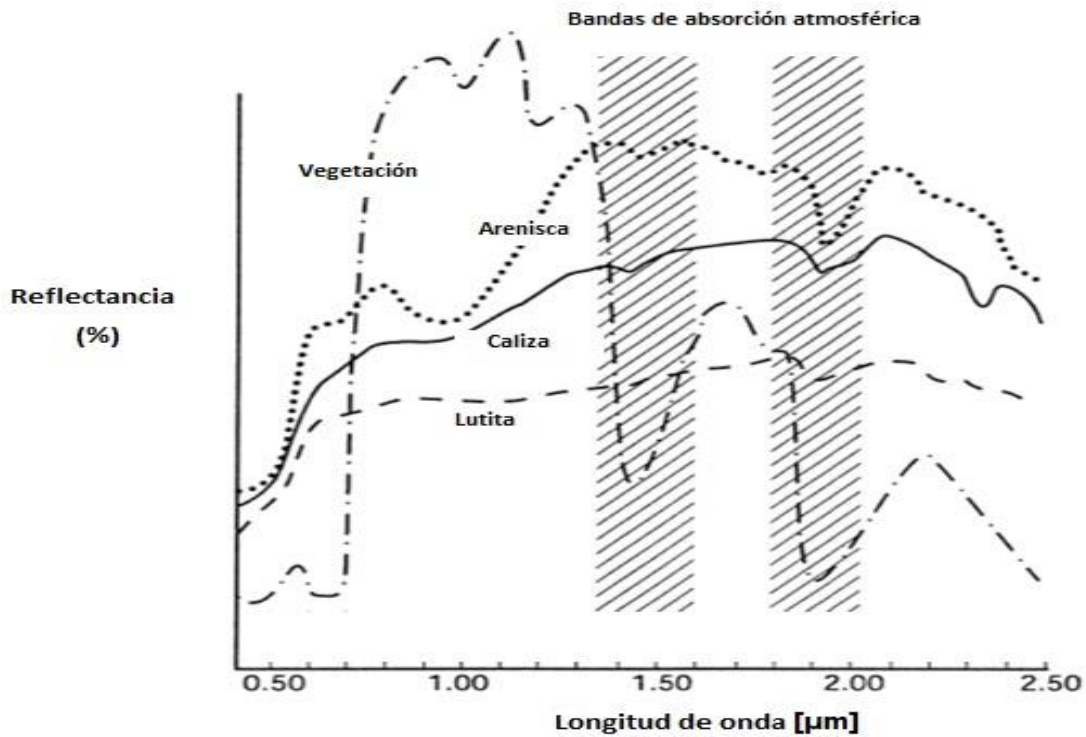


Figura 9. Rasgos espectrales para vegetación y rocas sedimentarias. Modificada de (Sabins, 1999).

2.4.8 Asociaciones minerales producto de alteración hidrotermal

Como se mencionó anteriormente, para la exploración geotérmica se tiene particular interés en minerales de alteración que nos conduzcan a un yacimiento geotérmico, y las técnicas de procesamiento con Percepción Remota pueden proveer información en la detección de los mismos.

Estos minerales aparecen reemplazando a los minerales primarios de rocas que han estado expuestas a procesos hidrotermales. Se ubican normalmente rodeando al núcleo de mineralización en zonas específicas. Estudiar estas zonas de alteración constituye uno de

los primeros indicadores para localizar la posible existencia de sistemas hidrotermales activos (geotermia) y fósiles (yacimientos minerales) (Pérez-Gutiérrez & Muñoz-Nieto, 2006).

Las alteraciones hidrotermales presentan una zonación a profundidad principalmente en función de su temperatura de formación. Estas tipologías de alteración (Figura 14) se han descrito en sistemas geotérmicos y yacimientos minerales. De manera generalizada, se pueden clasificar las siguientes tipologías de alteración:

a) Zona de Skarn

Ocurrencia de minerales calcosilicatados (granate, wollastonita, diópsido, actinolita) en regiones adyacentes a cuerpos intrusivos producto de la alteración de rocas carbonatadas (calizas, dolomitas) y vulcano-sedimentarias.

b) Zona potásica

Tipo de alteración que se caracteriza por una adición de feldespato potásico a las rocas, en sustitución de plagioclasas y minerales máficos silicatados.

El proceso no involucra hidrólisis y se presenta en condiciones de pH neutro a alcalino, a altas temperaturas (450°-600°C) y cerca del núcleo de mineralización (Pirajno, 2009).

Los principales minerales que podemos encontrar en esta zona son: feldespato potásico, biotita y adularia, asociados con pirita, calcopirita, molibdenita, anhidrita, clorita, cuarzo, magnetita, etc. (idem).

Es común encontrar esta alteración en pórfidos de cobre (Gifkins et al., 2005 en Pirajno, 2009).

c) Zona propilítica

Es la región de alteración, caracterizada por la adición de H₂O, CO₂ y localmente, S a las rocas, existe un bajo grado de hidrólisis, ausencia de lixiviación y condiciones de pH neutro a alcalino. Los rangos de temperatura en que suele presentarse van de 200° a 350°C (Pirajno, 2009).

Sus minerales típicos son: epidota, clorita, calcita, albita, feldespato potásico, pirita y en ocasiones, sericita, óxidos de hierro, montmorillonita y zeolitas (ídem).

Se presenta en pórfidos de cobre, sistemas epitermales y geotérmicos (Gifkins et al, 2005 en Pirajno, 2009), siendo que en estos últimos, la alteración propilítica corresponde a niveles de reservorio.

d) Zona fílica o sericítica

La alteración sericítica ocurre debido a la desestabilización de los feldespatos en presencia de H^+ , OH^- , K y S para formar sericita (mica blanca de grano fino), cuarzo y pirita, principalmente (Pirajno, 2009).

Por lo regular, en esta región las plagioclasas suelen estar destruidas. Existe un grado de hidrólisis intermedio y condiciones de pH ligeramente ácido. Aunado, ocurre lixiviación de Na, Mg, Ti, Fe y K (ídem).

Los minerales presentes pueden ser biotita, clorita, calcopirita, calcita, feldespato potásico, etc., siendo la asociación más común cuarzo-sericita-pirita (*QSP*) (ídem). Además, a temperaturas menores a $100^{\circ}C$ - $120^{\circ}C$ se presenta esmectita, de 120° a $200^{\circ}C$ se tiene illita-esmectita interlaminada, de 200° a $250^{\circ}C$ illita y $>250^{\circ}C$ aparece la muscovita.

Es común encontrar esta tipología de alteración en pórfidos de cobre, sistemas epitermales recientes, sistemas VMS (*Volcanogenic Massive Sulphides*), VHMS (*Volcanic Hosted Massive Sulphides*) y sistemas geotermiales (Gifkins et al., 2005 en Pirajno, 2009).

Cabe mencionar, que la zona fílica ya corresponde a niveles superficiales en sistemas hidrotermales.

e) Zona argílica

Es caracterizada por la formación de minerales arcillosos, fases de sílice y sulfuros debido al intenso metasomatismo por H^+ y lixiviación ácida a temperaturas que van de 100 a $300^{\circ}C$ (Pirajno, 2009). Los minerales arcillosos reemplazan principalmente plagioclasas y silicatos máficos.

La tipología de alteración argílica se puede dividir en argílica-argílica intermedia y argílica avanzada. Ambas en condiciones de baja temperatura y pH ácido, siendo la más ácida la argílica avanzada.

La alteración argílica-argílica intermedia se caracteriza por la presencia de minerales como montmorillonita, caolinita, illita, esmectita, clorita, dickita, etc. Además, e presenta un grado de hidrólisis alto y una lixiviación moderada de K, Ca, Na y Mg (ídem).

En la región de alteración argílica avanzada ocurre un ataque ácido extremo que provoca la destrucción total de feldespatos y fases de silicatos máficos. Minerales típicos son la alunita, caolinita, dickita, pirofilita, barita, diásporo, covellina, etc. (ídem).

Ambas regiones suelen estar presentes en pórfidos de cobre, sistemas epitermales y geotérmicos (Gifkins et al., 2005 en Pirajno, 2009).

f) Zona de silicificación

Tipo de alteración muy común donde se introduce a las rocas sílice secundario (SiO_2), ya sea por relleno de poros y fracturas o por reemplazamiento con cuarzo microcristalino (calcedonia) (Lagat, 2009). Ocurre en un amplio rango de temperaturas.

También suele presentarse sílice oqueroso (*vuggy silica*) y ópalo.

g) Zona de oxidación

Además, reacciones relacionadas con variaciones en el estado de óxido-reducción provocan cambios de fase en los minerales que contienen hierro. El óxido de hierro se observa con frecuencia en los afloramientos de rocas alteradas hidrotermalmente como resultado del intemperismo (Ruiz-Armenta & Prol-Ledesma, 1998). Ejemplos de óxidos frecuentes son la hematita y la goethita (Figura 16b).

Las zonas de alteración a, b y c se localizan a profundidades mayores y son útiles para fines de exploración minera. Mientras que, debido a que los sistemas geotérmicos activos generalmente no presentan efectos significativos de erosión que dejen al descubierto las zonas profundas de alteración, las zonas de mayor interés para el presente trabajo, resultan ser la fílica, argílica-argílica intermedia, argílica avanzada, de silicificación y de oxidación.

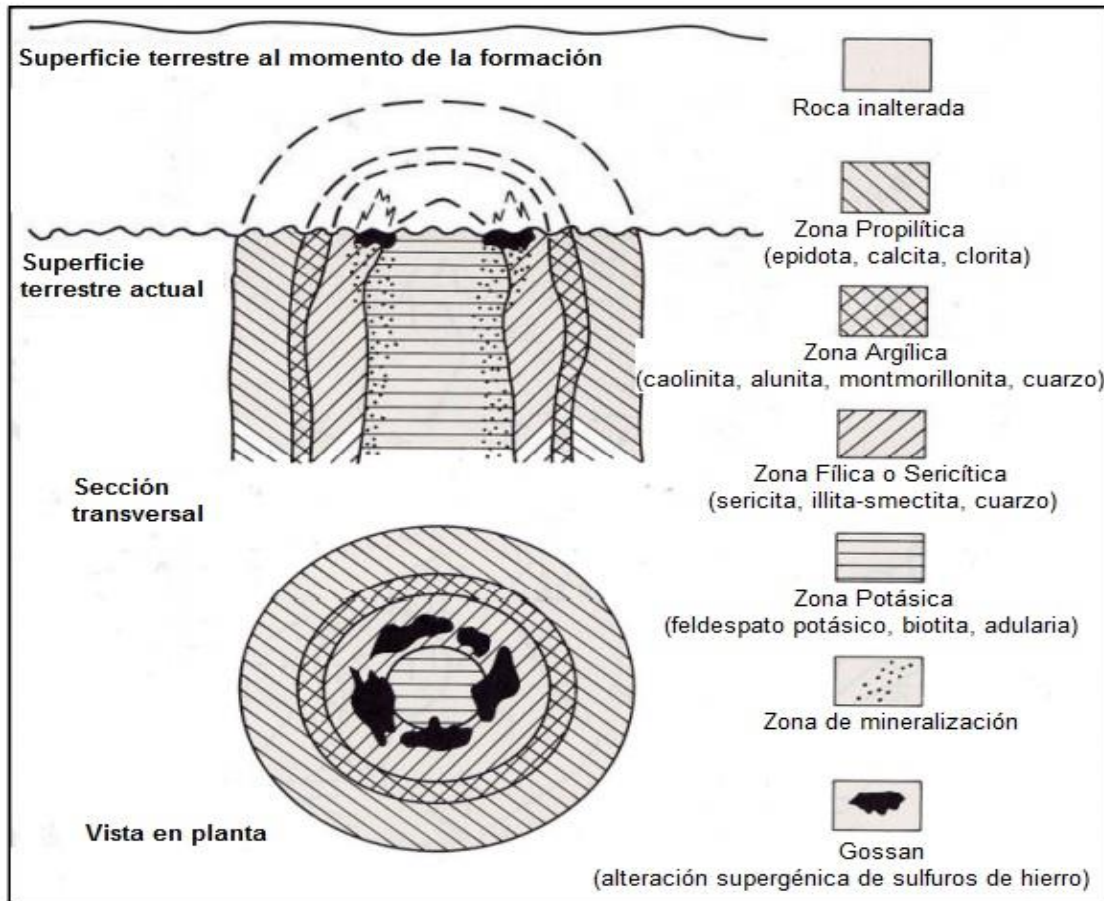


Figura 10a. Principales zonas de alteración hidrotermal asociadas con depósitos tipo pórfido de cobre.

Modificada de (Lowell & Guilbert, 1970 en http://remote-sensing.aslenv.com/documents/ASTER_Processing_for_Mineral_Exploration.pdf)

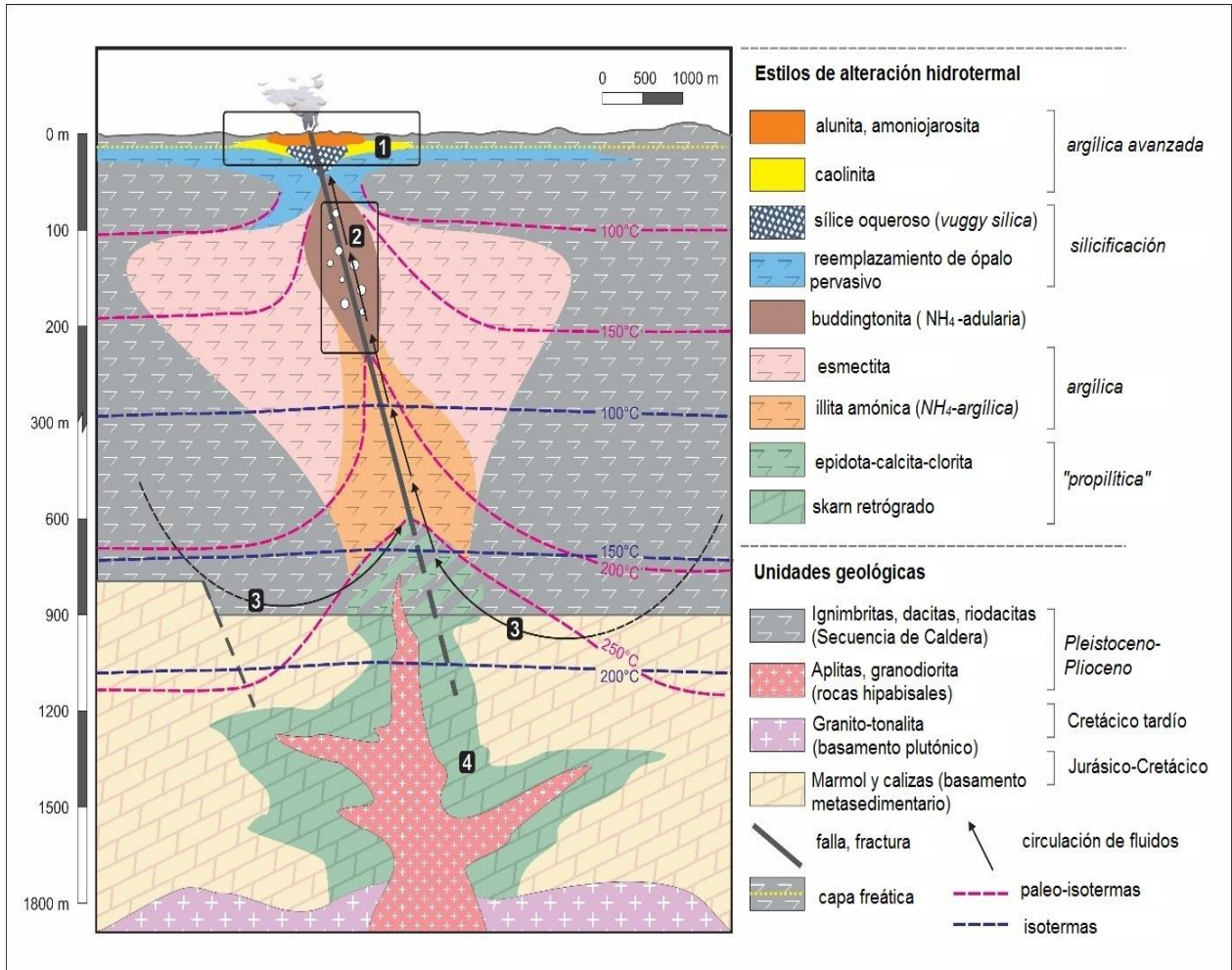


Figura 11b. Principales zonas de alteración del sistema hidrotermal de Aocolco, Puebla. Modificada de (Canet et al., 2015)

En cuanto a sus características espectrales, en la región VNIR + SWIR, la alteración argílica avanzada tiene un rasgo de absorción particular en la banda 5 del sensor ASTER, resultado de la alunita, mientras que la alteración fílica está caracterizada por la absorción de Al-OH en la banda 6 debido a las vibraciones moleculares de la muscovita (Figura 15). Las rocas que muestran alteración propilítica forman una región periférica y se encuentran dispersas dentro de la principal zona de alteración hidrotermal (Rowan et al., 2006).

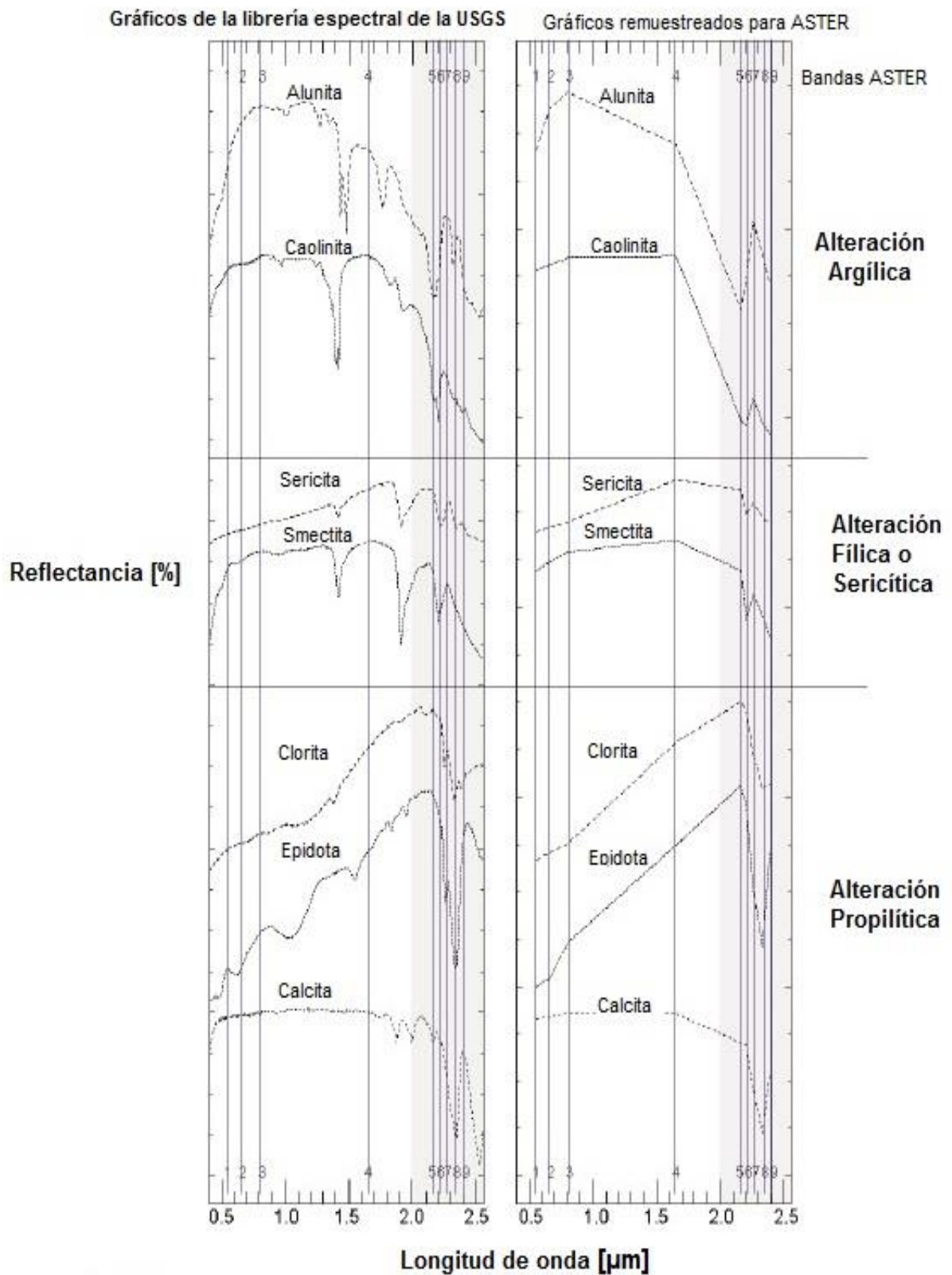


Figura 15. Rasgos espectrales característicos de minerales pertenecientes a las zonas de alteración argílica, fílica y propilítica. Modificada de (Yajima, 2014).

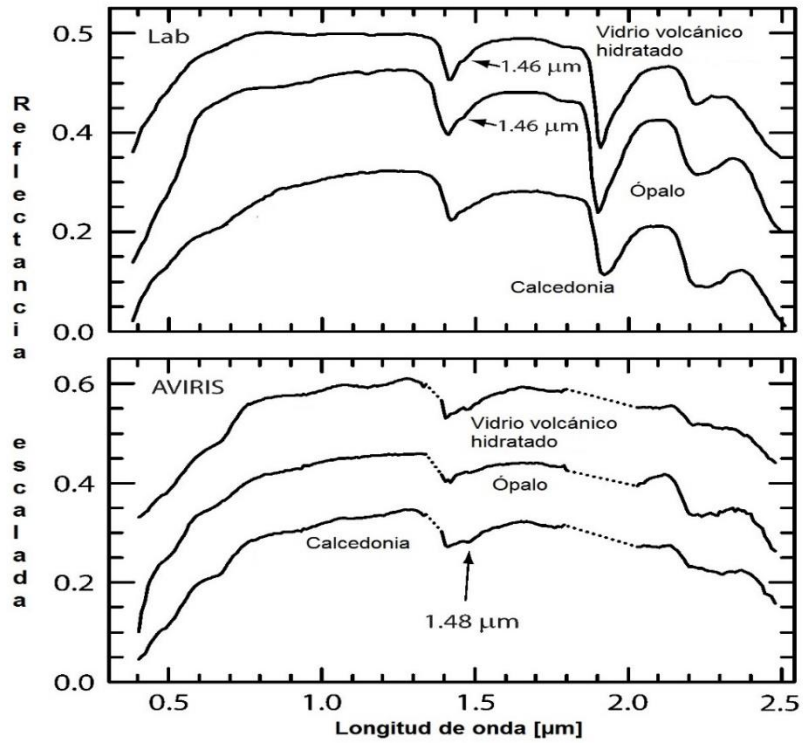


Figura 16a. Rasgos espectrales característicos de minerales pertenecientes a la zona de silicificación. Modificada de (<https://speclab.cr.usgs.gov>).

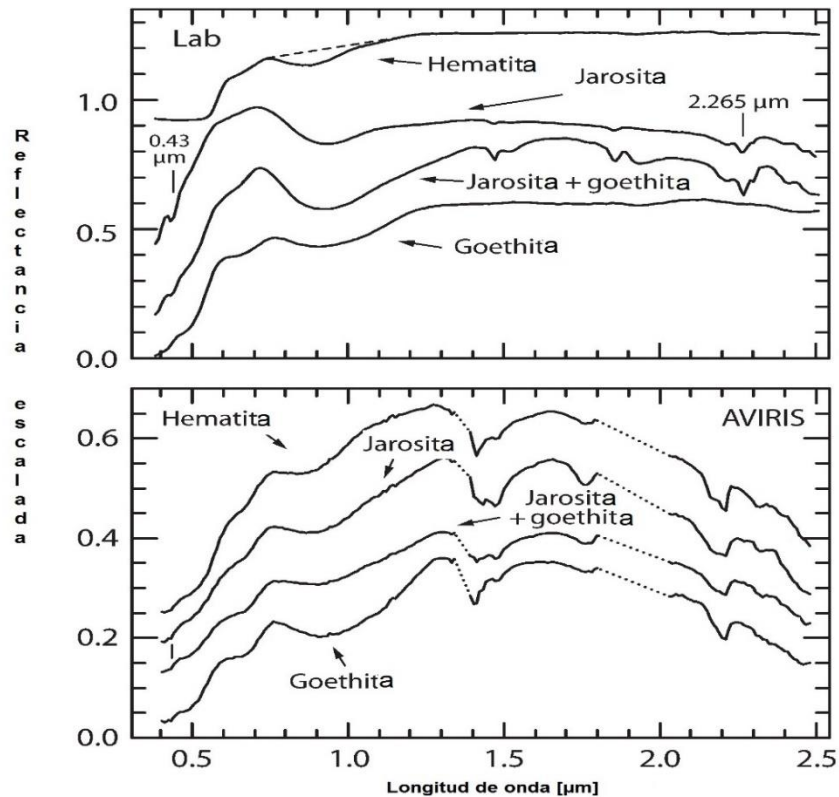


Figura 16b. Rasgos espectrales característicos de minerales pertenecientes a la zona de oxidación. Modificada de (<https://speclab.cr.usgs.gov>).

2.4.9 Tipos de resolución en los instrumentos

La resolución es la habilidad para registrar y discriminar información. Una resolución alta significa que los datos permiten una mejor definición de las firmas espectrales, las dimensiones de los objetos y las variaciones temporales. Existen cuatro tipos de resolución:

i. Resolución espacial

Tiene que ver con el tamaño de la mínima unidad de la imagen que puede detectar el sensor, es decir, el tamaño medio del píxel (Figura 17).

Depende de muchos factores como son la altura orbital, la apertura del dispositivo óptico, la velocidad de exploración y el número de detectores. En la actualidad, la resolución espacial de los sensores va de 0.31 [m] (Geoeye-2) hasta 5000 [m] (Meteosat).

Es clave para caracterizar la potencialidad espacial de un sensor, ya que marca el nivel de detalle que ofrece la imagen. Cuando menor es el tamaño del píxel, mejor resolución tiene la imagen, pues permite discriminar objetos más pequeños (Sobrino et al., 2000).

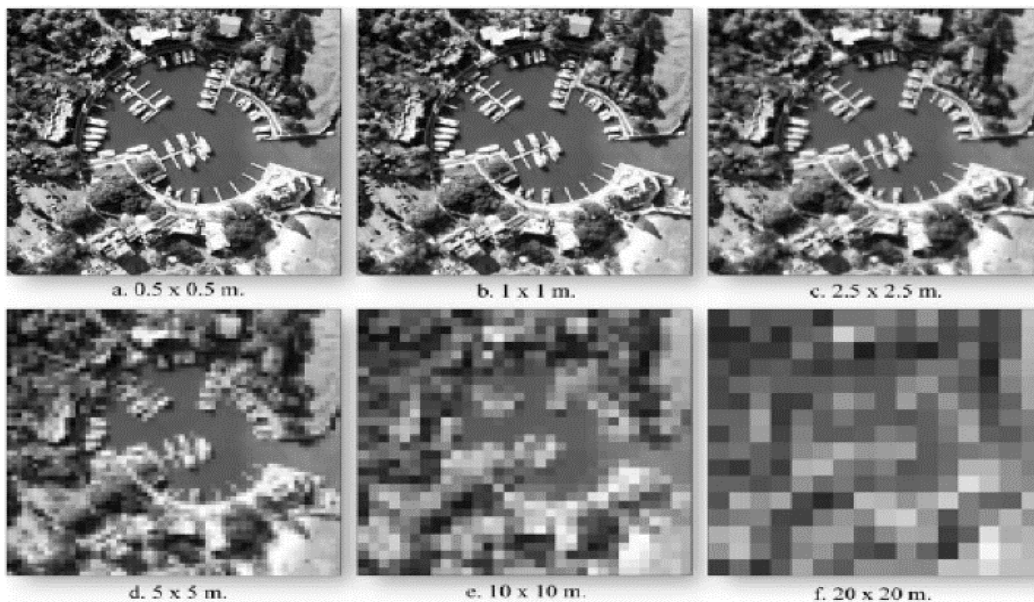


Figura 17. Resolución espacial. Tomada de (Jensen, 2004).

ii. Resolución espectral

Indica el número y extensión de los intervalos de longitud de onda de las bandas espectrales en que un sensor registra la radiación electromagnética (Figura 18). Cuanto mayor sea el número de bandas y más estrechas sean, mejor es la resolución espectral porque tendrá mayor capacidad de reproducir la respuesta espectral y con ello discriminar materiales.

La elección de la resolución espectral del sensor elegido va a depender de los objetivos del proyecto. Por ejemplo, los sensores con fines meteorológicos necesitan bandas en el visible, en el infrarrojo térmico y en el infrarrojo medio para observar la humedad de la atmósfera, mientras que, en la exploración de recursos minerales, se requieren sobre todo bandas en el infrarrojo cercano y medio (Sobrino et al., 2000).

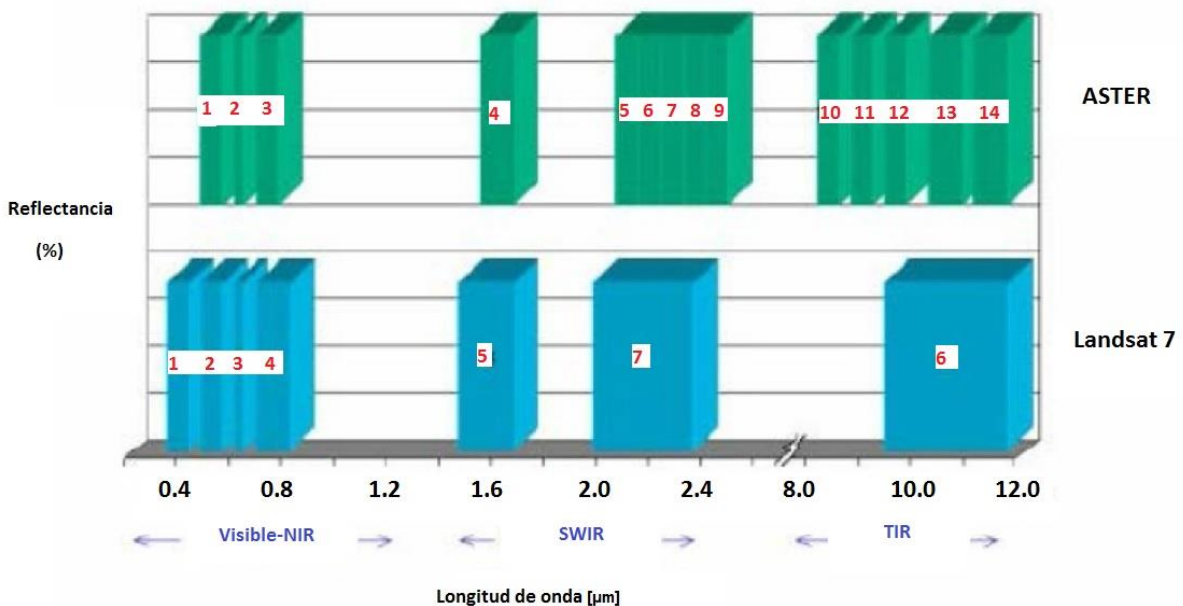


Figura 18. Comparación entre resoluciones espectrales del sensor ASTER y Landsat 7. Modificada de (<http://wcdg.westgis.ac.cn/DATABASE/glacier/pumqu/Reports/chap6/chap6main.htm>).

iii. Resolución radiométrica

Alude a la sensibilidad de un detector a diferencias en la intensidad de la energía de la señal electromagnética. Está condicionada por los intervalos de digitalización de la señal.

El número máximo de niveles digitales de la imagen se identifica con este tipo de resolución y oscila entre 64, 128, 256, 1024 y aún mayor (Figura 19).

Entre mayor sea el número de niveles, mejor es la resolución radiométrica y por lo tanto la información proporcionada es mejor, aunque en un análisis visual no es tan importante, pues el ojo humano percibe alrededor de 64 tonos de gris (Sobrino et al., 2000); sin embargo, para llevar a cabo cálculos numéricos, por ejemplo de temperatura, se requiere de mayor resolución radiométrica.

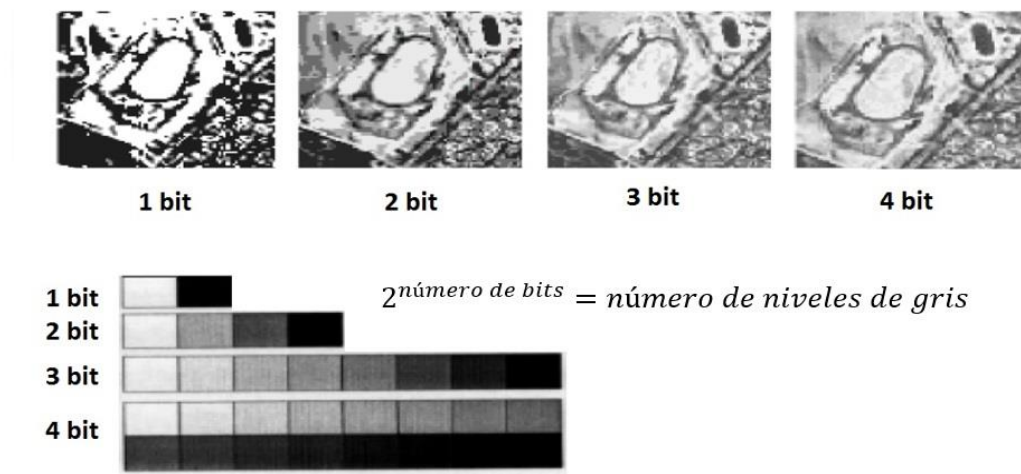


Figura 19. Resolución radiométrica.

iv. Resolución temporal

Hace referencia a la periodicidad con que el sensor adquiere imágenes de un mismo sitio. El ciclo de cobertura está en función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad, inclinación, etc.) y del diseño del sensor (ángulo de observación y apertura).

Los satélites con mejor resolución temporal son los meteorológicos, tales como el Meteosat (30 [min]) o los del NOAA (12 [h]), pues están diseñados para estudiar fenómenos dinámicos como la circulación atmosférica o marina (Sobrino et al., 2000).

Por lo general, conforme aumenta la resolución espacial de un sensor, la resolución temporal disminuye, es decir, es una relación inversa. Por lo que es importante saber la aplicación del procesamiento de las imágenes para decidir si se prefiere que las imágenes sean tomadas en periodos cortos de tiempo o que nos den información espacial a detalle (Figura 20).

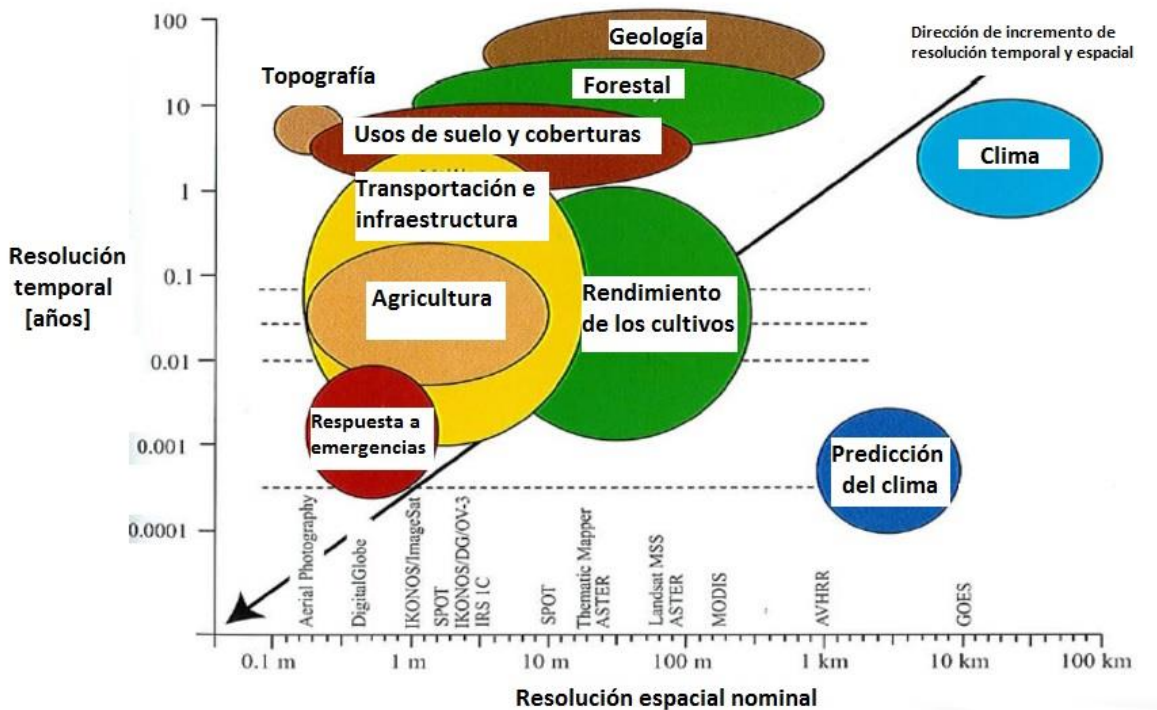


Figura 20. Resolución espacial y temporal de distintos sensores usados en distintas aplicaciones. Modificada de (Jensen, 2004).

2.5. Especificaciones del sensor ASTER

En 1999 se lanzó el sensor *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) a bordo de la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) *Earth Observing System* (EOS) Terra, el cual se diseñó en colaboración con el gobierno japonés y otras organizaciones científicas e industriales.

Tuvo como objetivo mejorar el entendimiento de los procesos ocurridos en la superficie terrestre. Las imágenes obtenidas proporcionan información más precisa en múltiples áreas de aplicación (Figura 21). A partir del 2015 sus productos son públicos (AST_L1T Product User's Guide, 2015).

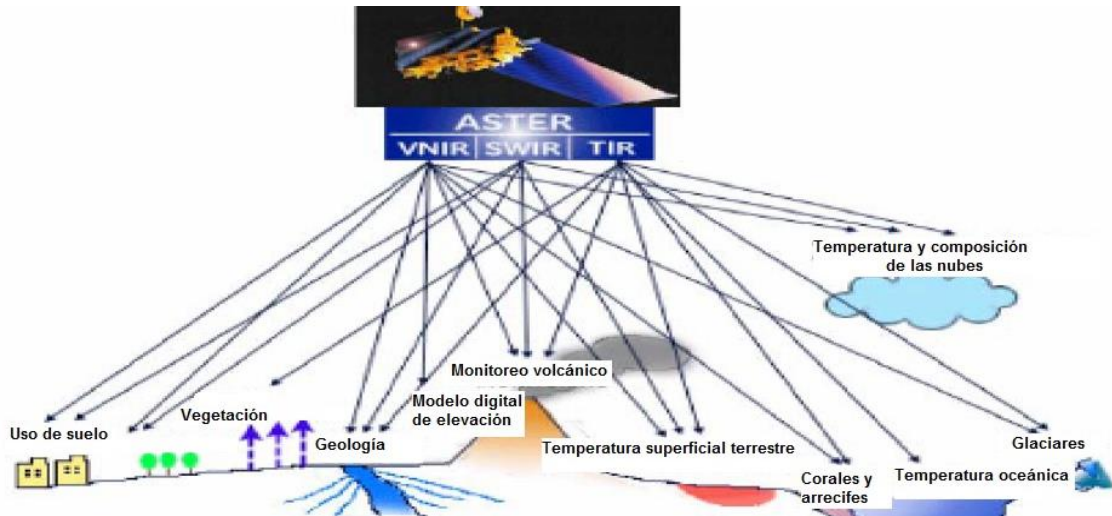


Figura 21. Áreas de aplicación de los datos ASTER. Modificada de
 (<http://www.utsa.edu/LRSG/Teaching/EES505306/project/Mineral%20Exploration%20ASTER%20Images.pdf>).

ASTER es un radiómetro multiespectral que cubre las regiones del infrarrojo VNIR, SWIR y TIR con 14 bandas que van de los 15 a los 90 [m] de resolución espacial. Así mismo, tiene cobertura espacial (*Swath*) de 60 x 60 [km] (Tabla 4).

Debido a las características anteriores, los datos procedentes del sensor ASTER son útiles para estudios geológicos y particularmente para la realización de la presente tesis, ya que los rasgos espectrales característicos de los minerales producto de alteración hidrotermal se encuentran en la región del espectro electromagnético donde el sensor ASTER tiene una mayor cobertura de bandas respecto a otros sensores, por ejemplo, Landsat (Figura 22).

Tabla 4. Características del sensor ASTER y sus subsistemas. Modificado de (Elsaid et al., 2014).

Subsistema	Número de banda	Resolución espectral [μm]	Swath [Km]	Resolución espacial [m]	Resolución radiométrica
VNIR	1	0.52-0.60	60 x 60	15	8 bits
	2	0.63-0.69			
	3N	0.78-0.86			
	3B (Backward)	0.78-0.86			
SWIR	4	1.6-1.7		30	8 bits
	5	2.145-2.185			
	6	2.185-2.225			
	7	2.235-2.285			
	8	2.295-2.365			
	9	2.36-2.43			
TIR	10	8.125-8.475		90	12 bits
	11	8.475-8.825			
	12	8.925-9.275			
	13	10.25-10.95			
	14	10.95-11.65			

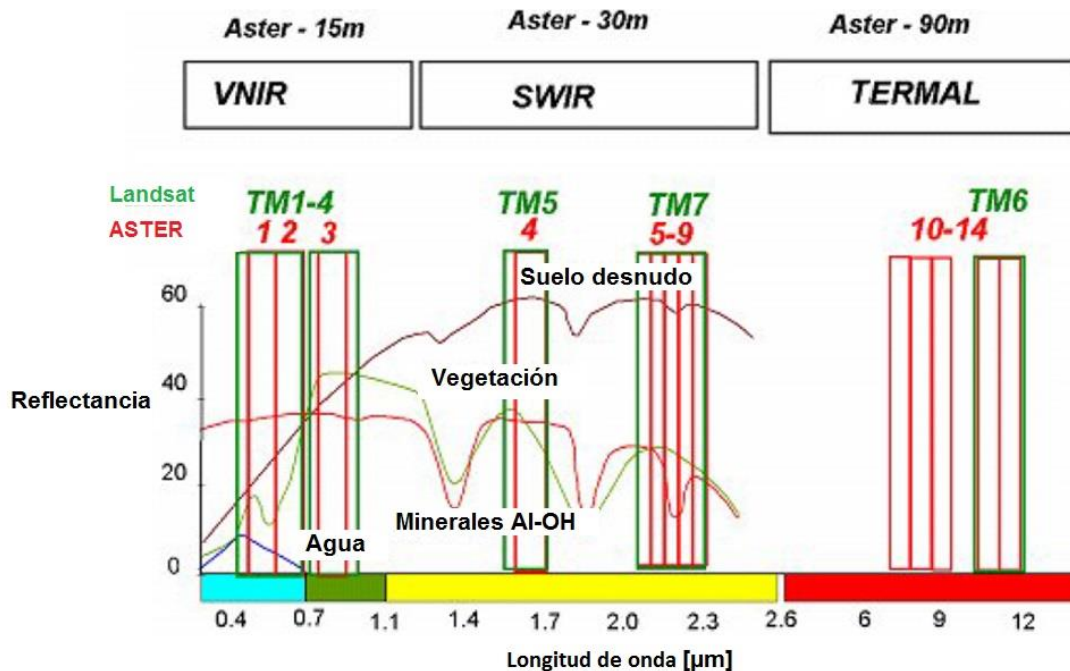


Figura 22. Comparación entre la distribución de bandas de los sensores ASTER y Landsat respecto al espectro electromagnético. Modificada de (Kalinowski & Oliver, 2004).

3. ÁREA DE ESTUDIO

3.1. Localización

La región está ubicada en la parte centro oriental del estado de Sonora, limitada por los paralelos 29°40' y 30°00' N y meridianos 109°10' y 109°40' W, aproximadamente a 100 [Km] al noreste de la ciudad de Hermosillo, abarcando las localidades de Tonibabi, Huasabas, Divisaderos, Granados y Bacadehuachi (Figura 23).

Se decidió el área de estudio con base en la mayor concentración de manantiales termales reportados por Almirudis et al. (2015).

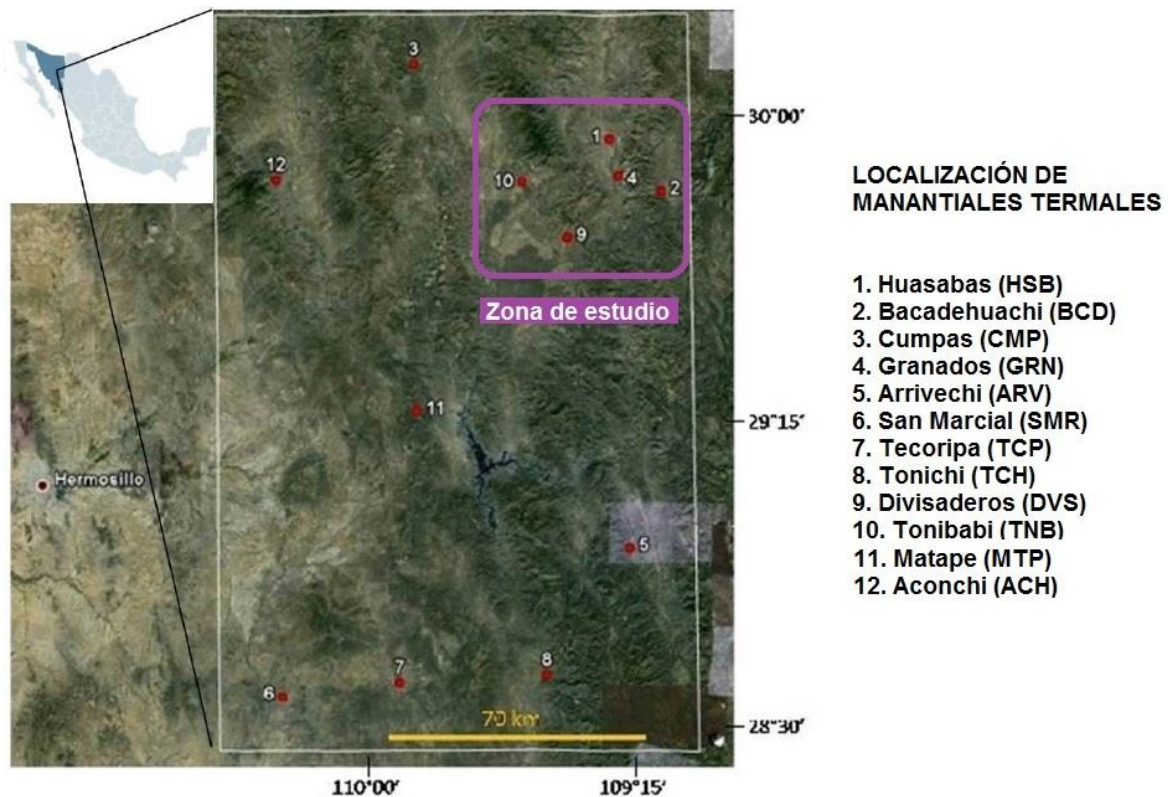


Figura 23. Ubicación de los manantiales termales reportados por (Almirudis et al., 2015).

3.2. Geología regional

La región de estudio se localiza dentro de la provincia fisiográfica de Cuencas y Sierras (Morán-Zenteno, 1986).

Los eventos tectono-magmáticos más recientes del noroeste de México ocurrieron después de la sedimentación de las rocas del Cretácico inferior (González-León, 1988) y su configuración actual está caracterizada por los eventos geológicos de la Orogenia Laramide, la formación de la Sierra Madre Occidental a partir de eventos volcánicos y un proceso extensivo conocido como *Basin and Range*. Las etapas de la historia tectono-magmática se resumen en la Figura 24.



Figura 24. Historia tectono-magmática regional.

Las unidades litológicas más antiguas de la región son secuencias sedimentarias calcáreas que forman parte de un basamento pre-Cenozoico, que es intrusionado por granitoides atribuidos al evento Laramídico (Castañeda, 1981).

El evento laramídico en la región fue un evento de deformación compresiva ocurrido del Cretácico Tardío al Eoceno (90-40 [Ma]), que produjo plegamientos y cabalgamientos en la región occidental de Norteamérica (Damon et al., 1983).

La orogenia Laramide afectó a rocas del Complejo Volcánico Inferior (CVI) de la Sierra Madre Occidental en Sinaloa y a rocas volcánicas en Chihuahua central. En la etapa final de la deformación se generaron fracturas de extensión con dirección E-W, que posteriormente hospedarían a los yacimientos tipo pórfido cuprífero de la Sierra Madre Occidental (Ferrari et al., 2005).

La formación de la Sierra Madre Occidental está relacionada con la subducción de la placa Farallón debajo de la placa de Norteamérica, ocurrida desde el Cretácico hasta mediados del Mioceno.

La estratigrafía de la SMO se compone principalmente de cinco unidades: (1) rocas plutónicas y volcánicas del Cretácico Superior-Paleoceno; (2) rocas volcánicas andesíticas y dacítico-riolíticas del Eoceno, agrupadas en CVI ; 3) ignimbritas silíceas del Oligoceno temprano y del Mioceno temprano, agrupadas en el Supergrupo Volcánico Superior (SVS); 4) coladas basáltico-andesíticas, correlacionadas con las “Andesita-Basálticas del Sur de la Cordillera” (SCORBA por sus siglas en inglés); 5) volcanismo postsubducción (coladas basálticas e ignimbritas emplazadas en distintos eventos del Mioceno tardío, Plioceno y Cuaternario) (ídem).

La tectónica extensional de la parte oriental de la SMO en el Oligoceno provocó la formación de grábenes limitados por fallas de alto ángulo, episodio denominado como el *Basin and Range* mexicano.

Esta fase de extensión cortical generó una morfología típica de sierras y valles paralelos en direcciones N-S y NW-SE que afectó a los estados de Sonora, Chihuahua, Durango, Sinaloa y Nayarit (Figura 25).



Figura 25. Basin and Range. Modificada de (Vidal-Solano et al., 2007).

Las cuencas producto del *Basin and Range* fueron rellenas por sedimentos detríticos e ignimbríticos asociados con volcanismo, que es a lo que se le denominó como Formación Baucarit (Gómez-Valencia, 2011).

A la Formación Baucarit se le atribuye una edad miocénica temprana (23-17 Ma). Su litología consta principalmente de areniscas, limolitas, tobas riolíticas y conglomerados polimícticos medianamente estratificados y consolidados, con presencia de paleocanales (González-León, 1988). La formación es sobreyacida por basaltos Pliocénico-Cuaternarios.

En el Neógeno hubo un episodio volcánico hiperalcalino (Gómez-Valencia, 2011), el cual resulta ser un marcador estratigráfico relevante en el marco geológico regional por su amplia extensión geográfica. El hecho que estos depósitos piroclásticos de flujo estén intercaladas con depósitos detríticos, muestra que el volcanismo hiperalcalino se emplazó en valles tectónicos, relacionados con los procesos de adelgazamiento de la litosfera, precursores de la apertura del Golfo de California (Vidal-Solano et al., 2007). Estas rocas terciarias están constituidas por tobas andesíticas, andesitas, dacitas, basaltos, riolitas y brechas volcánicas silicificadas (Castañeda, 1981).

La apertura del Golfo de California, que afectó a la región de Sonora, está caracterizada por un cambio en el régimen tectónico, de subducción a distensión cortical (rifting) y formación de piso oceánico en algunas cuencas del Golfo (Martín-Barajas, 2000).

Desde finales del Plioceno el volcanismo de la región ha estado representado por basaltos y andesitas porfíricas de plagioclasa, piroxeno y olivino, enriquecidos en elementos incompatibles, como Nb, lo que sugiere que provienen de magmas generados en el manto astenosférico (Paz-Moreno et al., 2003).

3.3. Geología local

De acuerdo con información del Servicio Geológico Mexicano en su Carta Geológico-Minera Madera H12-9, la zona de estudio presenta unidades litológicas que van del Precámbrico al Holoceno, representadas por rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas (Figura 26). En primer lugar, se tiene una secuencia de areniscas de cuarzo, dolomías, lutitas, calizas y areniscas calcáreas, representando al basamento.

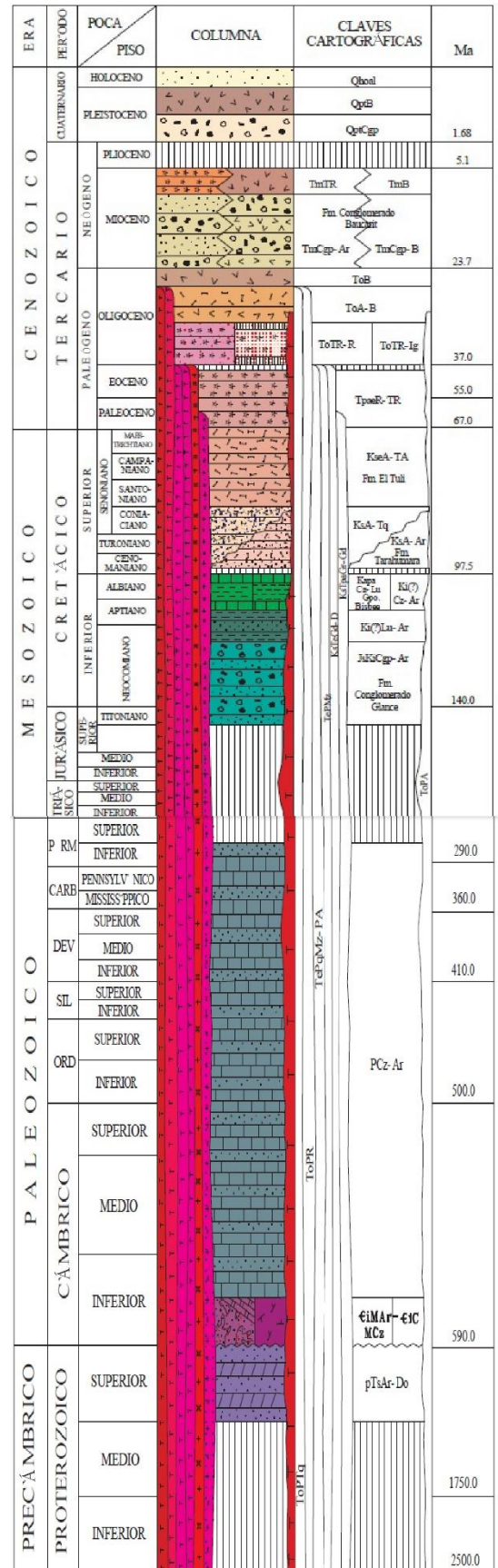
En el Cámbrico inferior afloran meta-areniscas, meta-calizas y cuarcitas. Sobreyace discordantemente una secuencia paleozoica sedimentaria compuesta principalmente por calizas y areniscas depositadas en ambiente de plataforma, que continúa hasta el Pérmico donde inicia un hiatus que acaba en el Jurásico superior (Carta Geológico-Minera Madera H12-9 1:250 000 del Servicio Geológico Mexicano).

En el Cretácico aflora la unidad basal del Grupo Bisbee que consiste de una secuencia sedimentaria del Cretácico inferior consiste de areniscas, ortocuarcitas, conglomerados polimícticos, lutitas y calizas, con deformación frágil y dúctil, así como con presencia de metamorfismo evidenciado por lentes de mármol y turmalina. Esta secuencia está correlacionada con las formaciones El Aliso y Agua Salada (González-León, 1988).

A la secuencia anterior la sobreyacen rocas volcánicas del arco magmático Laramide correspondientes al Cretácico superior, que van desde andesitas, riolitas, tobas y traquitas, correlacionadas con la Formación Tarahumara (Wilson & Rocha, 1946 en Almirudis et al., 2015).

La Formación Tarahumara (80-59 Ma), con más de 4 Km de espesor, está formada, en su base, por ignimbritas riolíticas y dacíticas, tobas de ceniza, flujos andesíticos y estatos vulcanoclásticos intercalados (González-León et al., 2011).

Figura 26. Columna estratigráfica representativa del área de estudio. Tomada de la Carta Geológico-Minera Madera H12-9 esc. 1:250 000 del Servicio Geológico Mexicano.



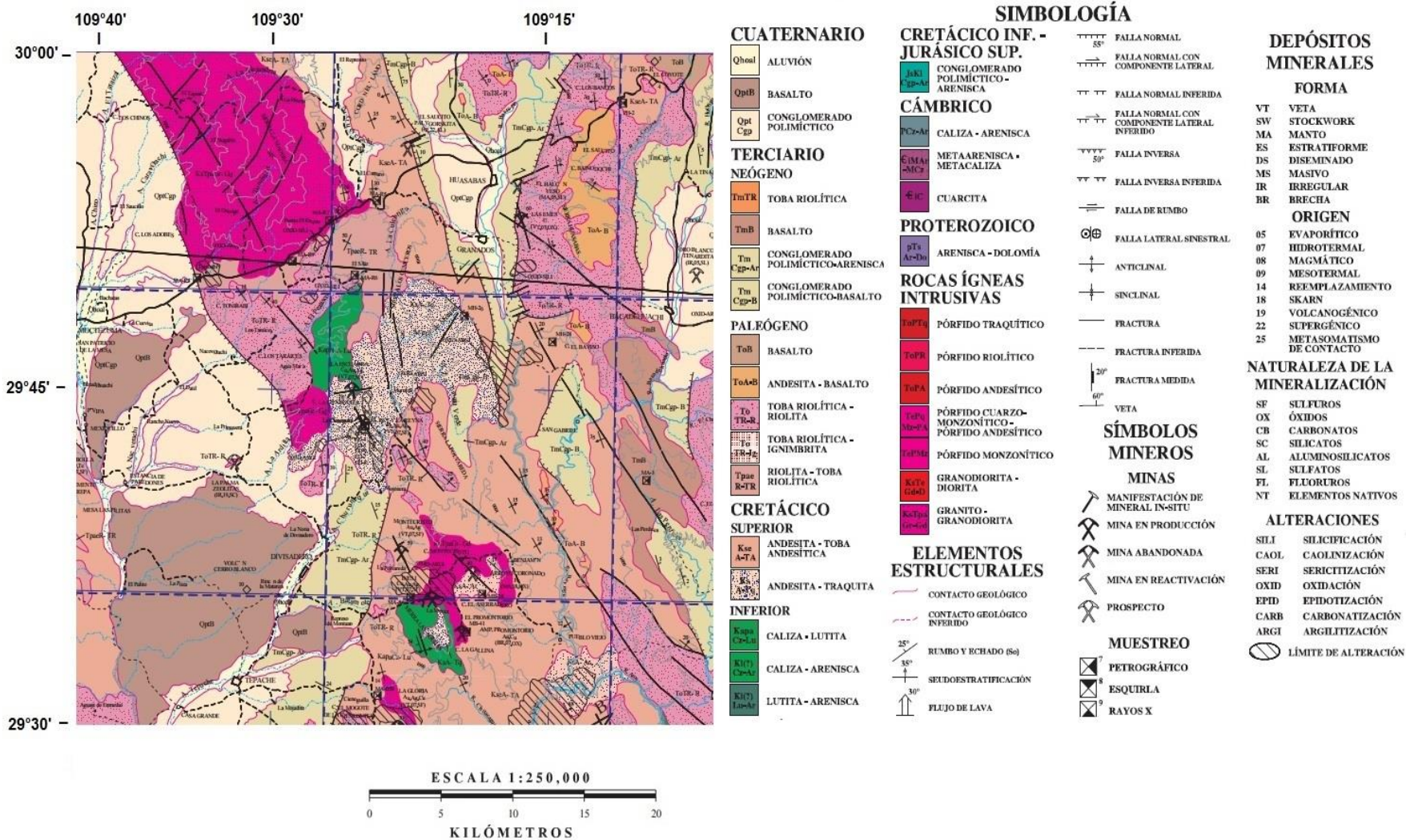


Figura 27. Mapa de la geología local del área de estudio. Modificado de la Carta Geológico-Minera Madera H12-9 esc.1:250 000 del Servicio Geológico Mexicano.

Las dos secuencias anteriores son intrusionadas por rocas plutónicas (dioritas, granodioritas, monzonitas y granitos) con edades de 71-50 Ma (ídem).

Las rocas laramídicas son deformadas por fallas normales producto del evento extensivo *Basin and Range* y forman cuencas elongadas norte-sur a través del río Moctezuma.

Después se encuentra un paquete de rocas terciarias, tales como tobas ácidas, riolitas e ignimbritas, correlacionadas con el SVS (Almirudis et al., 2015).

En el Cuaternario, las cuencas producto del *Basin and Range* son rellenas por depósitos aluviales jóvenes de la Formación Baucarit, y el Valle Moctezuma por basaltos, formando el Campo Cuaternario Moctezuma (ídem).

En el mapa de la geología local de la zona de estudio (Figura 27) se muestra una amplia extensión de rocas ígneas intrusivas al noroeste y basaltos al suroeste, así como regiones dispersas de calizas, andesitas, riolitas, conglomerados, relleno de aluvión y tobas de composición variada.

Estructuralmente hablando, predomina una sucesión de sierras alargadas afectadas por fallas regionales con rumbo preferencial NNW-SSE truncadas por fallas de orientación NE-SW, característica típica de la región ligada al régimen distensivo del Terciario *Basin and Range*.

Además, en la región de estudio existen los prospectos minerales de La Palma (zeolitas), Oro Blanco (thenardita), El Saucito (palygorskita), Arroyo Coronado (Fe) y El Halcón (yeso), así como las minas abandonadas de La Escuadra (Cu, Au, Ag), El Rey y La Reyna (Pb, Au, Ag), Montecristo (Au, Ag), Inés I (Cu, Au, Ag), Amp. Promontorio (Au, Cu) y Las Emes (U) (Portal electrónico del SGM – GeoInfoMex²).

El prospecto de zeolitas La Palma, en la región centro-poniente de la figura 27, tiene un origen vulcano-sedimentario, estructura irregular, naturaleza de mineralización de aluminosilicatos y su alteración asociada se desconoce (ídem).

En el centro-norte de la imagen, está el prospecto de palygorskita El Saucito que tiene un origen supergénico, estructura irregular, tipo de mineralización de los aluminosilicatos y su alteración no ha sido reconocida (ídem).

En las proximidades se localiza el prospecto de yeso El Halcón, cuyo origen es evaporítico, su tipo de mineralización es de sulfatos y como estructuras se han reconocido mantos (ídem).

Más al sur se tiene la mina abandonada Las Emes donde se solía extraer Uranio. Es de origen hidrotermal, posee estructuras de vetas y su naturaleza de mineralización es óxidos. La alteración igualmente resulta desconocida (ídem).

En la región central de la imagen está la mina abandonada La Escuadra, donde se extrajo Cu, Au, Ag. Su origen es hidrotermal, posee estructuras de veta, no tiene una alteración asociada reconocida y el tipo de mineralización es de sulfuros (ídem).

Avanzando al sur, se encuentra otra mina abandonada de Pb, Au y Ag llamada El Rey y La Reyna, cuyo origen es hidrotermal, está asociada al tipo de alteración oxidación-argilitización, tiene estructura de veta y pertenece al tipo de mineralización de sulfuros (ídem).

En el centro sur de la figura 27 se localiza la mina abandonada de oro y plata Montecristo, cuya alteración asociada resulta desconocida, su estructura es vetiforme y pertenece al tipo de mineralización de los sulfuros (ídem).

Rumbo al oriente se ubica el prospecto de Fierro Arroyo Coronado, que tiene origen de skarn, estructuras reconocidas de mantos y tipo de mineralización de óxidos (ídem).

A pocos metros se encuentran la mina abandonada de Cu, Au y Ag Inés I, cuyo origen es hidrotermal, tiene estructuras de vetas y su tipo de mineralización es de sulfuros (ídem).

A su vez, se encuentra la mina de Au y Cu Amp. Promontorio, también abandonada, con estructura de brechas y tipo de mineralización de óxidos (ídem).

Al noreste del mapa, se tiene el prospecto de thenardita llamado Oro Blanco, cuyo origen es evaporítico, su alteración asociada se desconoce, posee una estructura irregular y pertenece al tipo de mineralización de los sulfuros (ídem).

En el límite poniente fuera de la zona de estudio (Figura 27) Se presentan depósitos de tipo pórvido cuprífero en forma de brechas, vetas, diseminados y zonas de stockworks, relacionados a cuerpos hipabisales y troncos granodioríticos, estando representados principalmente por la región mineralizada de Cumobabi, donde hace años se explotaron importantes depósitos de molibdeno y cobre (ídem).

En general, el SGM considera que las principales áreas de interés para la exploración de minerales metálicos y no metálicos en la zona de estudio y regiones aledañas son Cumobabi, Moctezuma, Lampazos, Santa Teresa, Huasabas y Bacadehuachi.

3.4. Antecedentes de exploración en el área de estudio

Dentro del desarrollo de un proyecto geotérmico, las etapas de reconocimiento y exploración incluyen, entre otros, el análisis de imágenes de satélite con técnicas de percepción remota y el desarrollo de modelos conceptuales basados en la geología, geoquímica y geofísica de la zona.

En el presente trabajo se tomaron en cuenta las investigaciones realizadas por Almirudis et al. (2015), referentes al potencial energético basado en estudios geoquímicos de la zona. Ellos generaron un modelo geoquímico preliminar para la evaluación de posibles zonas con potencial geotérmico ($T < 200^{\circ}\text{C}$) en el centro-oriente del estado de Sonora, enfocado en caracterizar el origen de los fluidos termales e identificar los procesos de interacción agua-roca. Usando los geotermómetros Na/K y Na/Li en fluidos, se estimó como temperatura de equilibrio del sistema geotérmico, 150°C .

4. METODOLOGÍA

4.1. Materiales

4.1.1. Hardware y software

El equipo de cómputo utilizado fue una laptop HP con procesador Intel Core i5 sexta generación, con una memoria RAM de 8 Gb y unidad de estado sólido de 128 Gb, así como un sistema operativo de 64 bits.

Se emplearon los programas ENVI Classic e Idrisi Selva para el procesamiento de las imágenes.

4.1.2. Imágenes

Para este trabajo se usaron imágenes multispectrales adquiridas con el sensor ASTER de nivel L1T (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Level 1 Precision Terrain Corrected*), el cual es una mejora de los productos ASTER L1A y L1B pues incluye la corrección radiométrica y geométrica, además de incorporar una rotación al norte y una corrección por el fenómeno de *Crosstalk* (AST_L1T Product User's Guide, 2015; Meyer et al., 2015). Se descargaron del sitio web Earth Explorer de la USGS.

Las imágenes a procesar fueron adquiridas el 10 de marzo de 2008, alrededor de las 18 horas.

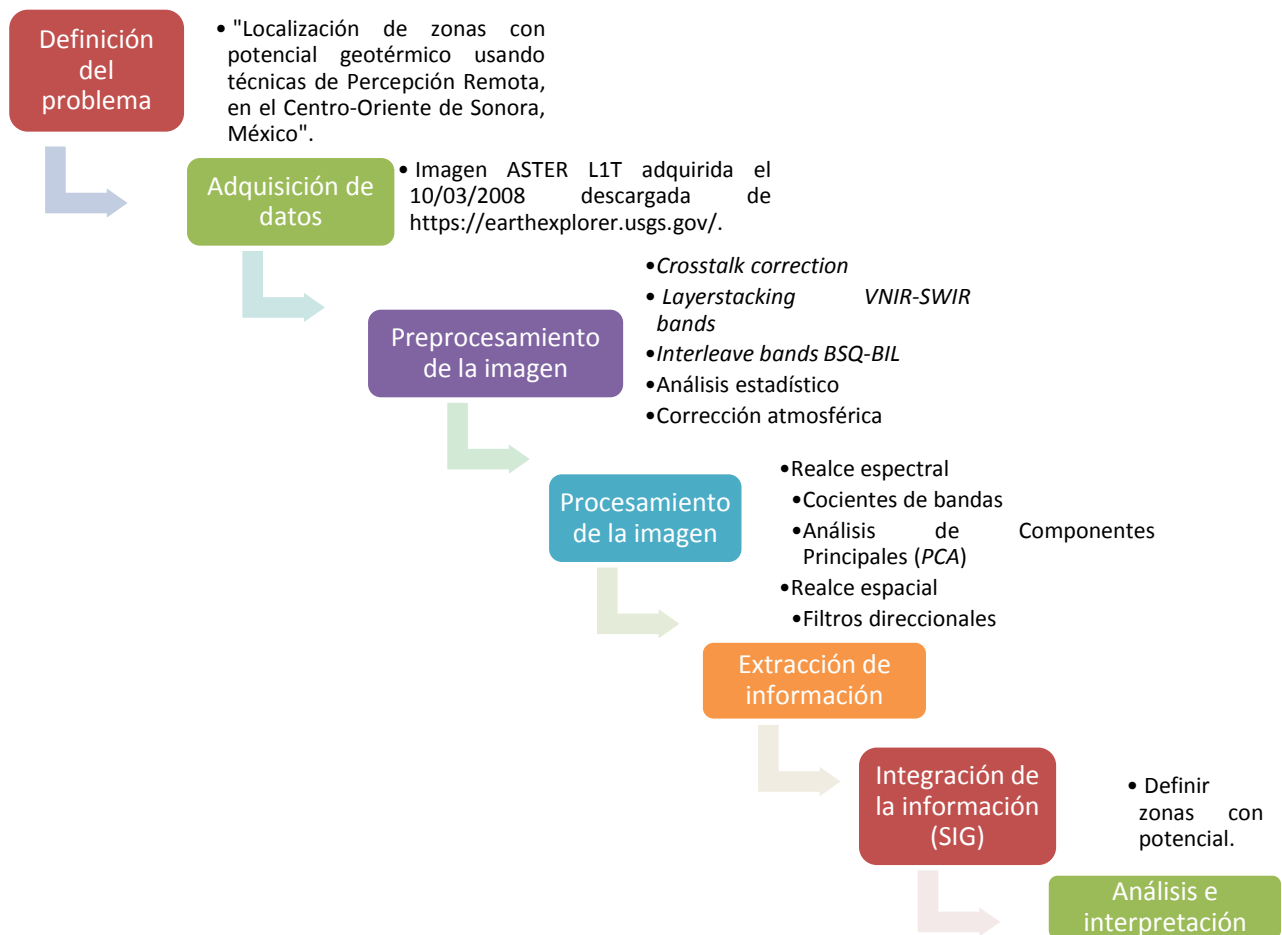


Figura 28. Flujo de trabajo seguido en la presente investigación.

Con base en los objetivos del presente trabajo, sólo se utilizaron las primeras 9 bandas correspondientes a la región del visible y del infrarrojo de onda corta (VNIR-SWIR). La parte del infrarrojo térmico, no se usó porque no resulta útil para nuestros fines.

A las imágenes se les aplicaron los procesos que señala el flujo de trabajo de la Figura 28.

4.2. Preprocesamiento

Las imágenes deben ser preprocesadas debido a que presentan errores inherentes a su adquisición ocasionados por fenómenos físicos o por el formato de almacenamiento de los datos. Estos errores se corrigen mediante técnicas específicas que han sido desarrolladas por diversos autores.

4.2.1. Corrección por Crosstalk (*Crosstalk correction*)

Crosstalk se refiere al efecto causado por la desviación de la señal de la banda 4 (1.6-1.7 μm) hacia las bandas 5, 6, 7, 8 y 9 (Kalinowski & Oliver, 2004).

Debido a que la banda 4 tiene un gran espesor espectral y su radiancia de entrada es aproximadamente cinco veces mayor que la de las otras bandas, la energía que incide en esta región es reflejada en el detector y en los bordes de los filtros, lo que a su vez genera múltiples reflexiones en el área del plano focal (Figura 29), causando una gran cantidad de información falsa en las bandas adyacentes (Iwasaki & Tonooka, 2005).

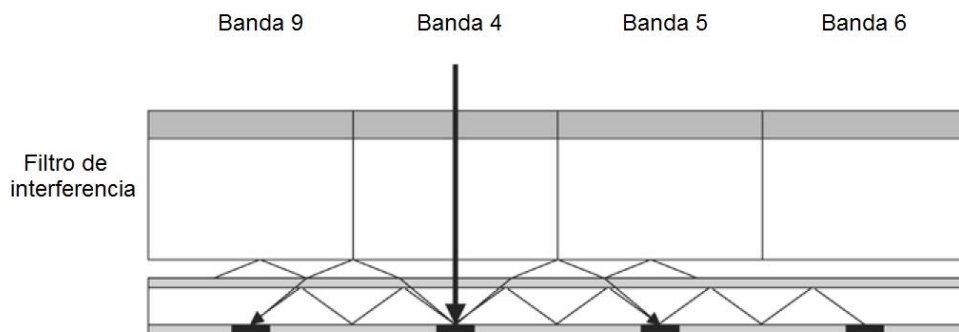


Figura 29. Fenómeno de Crosstalk. Modificada de (Iwasaki & Tonooka, 2005).

El fenómeno de Crosstalk es observado en los productos ASTER y el algoritmo para corregir dicho efecto tiene como fin separar la respuesta espectral de cada banda del SWIR. Existen ciertos parámetros por default (Tabla 5) que se han determinado para realizar la corrección.

Tabla 5. Parámetros por default para realizar la corrección por Crosstalk. Modificada de (Iwasaki & Tonooka, 2005).

Número de banda	$x^{(k)}$ (píxel)	$y^{(k)}$ (píxel)	$a^{(k)}$	$\sigma_x^{(k)}$ (píxel)	$\sigma_y^{(k)}$ (píxel)	$b^{(k)}$	$c^{(k)}$
4	-	-	-	-	-	1.0	1.0
5	0	65	0.09	28	20	3.282	0.316
6	0	146	0.03	30	26	3.329	0.287
7	0	-227	0.02	34	30	3.635	0.285
8	0	-146	0.03	30	26	5.224	0.198
9	0	-65	0.09	28	20	6.072	0.146

$$f_{\text{corregida}}^{(k)}(x, y) = \frac{f^{(k)}(x, y) - h^{(k)}(x, y) * f^{(4)}(x - x^{(k)}, y - y^{(k)})}{1 - b^{(k)}a^{(k)}c^{(k)}}$$

$$h^{(k)}(x, y) = \frac{a^{(k)}}{2\pi\sigma_x^{(k)}\sigma_y^{(k)}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{x^2}{\sigma_x^{(k)2}} + \frac{y^2}{\sigma_y^{(k)2}} \right] \right\}$$

Donde $h^{(k)}(x, y)$ es una función de filtro Gaussiano que se va a convolucionar, $a^{(k)}$ es la amplitud de la cantidad de luz incidente que proviene de la banda 4, $x^{(k)}$ y $y^{(k)}$ son las direcciones del transecto, $\sigma_x^{(k)}$ y $\sigma_y^{(k)}$ representan el tamaño (en píxeles) del filtro Gaussiano aplicado en las direcciones del transecto, k es la banda que se está corrigiendo, $b^{(k)}$ y $c^{(k)}$ son coeficientes de radiancia y sensibilidad que dependen del detector.

Como se mencionó previamente, los productos ASTER L1T ya incluyen la corrección radiométrica, geométrica y la aplicación de los coeficientes de corrección por *Crosstalk*, por lo que ya no fue necesario realizar estas correcciones como parte del preprocesamiento.

4.2.2. Apilamiento de capas (*Layerstacking VNIR-SWIR bands*)

Debido a que la resolución espacial en la región del VNIR y en la del SWIR es distinta, se tuvo que realizar un remuestreo de la información para que todo fuera consistente y al realizar las operaciones no se tuvieran errores. Las bandas del VNIR con resolución de 15 [m] fueron remuestreadas a 30 [m] para equipararlas con la resolución espacial de las bandas del SWIR.

4.2.3. Cambiar bandas intercaladas (*Interleave bands BSQ-BIL*)

Existen tres métodos comunes para el almacenamiento de datos de imágenes multibanda: banda secuencial (BSQ), banda intercalada por línea (BIL) y banda intercalada por píxel (BIP) (Figura 30).

El esquema de banda secuencial organiza la información para la imagen una banda a la vez, es decir, todos los píxeles de la banda 1 se almacenan primero, después todos los de la banda 2, y así subsecuentemente.

BIL almacena la imagen tomando una fila de cada banda y así sucesivamente hasta que se complete la imagen.

La información de BIP se escribe píxel por píxel, por ejemplo, con la misma imagen de tres bandas, los datos para las bandas 1, 2, y 3 se organizan para el primer píxel en la columna 1, y así se continua hasta terminar con todos los datos de la imagen.

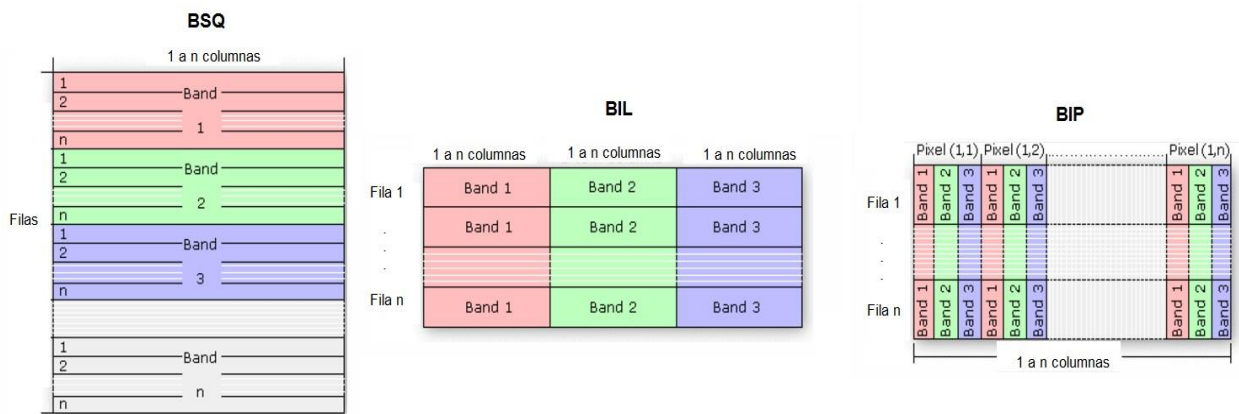


Figura 30. Esquemas de almacenamiento de datos de imágenes multibanda. Modificada de (<http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/bil-bip-and-bsq-raster-files.htm>).

En este trabajo se utilizó el esquema de almacenamiento de banda intercalada por línea, por lo que se tuvo que convertir de BSQ a BIL.

4.2.4. Análisis estadístico

La primera acción a realizar consiste de un análisis estadístico de los datos para conocer la distribución de la información mediante sus medidas de tendencia central y de dispersión.

Posteriormente se efectúa un análisis estadístico multivariado para conocer la interdependencia entre variables, lo que nos ayudará para saber qué tan relacionada está la información de las bandas y de qué manera se pueden aplicar métodos de realce espectral como es el caso del Análisis de Componentes Principales.

4.2.5. Corrección atmosférica

Con el fin de corregir el efecto de la atmósfera en las imágenes, se empleó el método de Sustracción del Pixel Oscuro propuesto por Chávez (1975). Se eligió este método de corrección debido a la ausencia de parámetros atmosféricos para poder realizar una corrección más precisa (FLAASH), y a la presencia de cuerpos significativos de agua en nuestras imágenes.

La técnica se basa en conocer la respuesta espectral de un cuerpo que no sufre dispersión atmosférica, por ejemplo, de cuerpos de agua que suelen absorber fuertemente la radiación en la región del SWIR, por lo que su valor digital en las imágenes debería ser cero.

Al observar los histogramas se tiene que los menores valores digitales no son cero debido a una contribución atmosférica (Figura 31) para cada banda. Se trata entonces de sustraer dichos valores haciéndolos quedar en cero, de tal manera que se suprima dicho efecto atmosférico (Campbell & Wynne, 2011).

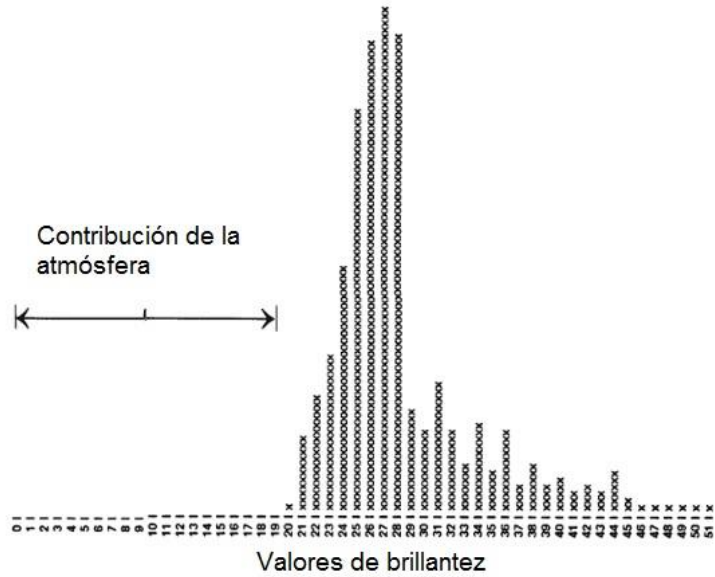


Figura 31. Ejemplo de histograma de una imagen con efecto atmosférico. Modificada de (Campbell & Wynne, 2011).

4.3. Procesamiento

4.3.1. Realce espectral

Con el fin de discriminar las zonas que contienen minerales producto de alteración hidrotermal es necesario aplicar distintas técnicas de procesamiento para resaltar rasgos espectrales en las imágenes satelitales. En este trabajo se utilizaron los métodos de cocientes de bandas y Análisis de Componentes Principales. Así mismo, se emplearon distintas composiciones en falso color y deformación del histograma para visualizar mejor los resultados.

4.3.1.1. Cocientes de bandas

Emplear un cociente entre bandas es útil para hacer un realce espectral debido a que en el numerador se coloca una banda que presenta alta reflectancia, mientras que, en el denominador, una de alta absorbancia. De esta manera, se incrementarán aún más los valores altos de brillantez y se atenúan más los valores bajos. Con esto se podrá diferenciar como píxeles brillantes los rasgos atribuibles a la respuesta espectral del material geológico de interés.

$$\text{Cociente de realce} = \frac{\text{Banda con patrón de alta reflectancia}}{\text{Banda con patrón de alta absorbancia}}$$

Diversos autores han propuesto cocientes espectrales para discriminar materiales producto de alteración hidrotermal.

En la Tabla 6 se enlistan los cocientes empleados en este trabajo, donde las bandas se refieren a las imágenes multiespectrales del sensor ASTER.

Debido al objetivo del trabajo, a la escala y a las características geológicas de la zona de estudio, se decidió identificar tres zonas: la zona de vegetación, la zona de óxidos y la zona con alteración fílica-argílica-argílica avanzada. Ésta última se designó como una combinación de tres tipos de alteración debido a que establecer un límite entre la zona de alteración fílica, argílica y argílica avanzada resulta muy complicado con la información obtenida del procesamiento de las imágenes ASTER y se requeriría una imagen hiperespectral para diferenciarlas, por lo que se decidió englobarlas en una sola categoría.

<i>Tabla 6. Cocientes de bandas ASTER empleados en el presente trabajo.</i>				
MATERIAL DE INTERÉS	BANDA DE ALTA REFLECTANCIA	BANDA DE BAJA REFLECTANCIA	COCIENTE	REFERENCIA
Vegetación	B3 (0.78-0.86 [μm])	B2 (0.63-0.69 [μm])	3/2	
Óxidos de Hierro (goethita, limonita, hematita)	B2 (0.63-0.69 [μm])	B1 (0.52-0.60 [μm])	2/1	Mars & Rowan (2006)
Alteración Fílica-Argílica- Argílica Avanzada (sericita + muscovita + illita + smectita + jarosita + caolinita + alunita)	B4 (1.6-1.7 [μm])	B5 (2.145-2.185 [μm])	4/5	Mars & Rowan (2006)

El proceso para llevar a cabo el realce espectral por cocientes de bandas fue el siguiente:

- i. Para evitar una indeterminación, es importante considerar que no pueden existir valores iguales a cero en el denominador, por lo que fue necesario ajustar los valores digitales de todas las bandas reasignándoles un nuevo valor, que en este caso fue uno debido a que es el valor mínimo diferente de cero.
- ii. Tomando en cuenta las características espectrales de los minerales de interés, se aplican diversos cocientes de bandas a la imagen (Tabla 6).
- iii. Se aplica una deformación lineal de los histogramas con saturación del 2%, para mejorar la visualización.
- iv. Se realizan composiciones en falso color con los cocientes generados.

4.3.1.2. Análisis de Componentes Principales

Es un método estadístico de análisis multivariado que tiene por objetivo reducir la dimensionalidad del problema, eliminando la información redundante y generando nuevas variables que sinteticen la información de los datos originales.

Las componentes principales generadas son combinaciones lineales de las variables originales y no estarán correlacionadas unas con otras. Esto se realiza encontrando un nuevo sistema de ejes ortogonales, provenientes de una rotación, que maximice la variabilidad de los datos (Kalinowski, 2004).

Es posible calcular los Componentes Principales de dos formas: estandarizada, usando la matriz de correlación; y no estandarizada, usando la matriz de varianza-covarianza (Gupta et al, 2013).

La varianza en imágenes multispectrales está relacionada con la respuesta espectral de las coberturas terrestres y está influenciada por la dimensionalidad de los datos. Los valores de las bandas de la imagen son tratados como variables por lo que se puede utilizar el Análisis de Componentes Principales para tomar información de la distribución espacial y la abundancia relativa de los materiales en superficie (Loughlin, 1991).

Las componentes sintetizarán la máxima variabilidad contenida en los datos originales. El porcentaje de varianza de la primera componente principal será el mayor e irá disminuyendo en las demás componentes sucesivamente, apareciendo una proporción mayor de ruido en las últimas componentes (Pla, 1986).

El número de componentes principales de salida será igual al número de bandas ingresadas al Análisis de Componentes Principales (*PCA* por sus iniciales en inglés). La primera componente (PC1) contiene rasgos comunes de todas las bandas, como la topografía y demás información morfológica. La componente dos (PC2) es ortogonal a la primera y resalta diferencias espectrales entre el visible y el infrarrojo. La PC3 es ortogonal a las anteriores y da la dirección de la tercera máxima varianza (Elsaid, 2014).

Descrita por Crosta y Moore (1989) *Feature Oriented Principal Component Selection (FPCS)* es una técnica que consiste en aplicar el *PCA* a las bandas de la imagen donde, examinando la matriz de carga de los eigenvectores, se podrá identificar la contribución (positiva o negativa) de las bandas originales para cada componente principal y seleccionar así, componentes específicas para desplegar los rasgos espectrales característicos de los materiales de interés en una composición en falso color (Elsaid, 2014). El realce está basado en la magnitud y signo de los valores de la matriz de carga y se puede saber si el objetivo está resaltado en píxeles oscuros (valores negativos) o brillantes (valores positivos) (Loughlin, 1991).

El Análisis de Componentes Principales usando todas las bandas no siempre genera resultados útiles. Si el número de las bandas de entrada se reduce, las posibilidades de encontrar una componente principal que realce la información espectral para un grupo mineral específico aumentan (Loughlin, 1991).

Por otro lado, una desventaja del método, es que los diversos softwares de procesamiento de imágenes utilizan distintos algoritmos para el cálculo de la matriz de eigenvectores, por lo que un mismo paquete de datos de entrada puede generar datos de salida diferentes. Por esta razón, su interpretación no es trivial, en especial por los efectos de las combinaciones de eigenvectores positivos y negativos (Gupta et al., 2013).

El proceso para llevar a cabo el realce espectral por Análisis de Componentes Principales fue el siguiente:

- i. De acuerdo con las características espectrales del material de interés, se ingresan las bandas de la imagen, corregidas previamente por efecto atmosférico, como datos de entrada para el *PCA*.
- ii. Se despliegan las matrices de eigenvectores y de carga, las cuales se analizan para identificar componentes útiles para el realce espectral de zonas de alteración mineral.
- iii. Se aplica una deformación lineal de los histogramas con saturación del 2%, para mejorar la visualización de las imágenes de las componentes generadas.
- iv. Se realizan composiciones en falso color con las componentes principales seleccionadas para resaltar las zonas de interés.

En resumen, los procesos de realce espectral aplicados a la imagen de interés se muestran en la Tabla 7. Las bandas seleccionadas para cada proceso presentan rasgos de absorbancia y reflectancia característicos con los que es posible identificar los materiales de nuestro interés.

<i>Tabla 7. Procesos para realce espectral usados en el presente trabajo.</i>			
Composición en falso color	Material de interés	Cociente espectral	PCA
R	Vegetación	Banda 3 / Banda 2	Bandas: 1,2,3,4
G	Zona de óxidos	Banda 2 / Banda 1	Bandas: 1,2,3,4
B	Zona con alteración filica-argílica-argílica avanzada	Banda 4 / Banda 5	Bandas: 2,3,4,5

4.3.2. Realce espacial

El realce espacial es un método que se encarga de aumentar o disminuir contrastes en la imagen modificando los valores de los píxeles, con base en los valores de los píxeles que lo rodean.

Las imágenes se filtran mediante operaciones de convolución, donde se utiliza un *kernel* o ventana de $n \times n$ que se va moviendo a través de la imagen. Sucesivamente, los elementos de la imagen original son multiplicados por los valores de la ventana, y los productos son sumados para formar la imagen filtrada resultante (Moore & Waltz, 1983).

Existe un realce espacial de baja frecuencia, donde se enfatizan las tendencias generales y suavizan la imagen (filtros pasa-bajas); y el realce espacial de alta frecuencia, donde se enfatizan los detalles locales y destacan los bordes (filtros pasa-altas).

La detección de bordes es útil para localizar lineamientos asociados a estructuras geológicas, que se manifiestan en la imagen como variaciones abruptas de brillantez, las cuales no siempre son tan evidentes. En nuestro caso, es de vital importancia identificar zonas de debilidad estructural que resulten propicias para la circulación de fluidos geotermales.

Existen filtros direccionales y no direccionales. Los primeros sirven para resaltar bordes en todas direcciones, mientras que los segundos, ayudan a resaltar lineamientos en una dirección preferencial y sus *kernel* se diseñan dependiendo de la dirección de realce.

En este trabajo se utilizó el método de Moore & Waltz (1983) para la detección de lineamientos, usando como imagen de entrada la componente principal 1 (C1) obtenida del PCA de 9 bandas. El desarrollo se describe a continuación:

- i. A la imagen satelital de entrada se le aplica un filtro pasa-bajas para eliminar el ruido de alta frecuencia.
- ii. Se aplican los siguientes filtros direccionales para incrementar los contrastes y delinear rasgos:

$$N = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

$$E = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$S = \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$W = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \end{pmatrix}$$

$$NE = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$SE = \begin{pmatrix} -1 & -1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$NW = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

$$SW = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

- iii. Por segunda ocasión, se usan filtros pasa-bajas o funciones promedio para suavizar y quitar los efectos secundarios (ruido) de la convolución.
- iv. Aplicar a la imagen una deformación lineal del histograma con saturación del 2%.
- v. A la imagen obtenida del paso iv se le suma la imagen original de la C1.
- vi. Deformar nuevamente el histograma de manera lineal con saturación del 2%
- vii. A las imágenes filtradas resultantes se les sobrepone una capa vectorizada que mapee los lineamientos asociados a rasgos geológicos estructurales.

5. RESULTADOS

5.1. Resultados del Preprocesamiento

5.1.1. Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos crudos demostró que en las primeras bandas del espectro electromagnético se tiene un mayor efecto de la atmósfera, pues los valores mínimos son ligeramente más altos que en las demás. De igual manera, los valores de desviación estándar nos indican que los datos de estas bandas están más alejados de la media, es decir, que existe mucha variabilidad (Tabla 8).

Tabla 8. Estadísticas básicas de las nueve bandas de nueve bandas del VNIR-SWIR de la imagen ASTER a procesar.

	Min	Max	Media	Desviación estándar
Banda 1	34	255	72.516543	13.235468
Banda 2	19	254	60.974267	15.865558
Banda 3	16	162	59.548189	10.299409
Banda 4	13	116	55.036567	10.26098
Banda 5	17	95	48.982384	8.576626
Banda 6	12	97	48.823944	9.42666
Banda 7	12	92	43.366292	8.720015
Banda 8	11	102	44.462151	9.45351
Banda 9	17	104	47.303611	8.490948

La varianza es causada por las diferencias en la respuesta espectral de los diferentes materiales en cada banda, por lo tanto, entre mayor sea la varianza, mejor se podrá discriminar dichos contrastes. Los valores de varianza se localizan en la diagonal principal de la matriz de varianza-covarianza.

Como se ve en la Tabla 9, la banda 2 (resaltada con amarillo) es la que presenta mayor varianza y, a su vez, posee la mayor covarianza con las demás bandas. Esto nos indica que los materiales que tengan rasgos característicos en esta banda, por ejemplo la vegetación, que tiene rasgos de absorción en esta banda, serán mejor identificados.

La correlación y la covarianza son medidas que indican el grado de relación entre variables, en este caso bandas. Con base en la información estadística (Tabla 10), se observa que las bandas 1 y 2 están altamente correlacionadas superando el 90%, al igual que las bandas 4 y 5, 4 y 6, 4 y 7, 4 y 8, 4 y 9, 4 y 6, 5 y 7, 5 y 8, 5 y 9, 6 y 7, 6 y 8, 6 y 9, 7 y 8, 7 y 9, 8 y 9 (resaltadas con amarillo), lo que indica que estas bandas contienen información redundante. Además, se percibe la simetría de las matrices de varianza-covarianza y correlación (Tablas 9 y 10).

Tabla 9. Matriz de Varianza-Covarianza de las nueve bandas del VNIR-SWIR de la imagen ASTER.

Matriz de Varianza-Covarianza									
	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7	Banda 8	Banda 9
Banda 1	175.178	205.968	108.394	106.296	94.245	102.242	97.001	106.004	93.900
Banda 2	205.968	251.716	128.357	130.035	115.748	125.604	119.389	130.550	115.907
Banda 3	108.394	128.357	106.078	81.629	60.897	67.646	61.455	66.617	59.632
Banda 4	106.296	130.035	81.629	105.288	83.257	92.112	83.638	89.500	80.628
Banda 5	94.245	115.748	60.897	83.257	73.559	79.657	73.675	79.445	71.134
Banda 6	102.242	125.604	67.646	92.112	79.657	88.862	80.577	87.021	78.212
Banda 7	97.001	119.389	61.455	83.638	73.675	80.577	76.039	81.369	72.502
Banda 8	106.004	130.550	66.617	89.500	79.445	87.021	81.369	89.369	78.891
Banda 9	93.900	115.907	59.632	80.628	71.134	78.212	72.502	78.891	72.096

Tabla 10. Matriz de Correlación de las nueve bandas del VNIR-SWIR de la imagen ASTER.

Matriz de Correlación									
	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7	Banda 8	Banda 9
Banda 1	1.000	0.981	0.795	0.783	0.830	0.819	0.840	0.847	0.836
Banda 2	0.981	1.000	0.786	0.799	0.851	0.840	0.863	0.870	0.860
Banda 3	0.795	0.786	1.000	0.772	0.689	0.697	0.684	0.684	0.682
Banda 4	0.783	0.799	0.772	1.000	0.946	0.952	0.935	0.923	0.925
Banda 5	0.830	0.851	0.689	0.946	1.000	0.985	0.985	0.980	0.977
Banda 6	0.819	0.840	0.697	0.952	0.985	1.000	0.980	0.976	0.977
Banda 7	0.840	0.863	0.684	0.935	0.985	0.980	1.000	0.987	0.979
Banda 8	0.847	0.870	0.684	0.923	0.980	0.976	0.987	1.000	0.983
Banda 9	0.836	0.860	0.682	0.925	0.977	0.977	0.979	0.983	1.000

5.1.2. Corrección atmosférica

Con el método de Sustracción de Pixel Oscuro se corrigió el efecto atmosférico, haciendo la resta aritmética del mínimo valor a cada banda, de tal forma que los números digitales de la imagen resultante empezaran en cero (Figura 32).

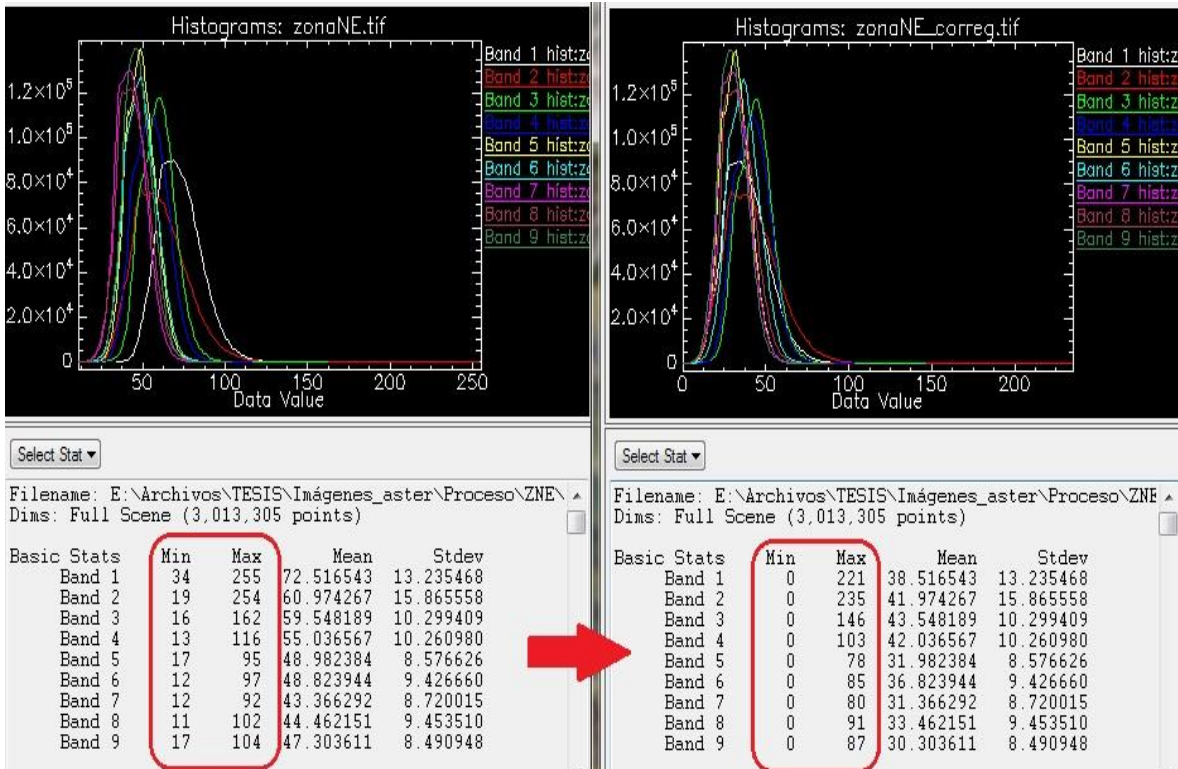


Figura 32. Corrección atmosférica por el método de Sustracción de Pixel Oscuro. Gráficas obtenidas con el software ENVI Classic.

5.2. Resultados del Procesamiento

5.2.1. Realce espectral

5.2.1.1. Cocientes de bandas

Zona de vegetación

La Figura 33 es la imagen resultado del cociente de bandas 3/2, frecuentemente utilizado para resaltar rasgos de vegetación. Los colores claros nos indican zonas con mayor contribución de la vegetación, mientras que los tonos oscuros nos indican regiones de escasez de la misma.

Cociente 3/2 para realce de vegetación

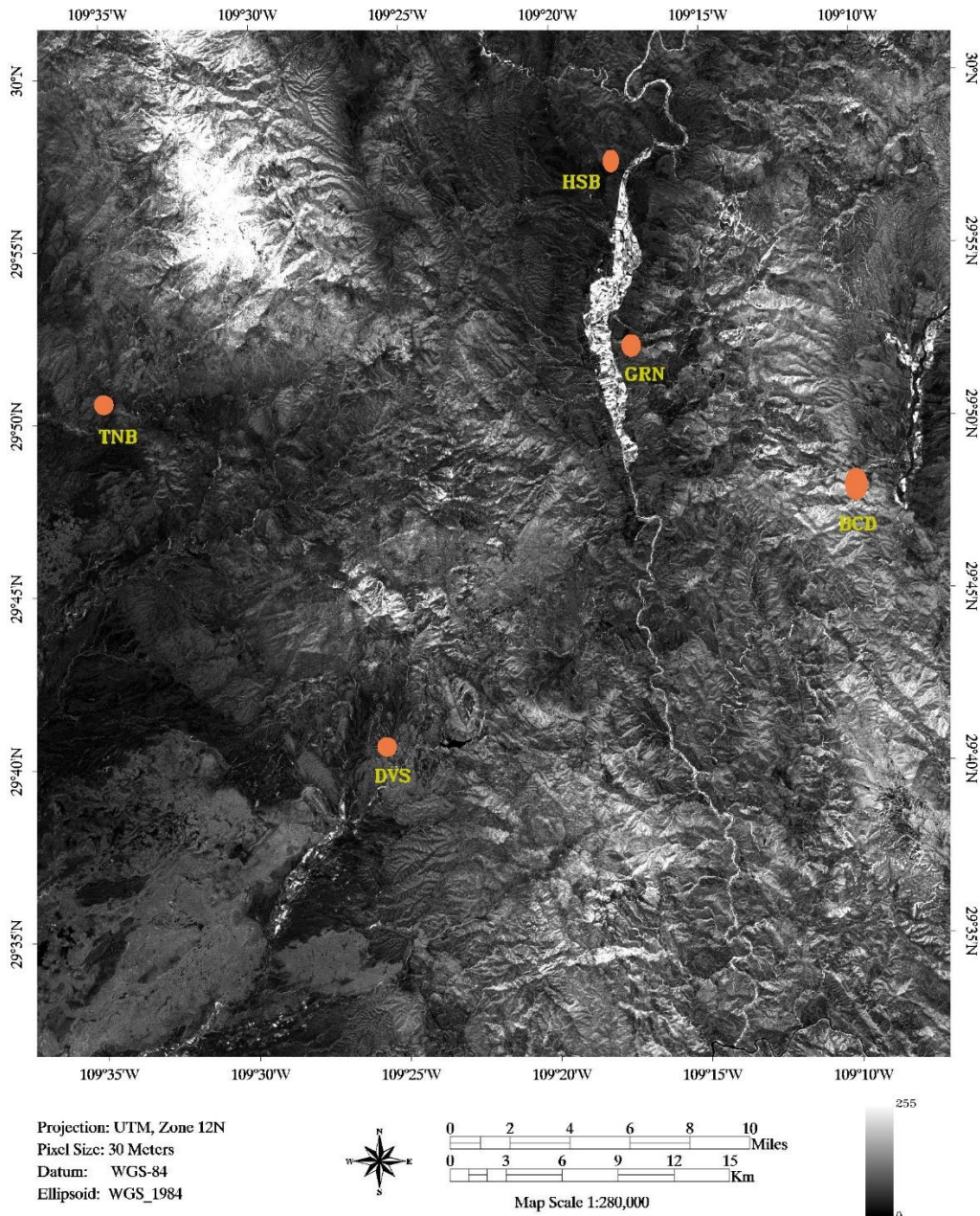


Figura 33. Respuesta espectral de la vegetación usando el cociente de bandas 3/2. Manantiales TNB: Tonibabi; HSB: Huasabas; GRN: Granados; DVS: Divisaderos; Bacadehuachi. Se aplicó deformación lineal del histograma con saturación del 2%.

Zonas de alteración por óxidos

Mars & Rowan (2006) proponen el cociente de bandas 2/1 para la detección de óxidos de hierro III (férrico). En la Figura 34 se muestra, en tonalidades blancas, la abundancia de dichos materiales, mientras que las zonas oscuras, indican la carencia de los mismos.

Cociente 2/1 para realce de óxidos

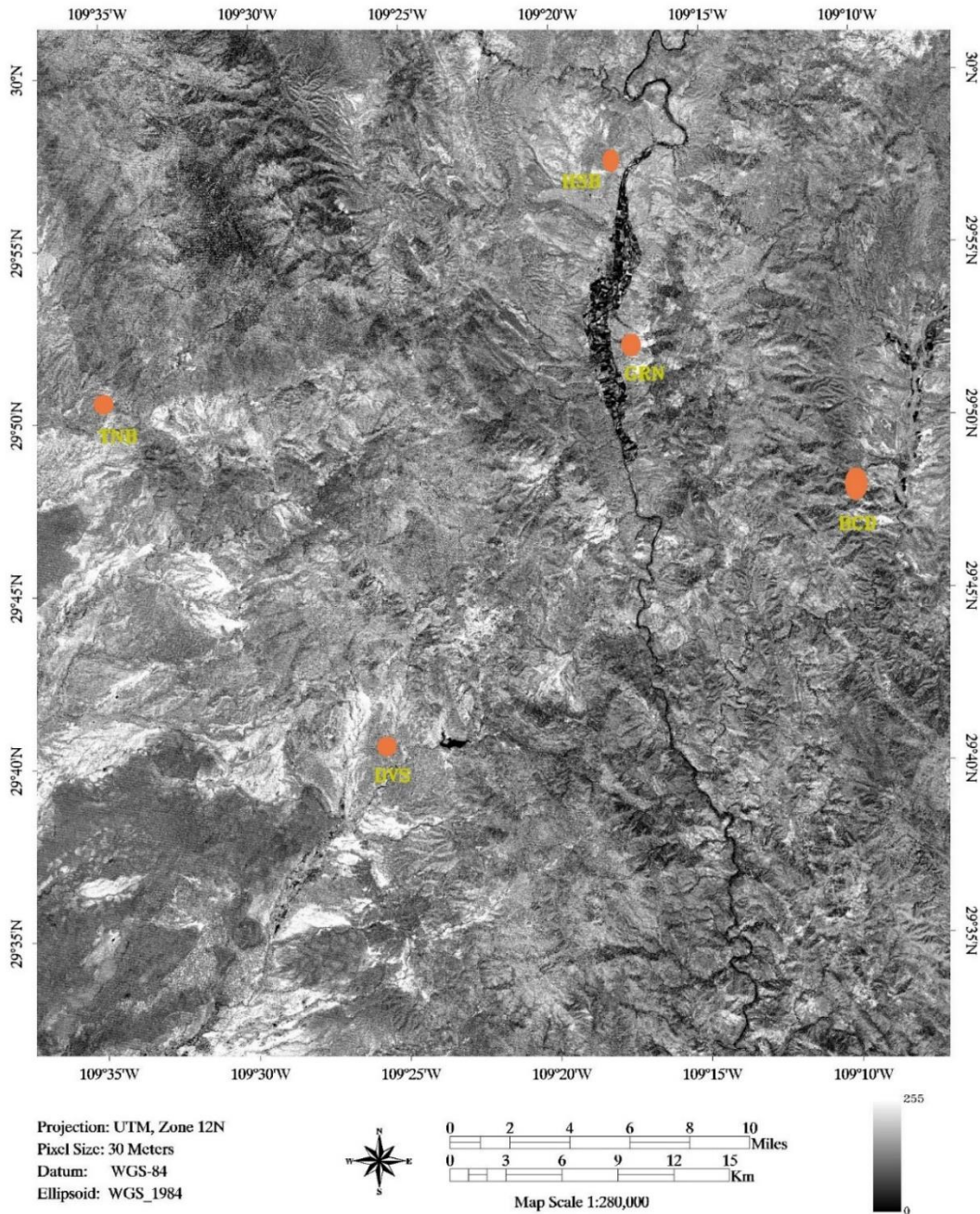


Figura 34. Respuesta espectral de los óxidos de hierro, usando el cociente de bandas 2/1 propuesto por Mars & Rowan (2006). Manantiales TNB: Tonibabi; HSB: Huasabas; GRN: Granados; DVS: Divisaderos; Bacadehuachi. Se aplicó deformación lineal del histograma con saturación del 2%.

Zona de alteración filica-argílica-argílica avanzada

Para el realce de zonas de alteración filica-argílica-argílica avanzada, los mismos autores proponen el cociente de bandas 4/5, donde igualmente, las zonas brillantes nos dan indicios de alteración (Figura 35).

Cociente 4/5 para realce de alteración filica-argílica-argílica avanzada

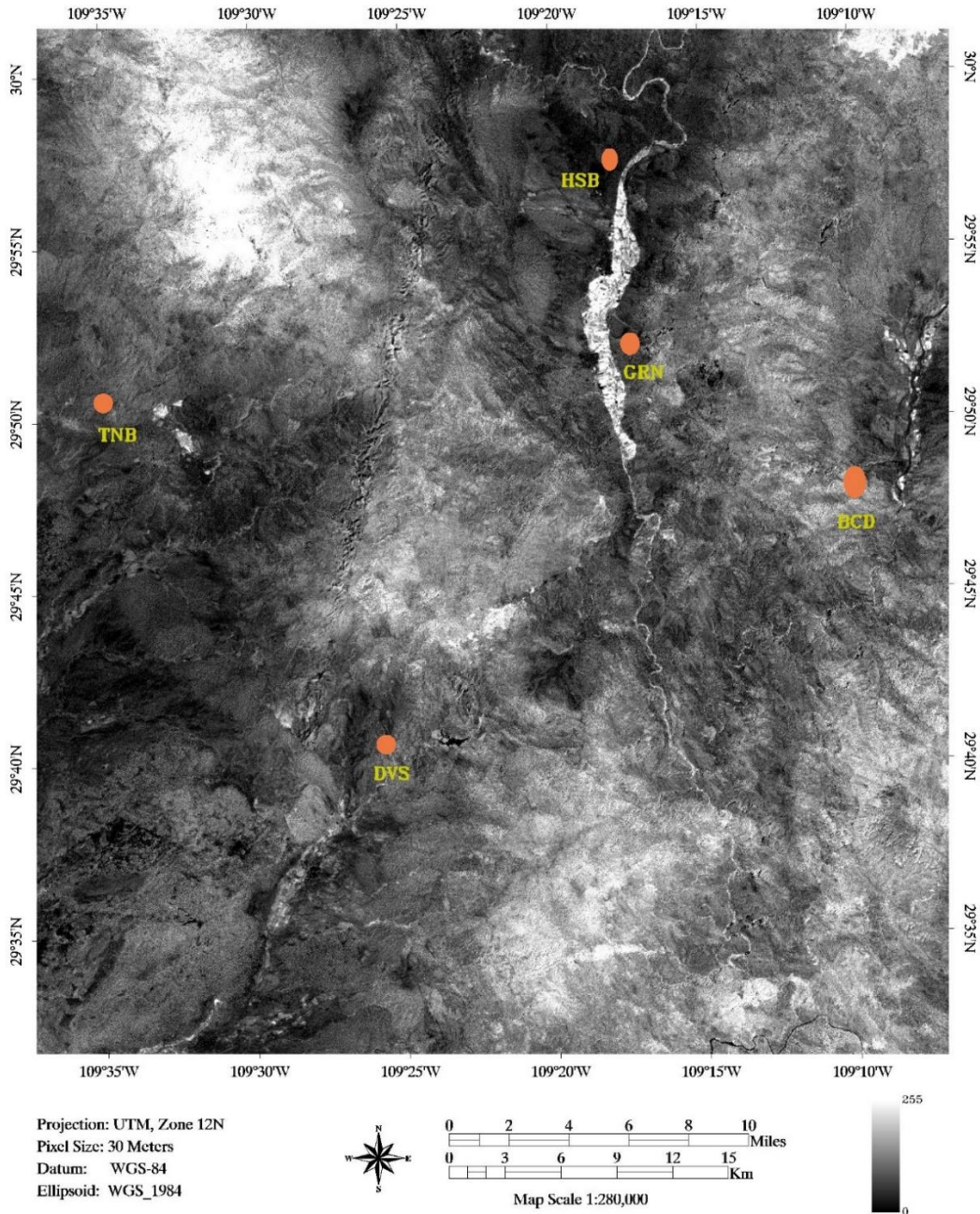


Figura 35. Respuesta espectral de la alteración filica-argílica-argílica avanzada, usando el cociente de bandas 4/5 propuesto por Mars & Rowan (2006). Manantiales TNB: Tonibabi; HSB: Huasabas; GRN: Granados; DVS: Divisaderos; Bacadehuachi. Se aplicó deformación lineal del histograma con saturación del 2%.

Composición en falso color

Finalmente, se hizo la composición en falso color (Figura 36), donde las tonalidades rojas se asocian con la vegetación (cociente 3/2), las verdes con la zona de óxidos (cociente 2/1) y las azules con la zona de alteración filica-argílica-argílica avanzada (cociente 4/5).

Composición RGB (3/2, 2/1, 4/5)

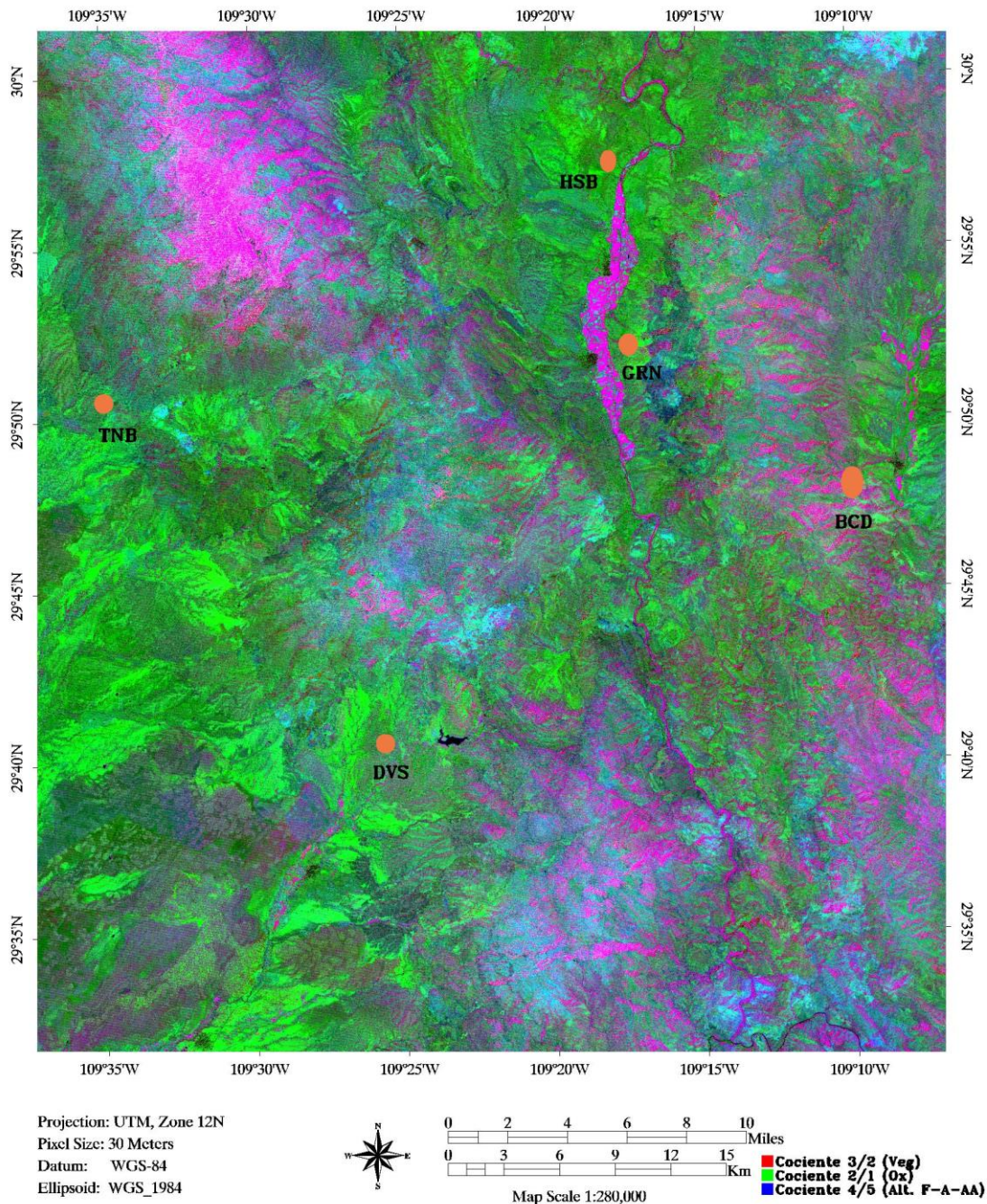


Figura 36. Composición en falso color usando los cocientes R: 3/2 (Vegetación), G: 2/1 (Óxidos), B: 4/5 (alteración filica-argílica-argílica avanzada). Manantiales TNB: Tonibabi; HSB: Huasabas; GRN: Granados; DVS: Divisaderos; Bacadehuachi. Se aplicó deformación lineal del histograma con saturación del 2%.

5.2.1.2. Análisis de Componentes Principales

Ingresando las nueve bandas del VNIR-SWIR de ASTER al Análisis de Componentes Principales, se obtuvieron los eigenvectores y su porcentaje de varianza de la Tabla 11.

<i>Tabla 11. Eigenvalores y porcentaje de varianza asociados a las componentes principales de nueve bandas del VNIR-SWIR de ASTER.</i>		
Componente principal	Eigenvalor o valor característico	Porcentaje de Varianza [%]
1	913.910325	88.03
2	71.905379	94.96
3	38.337477	98.65
4	5.039411	99.13
5	3.745239	99.49
6	1.655595	99.65
7	1.632514	99.81
8	1.083762	99.92
9	0.873509	100

<i>Tabla 12. Matriz de Eigenvectores de las nueve bandas del VNIR-SWIR de ASTER usando ENVI Classic.</i>									
	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7	Banda 8	Banda 9
Banda 1	-0.415	-0.432	0.231	-0.256	-0.715	-0.006	0.107	0.003	0.011
Banda 2	-0.504	-0.443	0.328	-0.015	0.657	0.038	-0.091	0.014	-0.012
Banda 3	-0.278	-0.343	-0.830	0.335	-0.027	-0.003	-0.050	-0.026	0.010
Banda 4	-0.314	0.324	-0.353	-0.748	0.178	-0.130	0.246	0.041	-0.031
Banda 5	-0.270	0.281	0.031	0.027	-0.093	0.001	-0.469	-0.646	-0.448
Banda 6	-0.296	0.325	-0.012	0.028	-0.102	0.595	-0.418	0.502	0.120
Banda 7	-0.276	0.267	0.076	0.166	-0.049	-0.476	-0.190	-0.123	0.734
Banda 8	-0.300	0.270	0.110	0.371	-0.057	-0.459	0.209	0.450	-0.477
Banda 9	-0.268	0.257	0.079	0.309	0.012	0.437	0.665	-0.332	0.129

Tabla 13. Matriz de carga de las nueve bandas del VNIR-SWIR de ASTER usando Idrisi Selva.

	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7	Banda 8	Banda 9
Banda 1	-0.948	-0.277	0.108	-0.043	-0.104	-0.001	0.010	0.000	0.001
Banda 2	-0.960	-0.237	0.128	-0.002	0.080	0.003	-0.007	0.001	-0.001
Banda 3	-0.816	-0.282	-0.499	0.073	-0.005	0.000	-0.006	-0.003	0.001
Banda 4	-0.924	0.268	-0.213	-0.164	0.034	-0.016	0.031	0.004	-0.003
Banda 5	-0.953	0.278	0.023	0.007	-0.021	0.000	-0.070	-0.078	-0.049
Banda 6	-0.949	0.292	-0.008	0.007	-0.021	0.081	-0.057	0.055	0.012
Banda 7	-0.957	0.259	0.054	0.043	-0.011	-0.070	-0.028	-0.015	0.079
Banda 8	-0.959	0.242	0.072	0.088	-0.012	-0.062	0.028	0.050	-0.047
Banda 9	-0.953	0.257	0.057	0.082	0.003	0.066	0.100	-0.041	0.014

La matriz de eigenvectores proporcionada por ENVI Classic al meter las nueve bandas se presenta en la Tabla 12. Una desventaja de ENVI es que solo nos da la matriz de eigenvectores y no la de carga, por lo que se usó Idrisi Selva como software auxiliar (Tabla 13).

Debido a que el Análisis de Componentes Principales con nueve bandas resulta muy complejo y el hecho de tener información de bandas no requeridas solo adiciona ruido a los resultados, se decidió utilizar la modificación de la técnica de Crosta.

Propuesta por Loughlin (1991), la modificación de la técnica de Crosta aplica el PCA únicamente a cuatro bandas. En este análisis, las bandas ingresadas del sensor ASTER se seleccionaron de acuerdo con las características espectrales de los materiales de interés a resaltar.

Además, se utilizó el método no estandarizado, es decir, donde se usa la matriz de varianza-covarianza (Gupta et al, 2013).

Zonas de vegetación y alteración por óxidos

Para identificar la zona de vegetación y la zona alterada por óxidos, se ingresaron al PCA las bandas 1, 2, 3 y 4.

Tabla 14. Matriz de eigenvectores obtenida del PCA ingresando las bandas 1, 2, 3, 4 de ASTER para la detección de zonas de alteración por óxidos y vegetación.

Componente	C 1	C 2	C 3	C 4
% Varianza	89.350088	6.26272	3.795611	0.591578
Eigenvalor	570.285061	39.972382	24.225831	3.775802
Eigenvector 1	0.543204	0.337235	-0.078159	0.764914
Eigenvector 2	0.653518	0.404986	0.051927	-0.637341
Eigenvector 3	0.37303	-0.614815	-0.691871	-0.064544
Eigenvector 4	0.372413	-0.586738	0.715898	0.067361

Tabla 15. Matriz de carga obtenida del PCA ingresando las bandas 1, 2, 3, 4 de ASTER para la detección de zonas de alteración por óxidos y vegetación.

Carga	C 1	C 2	C 3	C 4
Banda 1	0.980099	0.161092	-0.029065	0.112299
Banda 2	0.983668	0.161386	0.016109	-0.078059
Banda 3	0.864924	-0.377409	-0.330637	-0.012177
Banda 4	0.866726	-0.361522	0.343401	0.012756

Las tablas 14 y 15 expresan la transformación de componentes principales de las bandas 1, 2, 3 y 4 de la imagen, previamente corregida por efecto de la atmósfera. Se observa que el valor característico de la componente 1 (C1) representa el 89.35% de la varianza contenida en los datos, lo que se interpreta como el efecto topográfico y albedo de la imagen original.

Los vectores característicos de la C1 son todos positivos, mientras que los cambios de signos en las demás componentes nos ayudarán a percibir brillantes u oscuros los materiales de interés.

Para el caso de la vegetación, la componente principal -C2 es la que nos servirá (Figura 37), es decir, se tiene que multiplicar por menos uno la componente 2 para que adquiera sentido una alta contribución en la banda de alta reflectancia (B3) y una baja contribución en la banda de alta absorbancia (B2).

Componente Principal -C2 para realce de vegetación

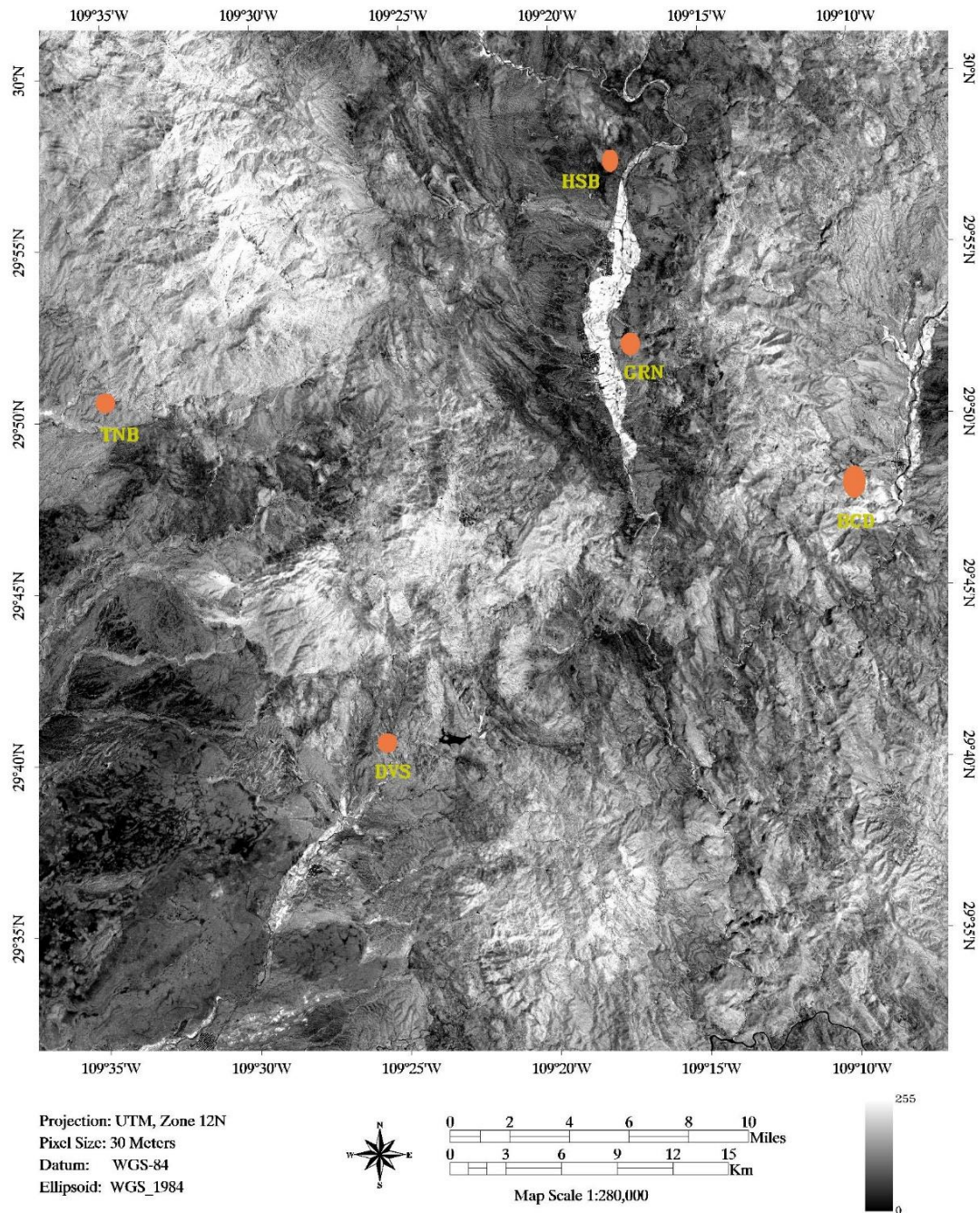


Figura 37. Imagen de la Componente Principal -C2 para realce de zonas con vegetación, usando el Análisis de Componentes Principales (PCA) con cuatro bandas (1, 2, 3, 4). Manantiales TNB: Tonibabi; HSB: Huasabas; GRN: Granados; DVS: Divisaderos; Bacadehuachi. Se aplicó deformación lineal del histograma con saturación del 2%.

Al igual que en las imágenes en escala de grises pasadas y subsecuentes, los tonos blancos o brillantes nos indicarán la presencia del material de interés a identificar.

Componente Principal -C4 para realce de óxidos

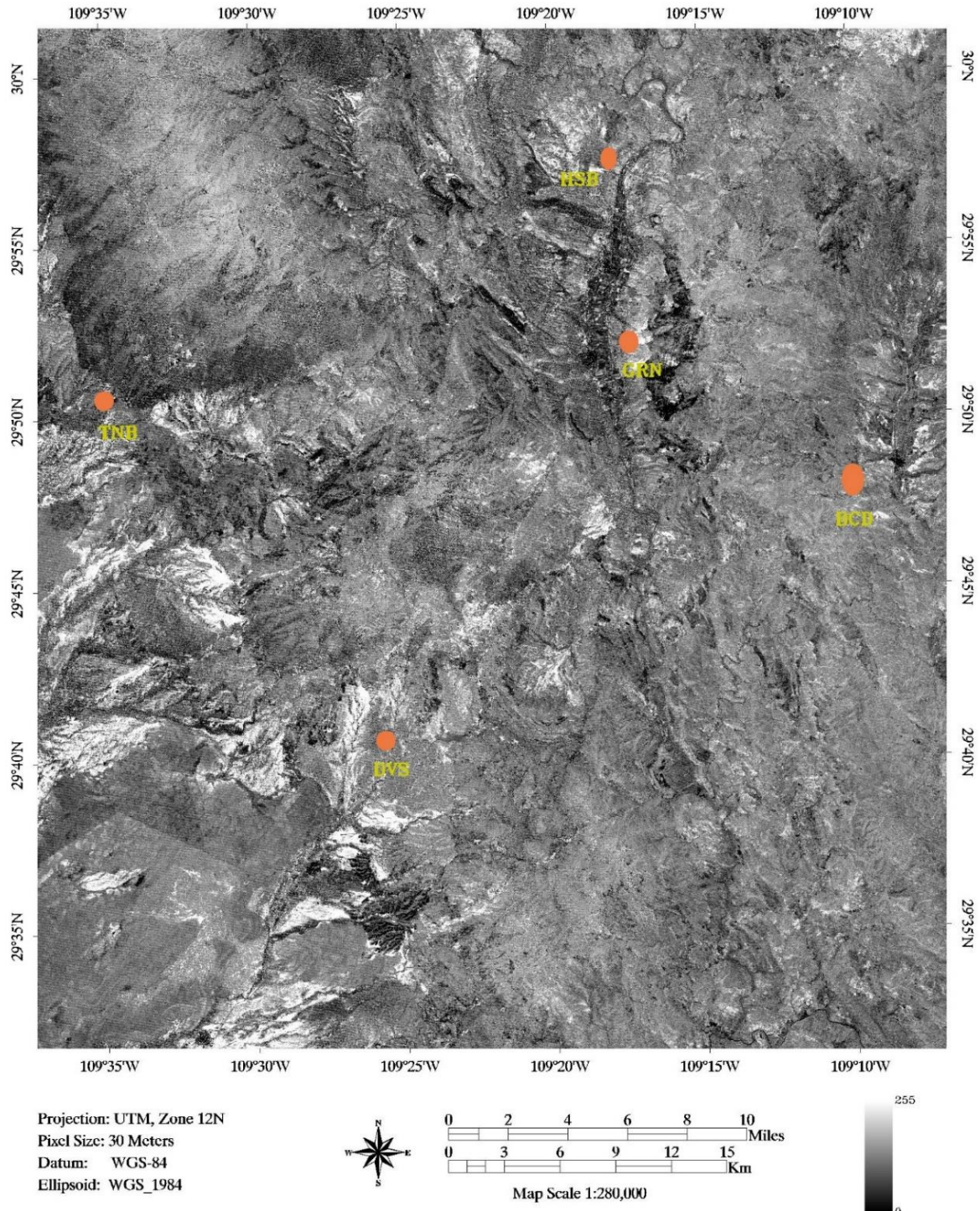


Figura 38. Imagen de la Componente Principal -C4 para realce de zonas de oxidación, usando el Análisis de Componentes Principales (PCA) con cuatro bandas (1, 2, 3, 4). Manantiales TNB: Tonibabi; HSB: Huasabas; GRN: Granados; DVS: Divisaderos; Bacadehuachi. Se aplicó deformación lineal del histograma con saturación del 2%.

Los óxidos se pueden detectar con el negativo de la componente principal 4 (-C4) debido a que las bandas de alta absorbancia (B2) tienen una contribución negativa, mientras que la que posee rasgos de alta reflectancia (B1) tienen un signo positivo. Ambas tienen una mayor contribución (carga) que la C3, y por esa razón se escogió esa componente para el análisis.

Zona de alteración fílica-argílica-argílica avanzada

Para identificar la zona de alteración fílica-argílica-argílica avanzada se ingresaron al PCA las bandas 2, 3, 4 y 5. Se analizaron sus matrices de eigenvectores y carga.

Tabla 13. Matriz de eigenvectores obtenida del PCA ingresando las bandas 2, 3, 4, 5 de ASTER para la detección de zonas de alteración fílica-argílica-argílica avanzada.

Componente	C 1	C 2	C 3	C 4
% Varianza	86.793626	6.560943	6.164739	0.480694
Eigenvalor	465.769272	35.208643	33.082454	2.579599
Eigenvector 1	0.710687	-0.621262	0.291768	0.154365
Eigenvector 2	0.414311	0.006626	-0.886811	-0.204619
Eigenvector 3	0.434797	0.677635	0.072372	0.588663
Eigenvector 4	0.366362	0.393446	0.350999	-0.766667

Tabla 14. Matriz de carga obtenida del PCA ingresando las bandas 2, 3, 4, 5 de ASTER para la detección de zonas de alteración fílica-argílica-argílica avanzada.

Carga	C 1	C 2	C 3	C 4
Banda 2	0.966737	-0.232351	0.105775	0.015627
Banda 3	0.86816	0.003818	-0.495242	-0.031909
Banda 4	0.9145	0.391861	0.040568	0.092141
Banda 5	0.921892	0.272203	0.23539	-0.143571

En este caso, la componente 4 (C4) muestra la influencia de los minerales asociados a alteración fílica-argílica-argílica avanzada, pues la banda de alta absorbancia 5 tienen signo negativo, mientras que la de alta reflectancia 4, posee signo positivo.

Componente Principal C4 para realce de alteración fílica-argílica-argílica avanzada

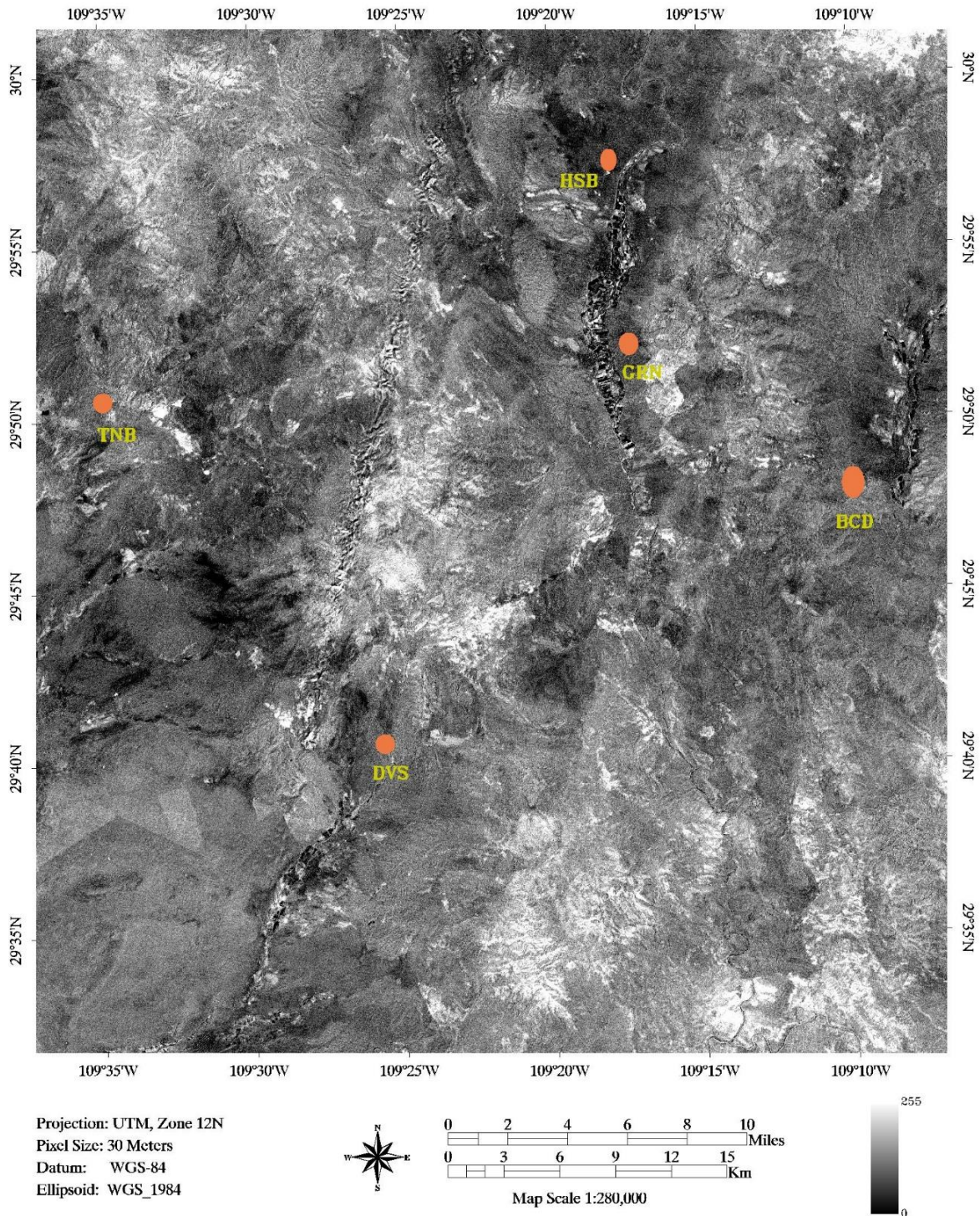
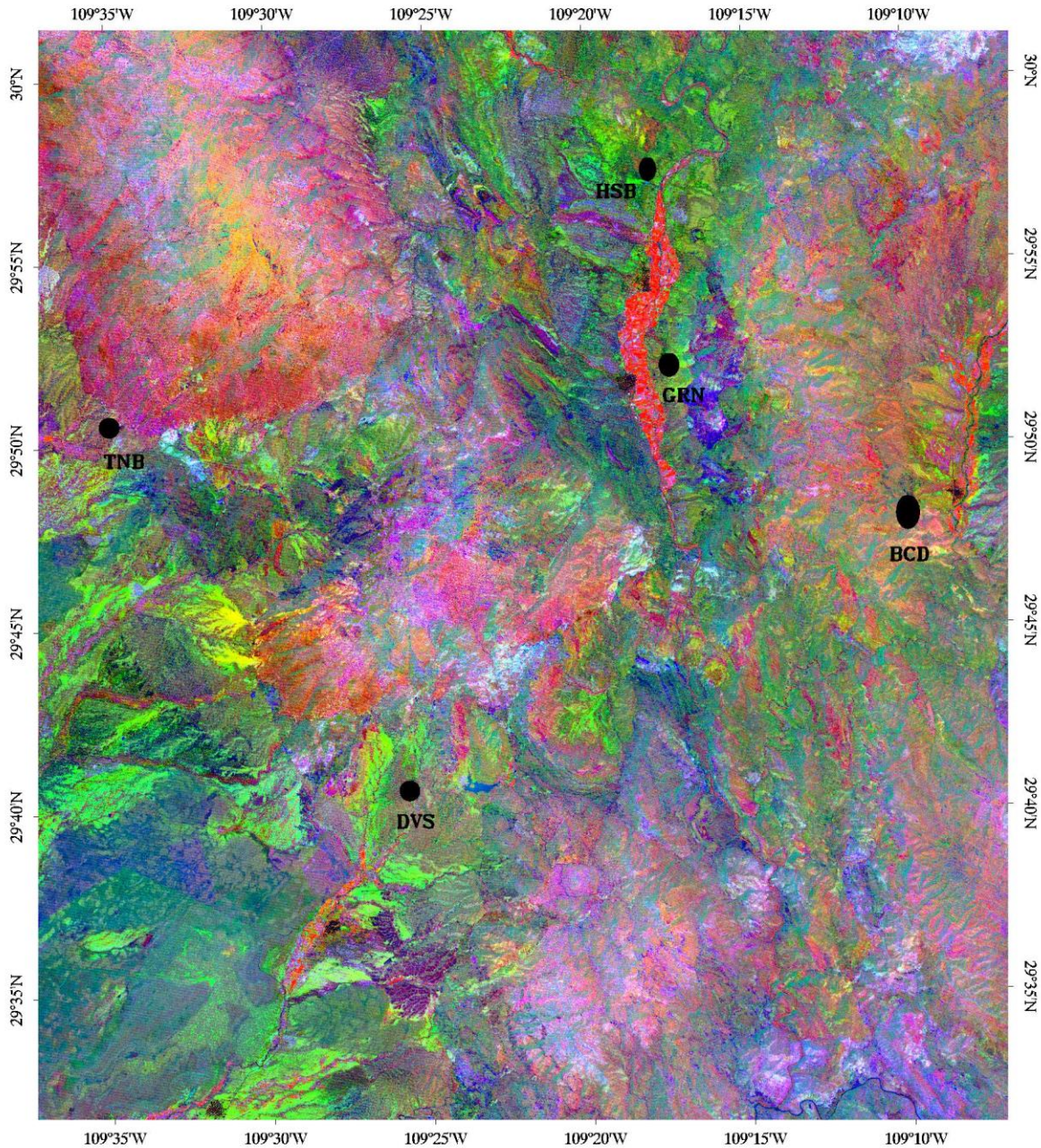


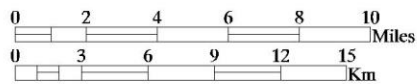
Figura 39. Imagen de la Componente Principal 4 para realce de zonas con alteración fílica-argílica-argílica avanzada, usando el Análisis de Componentes Principales (PCA) con cuatro bandas (2, 3, 4, 5). Manantiales TNB: Tonibabi; HSB: Huasabas; GRN: Granados; DVS: Divisaderos; Bacadehuachi. Se aplicó deformación lineal del histograma con saturación del 2%.

Composición en falso color

Composición RGB (-C2v, -C4ox, C4alt.f-a-aa)



Projection: UTM, Zone 12N
Pixel Size: 30 Meters
Datum: WGS-84
Ellipsoid: WGS_1984



Map Scale 1:280,000

■ -C2 (Veg)
■ -C4 (Ox)
■ C4 (Alt. F-A-AA)

Figura 40. Composición en falso color usando las Componentes Principales R: -C2 (Vegetación), G: -C4 (Óxidos), B: C4 (Alteración fílica-argílica-argílica avanzada.). Manantiales TNB: Tonibabi; HSB: Huasabas; GRN: Granados; DVS: Divisaderos; Bacadehuachi. Se aplicó deformación lineal del histograma con saturación del 2%.

La Figura 40 muestra la composición RGB usando las Componentes Principales [R: -C2 (Vegetación), G: -C4 (Óxidos), B: C4 (Alteración fílica-argílica-argílica avanzada.)]. En la imagen ya se distinguen zonas de particular interés, que al ser integradas con la información obtenida con el realce espacial, será posible definir las con mayor precisión.

5.2.2. Realce espacial

Para realizar un realce espacial como parte del procesamiento de la imagen de la zona de estudio, se usó la metodología propuesta por Moore & Waltz (1983) para la detección de lineamientos usando filtros direccionales.

Como resultado (Figura 41), se observa un sistema de fallas y fracturas con rumbo preferencial NW-SE cortado por fallas NE-SW, característica típica de la región que se atribuye a un régimen distensivo.

Ambos sistemas de fallas normales fueron reportados por el Servicio Geológico Mexicano en la Carta Geológico-Minera Madera H12-9 escala 1:250 000 (Figura 27), sin embargo, el método de filtrado para realce espacial ayudó a ampliar la extensión de las fallas y a localizar otras no cartografiadas.

La imagen a la que se le aplicó el proceso de filtrado fue la imagen de la componente principal 1 (C1) obtenida del PCA a 9 bandas debido a que esta componente es la que proporciona más información estructural.

Mapa de lineamientos estructurales

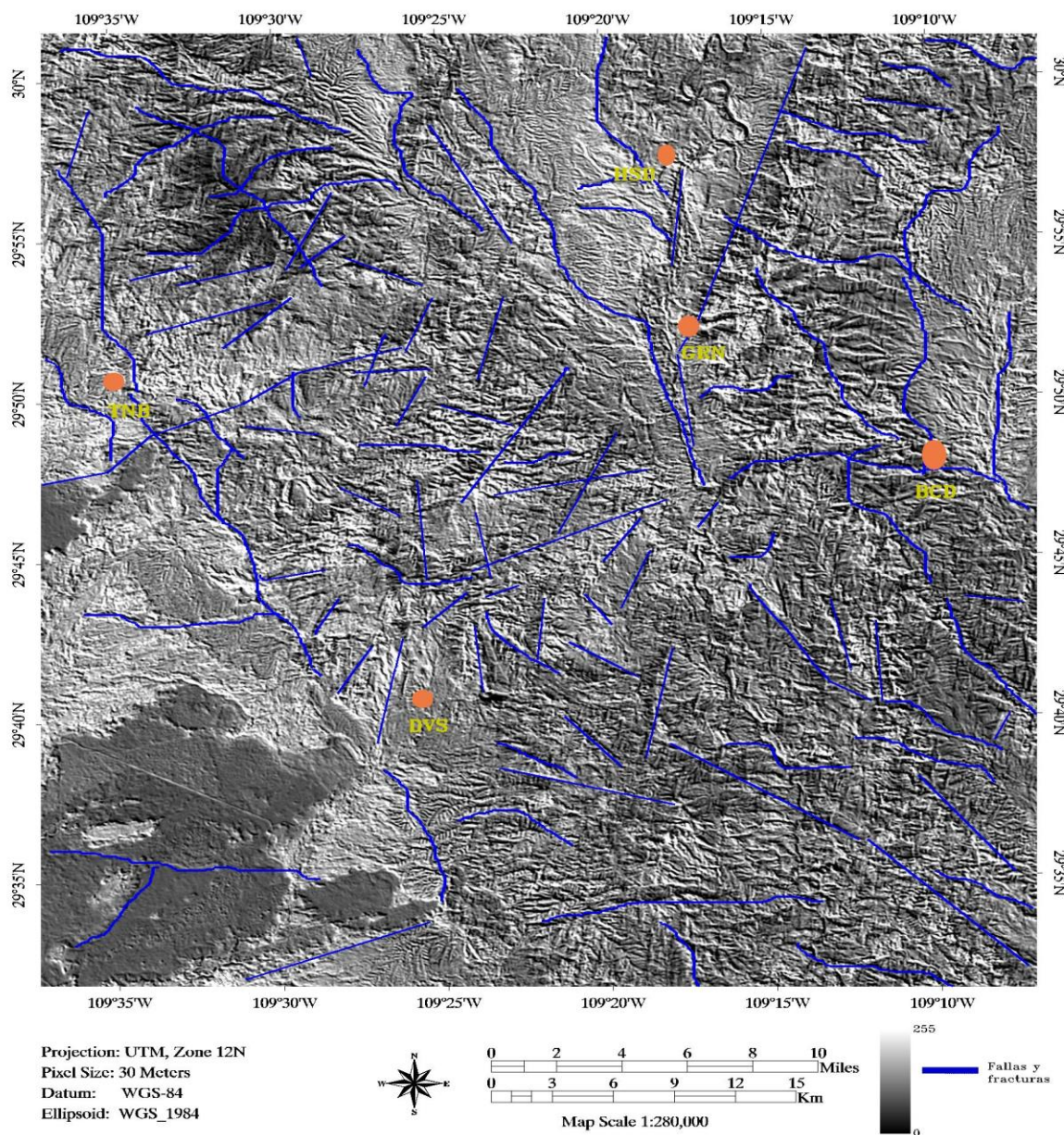


Figura 41. Mapeo de lineamientos en todas las direcciones después de aplicar los filtros direccionales a la imagen de la componente principal 1 (C1) obtenida del PCA a 9 bandas. Manantiales TNB: Tonibabi; HSB: Huasabas; GRN: Granados; DVS: Divisaderos; Bacadehuachi. Se aplicó deformación lineal del histograma con saturación del 2%.

5.3. Integración de resultados

La información resultante del realce espectral y espacial se sobrepone en la figura 42, en la que, además, la ubicación de los manantiales y zonas mineras nos ayudarán a proponer regiones de interés.

Realce espectral y espacial, con ubicación de manantiales y minas

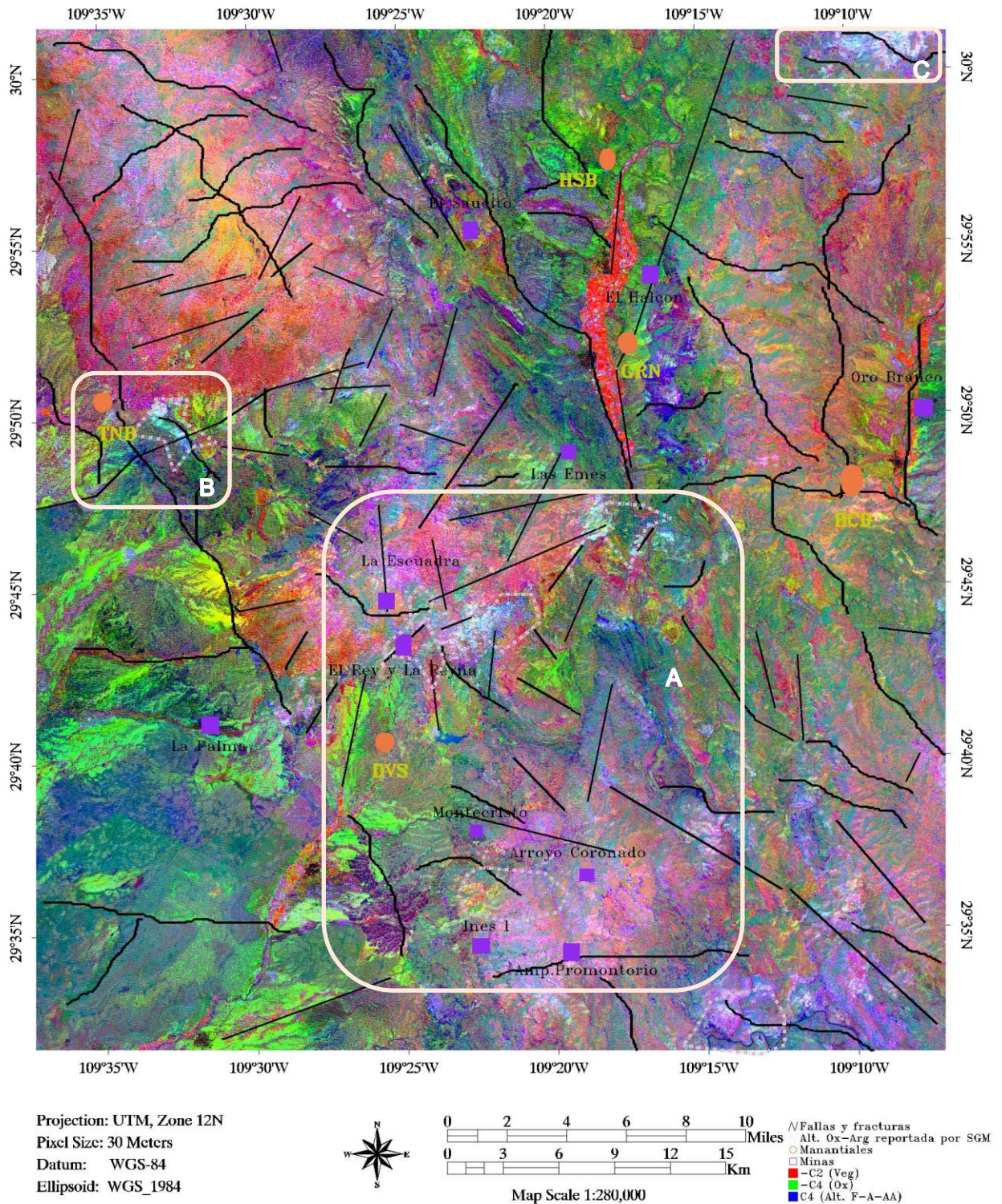
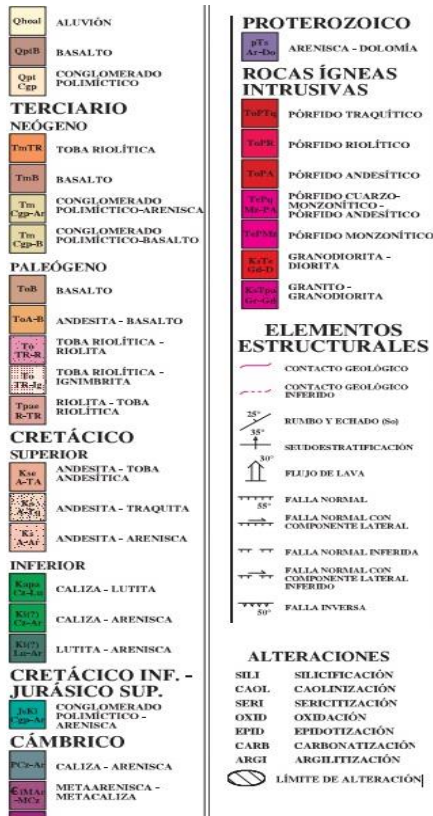
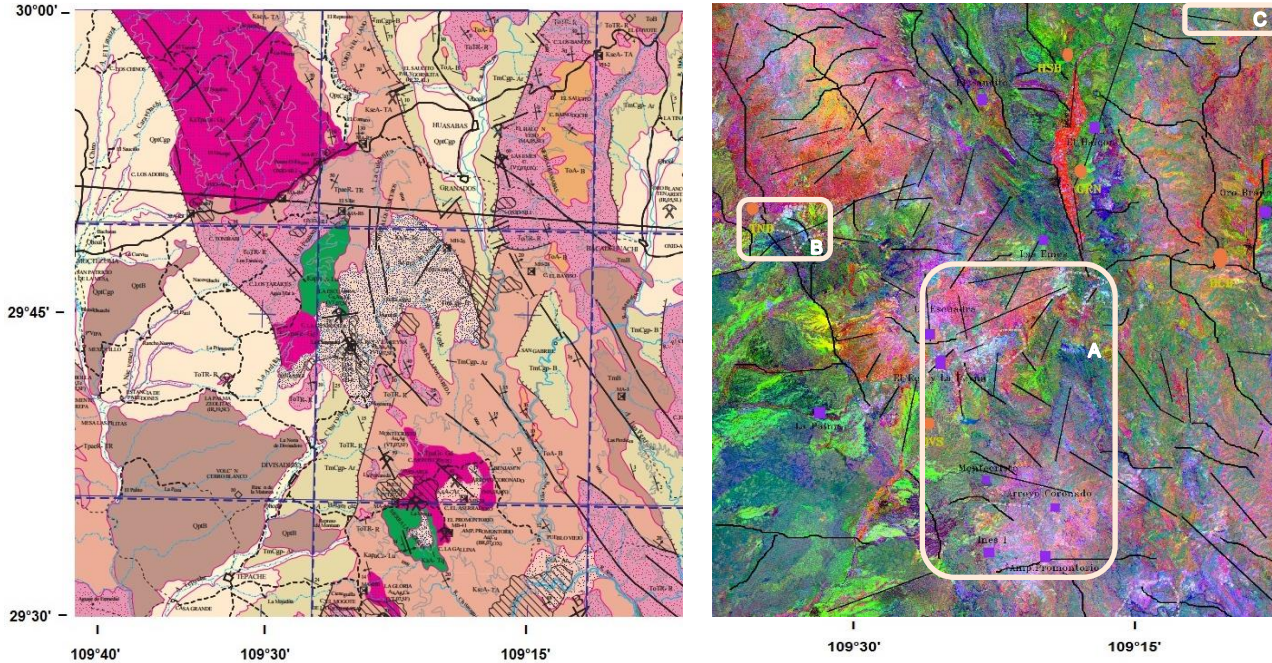


Figura 42. Integración de información: realce espectral (usando composición en falso color de Componentes Principales): realce espacial (usando filtros direccionales); manantiales TNB: Tonibabi; HSB: Huasabas; GRN: Granados; DVS: Divisaderos; Bacadehuachi; y minas reportadas por el SGM. Delimitación de zonas potenciales A, B, C. Se aplicó deformación lineal del histograma con saturación del 2%.



// Fallas y fracturas
 ALT. Ox-Arg reportada por SGM
 ○ Manantiales
 □ Minas
 ■ -C2 (Veg)
 ■ -C4 (Ox)
 ■ C4 (Alt. F-A-AA)

Figura 43. Mapa geológico vs. Mapa producto del realce espectral y espacial con PR.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La Figura 42 es el producto final y la aportación de esta tesis. Fue resultado de un conjunto de técnicas de preprocesamiento y procesamiento de imágenes, las cuales sirvieron para identificar la presencia de distintas coberturas terrestres, así como proponer zonas potenciales, con base en la coexistencia de zonas con alteración hidrotermal y debilidad estructural. Esta combinación de factores es indicadora de sistemas hidrotermales activos, como en el caso del sistema geotermal de Acoculco, Puebla (Canet et al., 2015).

El método de realce espectral que mejores resultados brindó fue el Análisis de Componentes Principales de Crosta aplicado a cuatro bandas (Loughlin, 1991) debido a que pudo quitar la información redundante, además de que la alta variabilidad de información en las bandas hizo que se marcaran más los contrastes entre materiales.

Con la composición en falso color se desplegaron, en los cañones RGB, las componentes principales que resultaron útiles en el análisis. Los colores rojos se asociaron a la vegetación, los verdes con la zona alterada por óxidos y los azules con la zona de alteración fílica-argílica-argílica avanzada.

De acuerdo con lo anterior, en la zona NE y franja NW-SE de la zona de estudio se aprecia abundancia de vegetación que se generó sobre cuerpos ígneos intrusivos (Figura 43). En el centro-norte de la imagen se ve un cuerpo rojo brillante que está asociado a zonas de cultivo.

La región centro-norte y suroeste de la imagen muestra alteración por óxidos en zonas de sedimentos recientes y material basáltico (Figura 43).

Las tonalidades azul marino que se encuentran dispersas en el centro y sur de la imagen corresponden a zonas de alteración fílica-argílica-argílica avanzada, producto de la hidrólisis que afectó a las plagioclasas presentes en las andesitas y tobas riolíticas de la región (Figura 43).

También es posible observar tonos cian, amarillos y magentas, que se crean con la combinación de dos colores primarios de la composición RGB, es decir, existen superficies terrestres que presentan simultáneamente varios materiales.

En nuestro caso, la coexistencia de vegetación con óxidos se aprecia en color amarillo, mientras que vegetación con alteración fílica-argílica-argílica avanzada se muestra en tonalidades magentas o moradas.

Las zonas de interés para el presente trabajo se muestran en color cian o azul verdoso, el cual, resulta de la presencia tanto de minerales de alteración fílica-argílica-argílica avanzada como de minerales producto de la oxidación.

En cuanto a la información estructural, por medio del realce espacial usando filtros direccionales, fue posible ampliar la extensión de los lineamientos mapeados en Carta Geológico-Minera Madera H12-9 del SGM y reconocer rasgos no reportados en la misma.

En la zona de estudio existe, principalmente, un sistema de fallas y fracturas con rumbo preferencial NW-SE cortado por fallas NE-SW, característica que es típica de la región y se atribuye al régimen distensivo *Basin and Range*. En el centro de la Figura 42 se distingue una gran estructura tipo horst-graben

Después de realizar el realce espectral y espacial, las superficies de la imagen que fueron propuestas para su exploración a detalle reunieron las siguientes características:

1. Presencia simultánea de minerales de la zona de alteración fílica-argílica-argílica avanzada y de la zona de oxidación (color cian).
2. Abundancia de fallas y fracturas.
3. Resultados geoquímicos favorables (altas temperaturas calculadas con geotermometría, comportamiento anómalo en concentraciones iónicas, etc.) de muestras de manantiales proximales reportados por Almirudis et al. (2015).
4. Presencia de zonas mineras de origen hidrotermal, reportadas por el Servicio Geológico Mexicano.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A través del análisis de imágenes satelitales del sensor remoto ASTER de la región Centro-Oriente del estado de Sonora, fue posible la identificación de tres zonas que presentan características geológicas y estructurales indicadoras de actividad geotermal (Figura 42).

El principal foco de atención corresponde a la región A, ubicada al sur de la localidad de Granados, que muestra el color cian característico de las zonas de alteración buscamos, aunado a que convergen fallas regionales y existen varios contactos litológicos. En esta región, Almirudis et al. (2015) estimaron temperaturas a profundidad de 150°C, calculadas con el geotermómetro de Na/K.

Las zonas mineras en la región reportadas por el Servicio Geológico Mexicano consisten principalmente de cuerpos de tipo veta hidrotermal, ubicadas en la región central de la zona de estudio, las cuales son coincidentes con regiones de alteración determinadas por el SGM, y a su vez concuerdan con la zona A. Además, esta zona propuesta resulta geográficamente coincidente con el manantial termal activo de divisaderos (DVS).

Además, cerca de la zona propuesta A, se reportó el prospecto de zeolitas La Palma (Carta Geológico-Minera Madera H12-9 del SGM), así como la existencia de una gran cantidad de gases y un comportamiento anómalo en las concentraciones iónicas de HCO_3 , Na, K, SO_4 (Almirudis et al., 2015), factores que pueden ser indicativos de actividad hidrotermal.

La zona de interés B, cerca de Tonibabi (TNB), es una región donde pasan fallas regionales importantes y se presenta alteración fílica-argílica-argílica avanzada, así como oxidación. También, los estudios geoquímicos estiman temperaturas a profundidad de alrededor de 150°C, calculadas con el geotermómetro de Na/K, y la zona está relacionada con granitoides laramídicos (Almirudis et al., 2015). No se reportan zonas mineras.

En la zona C, ubicada en la esquina NE de la imagen, existen minerales de alteración fílica-argílica-argílica avanzada, óxidos (color cian) y presencia de fallas locales. Aunque no existen reportes de manantiales ni de minas hasta el momento, se presume una zona exploratoria de interés.

Aunque en las zonas proximales a los otros manantiales reportados (HSB, GRN, BCD), existen zonas mineras, no se distinguen zonas de alteración o rasgos estructurales relevantes para su exploración a detalle. Además, Almirudis et al. (2015) reportaron temperaturas bajas usando el geotermómetro de Na/K.

El procesamiento de las imágenes también sirvió para comparar entre alteraciones hidrotermales reportadas por el Servicio Geológico Mexicano y aquellas que resultaron del presente estudio. Por ejemplo, existen zonas como al norte de la zona propuesta A o en la zona B (Figura 42) donde coinciden muy bien las regiones de alteración de tipo oxidación-argilitización. Sin embargo, existen otras sin coincidencia alguna, como al sur de la imagen, donde el SGM reportó regiones alteradas y con técnicas remotas no fue posible distinguirlas. Por el contrario, al noreste de la imagen en la zona propuesta C, se percibe una zona de alteración hidrotermal que no fue reportada por el SGM.

Con base en la geología, vulcanismo reciente nulo, tectonismo, litología, tipo de alteraciones presentes, control por fallas, yacimientos minerales reportados, etc., se sugiere para la zona de estudio, la existencia de un play geotérmico dominado por convección de tipo extensional (Moeck, 2013).

Como primera instancia, se propone realizar estudios geológicos a detalle en las zonas propuestas A, B y C, recabando muestras de roca para hacer estudios de laboratorio con espectroradiómetros para identificar con mayor precisión el tipo de minerales de alteración. Además, se deben realizar secciones geológicas en varias direcciones, caracterizaciones estructurales, estudios geohidrológicos, etc.

Posteriormente, se sugiere aplicar métodos geofísicos potenciales (gravimetría y magnetometría) en las mismas zonas, con el fin de detectar regionalmente zonas anómalas a profundidad, así como caracterizar mejor las fallas. Una vez visualizadas en planta las zonas anómalas, aplicar métodos electromagnéticos en puntos específicos para ver a mayor profundidad características del sistema hidrotermal.

Actualmente Sonora es un estado que resalta por sus recursos minerales, agrícolas y ganaderos, sin embargo, comprobar el potencial geotérmico podría permitir el abastecimiento de energía eléctrica a ciudades importantes, o bien, el desarrollo de nuevas actividades económicas mediante el aprovechamiento de sus usos directos.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almirudis, E., Guevara, M., Santoyo, E., Torres-Alvarado, I., Paz-Moreno, F. (2015). Geothermal Energy Potential of Promissory Area in the Central and Eastern Zones of Sonora, Mexico: A Preliminary Geochemical Study, presentado en "Proceedings World Geothermal Congress", Melbourne, Australia, 19-25 abril 2015.
- Bakker, W., Feringa, W., Gieske, A., Gorte, B., Hecker, C., Janssen, L. (2009). Principles of Remote Sensing: An introductory textbook. Netherlands: The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation.
- Barbier, E. (2002). Geothermal energy technology and current status: an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 6, 3-65.
- Campbell, J. & Wynne, R. (2011). Introduction to Remote Sensing (5th Ed). New York, USA: The Guilford Press. 667 p.
- Canet, C., Hernández-Cruz, B., Jiménez-Franco, A., Pi, T., Peláez, B., Villanueva-Estrada, R., Alfonso, P., González-Partida, E., Salinas, S. (2015). Combining ammonium mapping and short-wave infrared (SWIR) reflectance spectroscopy to constrain a model of hydrothermal alteration for the Acozulco geothermal zone, Eastern Mexico. *Geothermics*, vol. 53, 154-165.
- Castañeda, J. (1981). Notas sobre la Geología del área de Hermosillo, Sonora. *Revista del Instituto de Geología UNAM*, vol. 5 (1), 30-36.
- Chandra, A.M. & Ghosh, S.K. (2006). Remote Sensing and Geographical Information System. India: Alpha Science International Ltd. 303 p.
- Crosta, A. P., De Souza Filho, C.R., Azevedo, F., Brodie, C. (2003). Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24 (21), 4233-4240. DOI: 10.1080/0143116031000152291.
- Damon, P.E., Shafiqullah, M., Roldán-Quintana, J., Cochemé, J.J. (1983). El Batolito Laramide (90-40 Ma) de Sonora, presentado en XV Convención Nacional de la Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, Guadalajara, Jalisco, México. Libro de resúmenes, 63-65.

- Elsaid, M., Aboelkhair, H., Dardier, A., Hermas, E., Minoru, U. (2014). Processing of Multispectral ASTER Data for Mapping Alteration Minerals Zones: As an Aid for Uranium Exploration in Elmissikat-Eleridiya Granites, Central Eastern Desert, Egypt. *The Open Geology Journal*, vol. 8 (Suppl 1: M5), 69-83.
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., Bryan, S. (2005). Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, volumen conmemorativo del centenario, tomo LVII (3), 343-378.
- Flores-Armenta, M. & Gutierrez-Negrín, L. (2011). Geothermal Activity and Development in Mexico, presentado en "Short Course on Geothermal Drilling, Resource Development and Power Plants", Santa Tecla, El Salvador, 16-22 enero 2011.
- González-León, C.M. (1988). Estratigrafía y paleogeografía del Cretácico del área de Cerro de Oro, municipio de Rayón Sonora (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México.
- González-León, C.M., Solari, L., Solé, J., Ducea, M.N., Lawton, T.F., Bernal, J.P., González-Becuar, E., Gray, F., López-Martínez, M., Lozano-Santacruz, R. (2011). Stratigraphy, geochronology, and geochemistry of the Laramide magmatic arc in north-central Sonora, Mexico. *Geosphere*, vol. 7, 1392-1418.
- González-Ruiz L.E., González-Partida, E., Garduño Monroy, V.H., Martínez. L., Pironon, J. (2015). Distribución de Anomalías Geotérmicas en México: Una guía útil en la prospección geotérmica. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*.
- Gómez-Valencia, A.M. (2011). Petrografía y geoquímica del volcanismo del Oligoceno-Mioceno medio en Rayón, Sonora: énfasis en el estudio y significado del volcanismo híperalcalino en la región: Hermosillo, Sonora, México (Tesis de Licenciatura). Universidad de Sonora.
- Gupta, R., Tiwari, R., Saini, V., Strivastava, N. (2013). A Simplified Approach for Interpreting Principal Component Images. *Advances in Remote Sensing*, vol. 2, 111-119.
- Gutiérrez-Negrín, L. (2012). Update of the Geothermal Electric Potential in Mexico. *GRC Transaction*, vol. 36.

- Iwasaki, A. & Tonooka, H. (2005). Validation of a Crosstalk Correction Algorithm for ASTER/SWIR. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 43 (12).
- Joseph, G. (2005). *Fundamentals of Remote Sensing*. India: Universities Press. 486 p.
- Jensen, J.R. (2007). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective* (2nd Ed). Prentice Hall. 592 p.
- Kalinowski, A. & Oliver, S. (2004). *ASTER Mineral Index Processing Manual. Remote Sensing Applications*. Geoscience Australia.
- Lagat, J. (2009). Hydrothermal Alteration Mineralogy in Geothermal Fields with case examples from Olkaria Domes Geothermal Field, Kenya, presentado en "Short Course IV on Exploration for Geothermal Resources", Lake Naivasha, Kenya, 1-22 noviembre 2009.
- Loughlin, W.P. (1991). Principal Component Analysis for Alteration Mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 57 (9), 1163-1169.
- Levin, N. (1999). *Fundamentals of Remote Sensing*. Israel: Tel Aviv University.
- Martín-Barajas, A. (2000). Volcanismo y extensión en la Provincia Extensional del Golfo de California. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol. LIII, 72-83.
- Meyer, D., Siemonsma, D., Brooks, B., Johnson, L. (2015). AST_L1T Product, Algorithm Theoretical Basis Document. USGS.
- Moeck, I. (2013). Classification of geothermal plays according to geological habitats. *IGA Academic Report*, vol. 1, 1-10.
- Moore, G. & Waltz, F. (1983). Objective Procedures for Lineament Enhancement and Extraction. *Photogrammetry Engineering and Remote Sensing*, vol. 49 (5), 641-647.
- Morán-Zenteno, D. (1986). Breve revisión sobre la evolución tectónica de México. *Geofísica Internacional*, vol. 25 (1), 9-38.
- Paz-Moreno, F.A. (1992). Le volcanisme mio-plio-quatenaire de l'Etat du Sonora (nord-ouest du Mexique): évolution spatiale et chronologique; implications pétrogénétiques (Tesis de Doctorado). Université Aix-Marseille

- Paz-Moreno, F., Demant, A., Cochemé, J. J., Dostal, J., & Montigny, R. (2003). The Quaternary Moctezuma volcanic field: A tholeiitic to alkali basaltic episode in the central Sonoran Basin and Range Province, Mexico. *Special Papers-Geological Society of America*, 439–456.
- Pérez-Gutiérrez, C. & Muñoz-Nieto, A. (2006). *Teledetección: nociones y aplicaciones*. España: Universidad de Salamanca. 359 p.
- Pirajno, F. (2009). *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Springer. 1250 p.
- Pla, L. (1986). *Análisis Multivariado: Método de Componentes Principales*. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos. 94 p.
- Prol-Ledesma, R.M. & Torres-Vera, M.A. (2007). *Mapa de Recursos Geotérmicos de México*. Atlas Nacional de México. México: Instituto de Geografía, UNAM.
- Pour, A.B. & Hashim, M. (2012). The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. *Ore Geology Reviews*, vol. 44, 1-9.
- Rowan, L., Schmidt, R., Mars, J. (2006). Distribution of hidrothermaly altered rocks in the Reko Diq, Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 104, 74-87.
- Ruiz-Armenta, J.R. & Prol-Ledesma, R.M. (1998). Techniques for enhancing the spectral response of hydrothermal alteration minerals in Thematic Mapper images of Central Mexico. *International Journal Remote Sensing*, vol. 19 (10), 1981-2000.
- Sabins, F. (1999). Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, vol. 14, 157-183.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). *Carta Geológico-Minera Madera H12-9 1:250 000*.
- Shaw, G. & Burke, H. (2003). Spectral Imaging for Remote Sensing. *Lincoln Laboratory Journal*, vol 14 (1), 3-28.
- Sierra, J.L. & Pedro, G.E. (1998). *Energía Geotérmica*. Argentina.
- Sobrino, J. (2001). *Teledetección*. España: Servicio de Publicaciones, Universidad de Valencia. 468 p.

Vidal-Solano, J., Paz-Moreno, F., Demant, A., López-Martínez, M. (2007). Ignimbritas hiperalkalinas del Mioceno medio en Sonora Central: revaluación de la estratigrafía y significado del volcanismo terciario. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol.24 (1), 47-67.

Yajima, T. 2014. ASTER Data Analysis Applied to Mineral Resource Exploration and Geological Mapping (Tesis de Doctorado). Nagoya University. Japon.

Páginas Web:

¹ Portal electrónico de CeMIEGeo

<http://cemiegeo.org/index.php/geotermia?id=6>

Consultado el 23/02/2017

² Portal electrónico del SGM - GeoInfoMex

<https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/>

Consultado el 23/02/2017

<http://wdcdgg.westgis.ac.cn/DATABASE/glacier/pumqu/Reports/chap6/chap6main.htm>

Consultado el 23/02/2017

<https://ssonoramexico.wordpress.com/>

Consultado el 23/02/2017

<http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/bil-bip-and-bsq-raster-files.htm>

Consultado el 10/03/2017

<http://www.utsa.edu/LRSG/Teaching/EES505306/project/Mineral%20Exploration%20Using%20ASTER%20Images.pdf>

Consultado el 30/03/2017

<http://www.geoaprendo.com/2015/07/resumen-depositos-epitermales.html>

Consultado el 27/04/2017

http://remotesensing.aslenv.com/documents/ASTER_Processing_for_Mineral_Exploration.pdf

Consultado el 23/06/2017