



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**“IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE EXPLORACIÓN
CON POTENCIAL GEOTÉRMICO UTILIZANDO
PERCEPCIÓN REMOTA Y SISTEMAS DE
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, EN EL OCCIDENTE
DEL VOLCÁN CEBORUCO, NAYARIT.”**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEOFÍSICO

PRESENTA:

JOSÉ DANIEL ELIZALDE GUERRERO

DIRECCIÓN DE TESIS:

DRA. ROSA MARÍA PROL LEDESMA

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F. 2016



Agradecimientos

En opinión de este autor se agradece el apoyo recibido para realizar esta tesis por parte del proyecto del Fondo de Sustentabilidad SENER-CONACyT: “Mapas de Gradiente Geotérmico y Flujo de Calor de la República Mexicana” a cargo del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIE-Geo).

Agradezco enormemente a la Dra. Rosa Ma. Prol Ledesma por compartir su experiencia, visión, energía y alegría, por su apoyo y consejos para desarrollar mis conocimientos académicos e involucrarme en la exploración geotérmica y sobre todo por su paciencia y confianza.

Al jurado por su asesoría y observaciones, gracias Dr. Osvaldo Sánchez Zamora, Dra. Claudia Arango Galván, Ing. Alfredo Victoria Morales e Ing. Juan Sánchez Pérez.

A la Mc. Alejandra Membrillo por sus observaciones, comentarios, recomendaciones y sugerencias para el desarrollo eficaz de este trabajo.

A mis padres por su apoyo en todo momento y a mis hermanos por enseñarme el camino.

A la UNAM, especialmente a la Facultad de Ingeniería, a mis profesores, compañeros y al Instituto de Geofísica.

ÍNDICE

RESUMEN	5
1. INTRODUCCIÓN	6
1.1 Antecedentes	6
1.2 Definición del problema	8
1.3 Justificación	9
1.4 Propósito del estudio	10
2. ENERGÍA GEOTÉRMICA	11
2.1 Origen de los sistemas geotérmicos	11
2.2 Componentes de un sistema geotérmico	16
2.3 Etapas de un proyecto de energía geotérmica	18
2.4 Energía geotérmica en México	22
3. ÁREA DE ESTUDIO	24
3.1 Localización	24
3.2 Geología regional	24
3.3 Tectónica	26
3.4 Geología local	27
4. METODOLOGÍA	29
4.1 Fundamentos de Percepción Remota	29
4.1.1 Definición	29
4.1.2 Desarrollo histórico	29
4.1.3 Panorama del proceso de percepción remota	30
4.1.4 Fuente de energía y principio de radiación electromagnética	32
4.1.5 Espectro Electromagnético	33
4.1.6 Leyes de la radiación	36
4.1.7 Interacción de la radiación	38
4.1.8 Sistema de percepción remota	49
4.1.9 Resolución de instrumentos de percepción remota	55

4.2	Técnicas de procesamiento	58
4.2.1	Materiales	58
4.2.2	Pre-procesamiento	60
4.2.3	Realce digital	63
4.2.4	Transformación de imágenes	65
4.2.5	Sistema de Información Geográfica	74
5.	RESULTADOS	76
5.1	Análisis estadístico	76
5.2	Resultados del pre-procesamiento	77
5.3	Realce espectral	78
5.3.1	Cociente de bandas	78
5.3.2	Análisis de componentes principales	83
5.3.3	Técnica de Crosta	88
5.3.4	Composiciones en falso color	94
5.4	Realce espacial	100
5.5	Integración de la información espacial	103
6.	DISCUSIÓN	107
7.	CONCLUSIONES	113
8.	LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN A SEGUIR	115
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116

RESUMEN

El objetivo principal de esta tesis es localizar recursos geotérmicos con base en las evidencias superficiales que son las que se pueden localizar e identificar con las técnicas de percepción remota, como son la presencia de alteración hidrotermal en las rocas y de estructuras principales que favorezcan una alta permeabilidad de las rocas en el yacimiento. Al menos tres zonas presentan la posible ocurrencia de minerales de alteración hidrotermal y tienen características estructurales favorables para el desarrollo de una etapa de exploración de recursos geotérmicos, al occidente del volcán Ceboruco, Nayarit. Las zonas identificadas se denominaron como Tepetiltic, San Pedro y Santa María, éstas se identificaron a partir del procesamiento digital de una imagen Landsat TM (columna 30 y renglón 45) con técnicas de realce espectral y espacial. La técnica de análisis de componentes principales permitió diferenciar las zonas que contienen minerales típicos de alteración hidrotermal como óxidos e hidroxilos en zonas parcialmente cubiertas con vegetación, la cual tiene una respuesta espectral similar. Se integró espacialmente la cartografía de lineamientos estructurales, fallas, fracturas, estructuras volcánicas, así como de la presencia de zonas alteradas hidrotermalmente en superficie como resultado de la convección de fluidos. A partir de estos resultados se elaboró una serie de mapas preliminares del subsuelo que servirán de guía en las subsecuentes etapas de exploración para localizar las principales zonas de descarga de los sistemas hidrotermales y señalar las zonas con potencial geotérmico.

ABSTRACT

The main objective of this thesis is to locate geothermal resources, based on superficial evidence like hydrothermal alteration and main structures that can be identified with remote sensing techniques, such as the presence of hydrothermal alteration in rocks and major structures that favor high rock permeability in the reservoir. At least three areas show the possible occurrence of hydrothermal alteration minerals and have favorable structural features for the development of an advanced geothermal exploration stage in the western side of the Ceboruco volcano, Nayarit. The identified areas were designated as Tepetiltic, San Pedro and Santa Maria, they were identified using digitally processed Landsat TM images (path 30 and row 45). The technique of principal component analysis allowed to differentiate the areas containing hydrothermal alteration minerals such as oxides and hydroxyls, even in areas partially covered with vegetation, which has a similar spectral response. Mapping of structural lineaments, faults, fractures, volcanic structures and hydrothermally zones by fluid convection allowed spatial integration of a series of preliminary maps that will serve as a guide in further advances exploration stages to locate hydrothermal systems and the point out areas with geothermal potential.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Las múltiples necesidades de la actividad productiva y la constante demanda de bienestar de la población, han detonado una continua búsqueda por conseguir una generación de energía mayor pero que impacte de la menor manera al medio ambiente. Se trata, por tanto, de seguir las rutas que permitan cubrir el mayor número de necesidades de la población con energía limpia, y que conlleve a su bienestar y comodidad.

De manera global, la protección del medio ambiente se ha convertido en una de las principales preocupaciones en todas las sociedades del mundo. En este sentido, la electricidad, como forma final de energía, es muy utilizada por su seguridad y versatilidad y la facilidad en su distribución. Sin duda, tanto en usos residenciales como en la industria y los servicios, la electricidad, en su etapa última, ha significado una alternativa ampliamente utilizada. A cambio de esta cualidad, los efectos sobre el medio ambiente ocurren en el proceso de generación de energía eléctrica (de investigaciones Eléctricas, 1999).

La geotermia es la energía contenida como calor en el interior de la Tierra. Es reconocida como una fuente de energía renovable, inmensa y prácticamente inagotable usada para la generación de electricidad en forma continua y confiable, lo que permite el ahorro de combustibles fósiles y que contribuye a la diversificación de las fuentes de energía (Barbier, 2002).

Aunque se ha especulado sobre el riesgo por subsidencia y contaminación de suelo y agua por salmueras, entre los beneficios de la generación de energía geotérmica, se puede mencionar que se trata de una fuente de energía generalmente renovable que, cuando se administra de forma racional su aprovechamiento es sostenible en tiempos mayores a 100 años, con impactos mínimos sobre el medio ambiente en comparación con los combustibles fósiles. El uso del suelo para la construcción de instalaciones y las perforaciones es poco, el impacto ambiental es mínimo y fácil de prevenir y mitigar, el incremento en la inversión social a través del apoyo a comunidades en sus programas de

desarrollo local, de costo moderado y, sobre todo, con una tasa prácticamente nula de emisión de gases con efecto invernadero (IRENA, 2015).

La industria que gira alrededor de las energías renovables, y en particular de la geotermia, está creciendo en forma paulatina en respuesta a las necesidades futuras de energía de los países, y ante la amenaza pronosticada del probable agotamiento de los hidrocarburos y los problemas de cambio climático.

Actualmente la geotermia contribuye en la generación eléctrica mundial mediante el desarrollo de los sistemas hidrotermales, y se espera para 2030 un despliegue acelerado en su aprovechamiento, impulsado por sus ventajas en comparación con otras fuentes de energía renovable, sobre todo por los factores de planta de más del 90%. El impulso de industrialización que México está experimentando conlleva también un aumento en la demanda de energía. La geotermia aporta el 1,59% de la energía eléctrica que el país necesita para su abastecimiento y consumo, y representa una buena opción de cara a su futuro energético (SENER). El estado de Nayarit tiene la posibilidad de incrementar su potencial renovable desarrollando aún más la generación de energías limpias, principalmente la geotérmica en los alrededores del volcán Ceboruco. Hoy en día el Ceboruco es uno de los diez volcanes activos de la República Mexicana con fumarolas en las cercanías de los focos de la erupción más reciente de 1870. Este volcán representa una fuente de calor en la región occidental del Cinturón Volcánico Mexicano, ésto resulta interesante porque los puntos de nuestro planeta donde se presentan descargas concentradas de calor, generalmente se ubican en las zonas de tectonismo y vulcanismo joven, y sobre todo a lo largo de los límites de placas tectónicas donde hay volcanes activos o fallas geológicas (Barbier, 2002).

Un primer paso para determinar el potencial de la energía térmica en la superficie poniente del volcán es mediante un mapa de flujo de calor, ya que este es el punto de partida para estimar la energía térmica almacenada en el subsuelo de una región determinada. Además, para convertir la energía almacenada a un potencial eléctrico probable, debe estimarse primero la cantidad de calor que podría ser recuperado en superficie. Para localizar el recurso geotérmico se realizan estudios de reconocimiento y exploración superficial de tipo geológico, geofísico y geoquímico a escala regional y luego a detalle. Una vez identificado el recurso se requiere perforar pozos de prueba en la formación para evaluar la recuperación de la energía geotérmica almacenada. La

perforación es el gasto más importante en el desarrollo de los recursos geotérmicos, ya que aunado a su alto costo se tiene el alto riesgo para poder finalmente desarrollar el recurso.

En los estudios geológicos regionales se ha utilizado con gran éxito el análisis de imágenes de satélite con técnicas de percepción remota para obtener información de la superficie del terreno como la cartografía de lineamientos estructurales, fallas, fracturas y zonas mineralizadas para elaborar planos geológicos preliminares del subsuelo que sirvan de guía en las subsecuentes etapas de exploración para localizar los sistemas hidrotermales y que se integren con los datos obtenidos con otras disciplinas como la Geología, la Geoquímica y la Geofísica (Barbier, 2002).

Con la creación de numerosos sensores y plataformas con gran variedad de valores de resolución espacial, temporal, radiométrica y espectral, el uso de datos de percepción remota para diversas aplicaciones ambientales y mapeo de recursos ha experimentado un considerable aumento en las últimas décadas (Meneses III, 2013).

La tecnología de percepción remota ha desempeñado un papel cada vez más importante en los campos de la geología y en la búsqueda de yacimientos minerales. Su aplicación con imágenes multi e hiper-espectrales permite identificar áreas de la superficie terrestre que presentan alteración hidrotermal de rocas y lineamientos estructurales de forma rápida, precisa y económica por lo que se utiliza como herramienta auxiliar en la exploración de recursos geotérmicos (Sabins, 1999; Fernández *et al.*, 2001; Mutua *et al.*, 2011).

Finalmente con la aplicación de un Sistema de Información Geográfica (SIG) se toma la información generada a partir de los datos digitales de los sensores remotos combinados con otros datos geospaciales (geológicos, geoquímicos y geofísicos) que permiten resolver un problema práctico específico, tal como planear el uso de suelo o la exploración en minería e hidrogeología (Saraf & Choudhury, 1998).

1.2 Definición del problema

Se elige la zona de estudio a partir de la presencia de vulcanismo reciente y manifestaciones superficiales reportadas, que muestran resultados favorables de encontrar sistemas hidrotermales activos en la zona (Castillo & De la Cruz, 1992; Ferrari *et al.*, 2003).

No hay manantiales termales reportados en la zona pero si hay descarga de gases en las cercanías de los focos de la última erupción. Por lo que esta investigación se aplica como una estrategia que pretende determinar la presencia de zonas con potencial geotérmico donde no existen expresiones termales obvias en superficie, por lo que su identificación dependerá de la caracterización de lineamientos y alteración hidrotermal y la interpretación de estructuras. Por lo tanto se intentará descubrir recursos geotérmicos con base en las evidencias superficiales con las técnicas de percepción remota.

La solución a esta problemática representa una aportación importante al desarrollo del potencial geotérmico y energético de la zona y el impacto positivo que tiene para la economía, el medio ambiente, los habitantes y las empresas energéticas en el país.

1.3 Justificación

Con la tecnología de percepción remota se obtienen imágenes en diferentes frecuencias del espectro electromagnético que combinadas entre sí, resaltan diferentes rasgos superficiales, como pueden ser fallas, lineamientos y zonas alteradas hidrotermalmente, con esta información y con el desarrollo de un modelo cuantitativo es posible integrar dicha información para elaborar mapas temáticos que sirvan de apoyo a las siguientes etapas de exploración que permitan una mejor evaluación de los recursos geotérmicos.

La presente investigación contempla la identificación de recursos geotérmicos, como parte de la etapa de reconocimiento, de un campo geotérmico, que podría ser aprovechado comercialmente para generación de energía eléctrica.

El estado de Nayarit tiene la posibilidad de incrementar su potencial renovable desarrollando aún más la generación de energía eléctrica limpia, que actualmente incluye a: la Presa Hidroeléctrica de Aguamilpa en el municipio de Tepic, la Presa del Cajón y La Yesca en Santa María del Oro y la planta geotérmica en San Pedro Lagunillas.

Con la concesión otorgada a una empresa privada para el uso y explotación de recursos geotérmicos en San Pedro Lagunillas (Del Valle, 2015), la información resultante de este trabajo será compartida con los organismos competentes, con el propósito de disponer del conocimiento adecuado para la toma de decisiones respecto a la ubicación de zonas para barrenación de pozos de prueba como una etapa de exploración geotérmica a mayor detalle.

1.4 Propósito del estudio

El objetivo principal consiste en identificar zonas específicas, a partir del procesamiento digital de imágenes Landsat TM para identificar y mapear tanto la alteración hidrotermal de rocas como los lineamientos, en las cuales existan las condiciones geológicas y geoquímicas indicadoras de actividad hidrotermal que permitan desarrollos geotérmicos futuros al occidente del volcán Ceboruco, Nayarit, México.

Los objetivos específicos son:

1. Desplegar información espacial que muestre la presencia de rocas que contienen óxidos de hierro e hidroxilos asociados a alteraciones hidrotermales.
2. Mapear las estructuras activas como fallas y fracturas que incrementen la permeabilidad de los estratos.
3. Integrar los mapas obtenidos como resultado de la aplicación de realce espectral y espacial a las imágenes Landsat TM para identificar y definir las zonas con potencial geotérmico.

2. ENERGÍA GEOTÉRMICA

En este capítulo se tratan puntos fundamentales de la geotermia, que son relevantes para entender el trabajo que se aplica en la exploración de sistemas hidrotermales.

2.1 Origen de los sistemas geotérmicos

Se presentan tres ideas importantes y necesarias para introducirse en los sistemas geotérmicos: a) La estructura interna de la Tierra. b) El origen de la fuente de calor y los mecanismos de transferencia de calor en el interior del manto y la corteza. c) El gradiente térmico y la conductividad térmica de las rocas.

a) La estructura interna de la Tierra

La palabra *geotermal* proviene del griego *Geo* significa tierra, *Termal* significa calor. El calor es una forma de energía y la geotermia literalmente es la energía contenida en forma de calor dentro de la Tierra. El origen de este calor está relacionado con la estructura interna de nuestro planeta y los procesos físicos que ocurren en él. Usualmente es referida a la energía que puede ser recuperada o extraída y utilizada por el hombre (Barbier, 2002; Dickson & Fanelli, 2003).

A medida que se acumulaba el material para formar la Tierra, el impacto a gran velocidad de los restos de nebulosa y la desintegración de los elementos radiactivos provocó el aumento constante de la temperatura y en consecuencia comenzó un proceso de diferenciación química, el cual estableció las tres divisiones básicas del interior de la Tierra: el núcleo rico en hierro, el manto y la corteza. El interior de la Tierra se caracteriza por un aumento gradual de temperatura, presión y densidad con la profundidad. La temperatura en el núcleo es alrededor de 4000°C y la presión en el centro de la tierra 360000 MPa. El material caliente que se encuentra en las profundidades del manto se mueve despacio hacia arriba y sirve como una parte del sistema de convección interna del planeta. Simultáneamente, láminas más frías y densas de la litosfera oceánica descienden al manto, poniendo en movimiento la litosfera (Tarbuck & Lutgens, 2005).

- **Teoría de las placas tectónicas y el desarrollo geológico de los recursos geotérmicos**

La teoría de tectónica de placas actualmente aceptada, es la base sobre la que se consideran la mayoría de los procesos geológicos. Explica que el movimiento observado de la capa externa de la Tierra o litosfera (corteza suprayacente y manto superior) por medio de mecanismos de subducción y de expansión del fondo oceánico, se divide en bloques o en placas separadas, denominadas placas litosféricas (contempla los continentes y el piso oceánico). Estas placas se mueven una respecto de la otra lentamente por encima de la astenosfera superior, que es la región más dúctil del manto, a una velocidad de unos pocos centímetros por año. Este movimiento es impulsado en último extremo por la distribución desigual de calor en el interior de la Tierra. Si las placas se alejan una de otra el movimiento es divergente, si se mueven una hacia la otra es convergente y de transformación cuando se deslizan entre sí (Tarbuck & Lutgens, 2005).

- **Bordes de placa**

Las placas interactúan principalmente en tres tipos de bordes, que se diferencian en función del tipo de movimiento que exhiben. Esos bordes se muestran en la parte inferior de la Figura 2.1 y se describen brevemente a continuación:

- 1) **Bordes divergentes (bordes constructivos):** donde dos placas se separan, lo que produce el ascenso de material desde el manto para crear nuevo suelo oceánico, son sitios favorables para la presencia de campos geotérmicos, por ejemplo Islandia, las islas Azores, y la depresión de Afar en Etiopia en dorsales oceánicas que se extienden sobre el nivel del mar y, dorsales en los continentes como la extensión al norte de la Dorsal del Pacífico oriental, con los campos geotérmicos de Cerro Prieto, en México y el valle Imperial en EE.UU, y el Rift de África Oriental, con los campos de Langano en Etiopia y Olkaria en Kenia (Barbier, 2002).
- 2) **Bordes convergentes (bordes destructivos):** donde dos placas (una de mayor densidad que la otra) se juntan provocando el descenso de la litosfera oceánica debajo de una placa superpuesta, que es finalmente reabsorbida en el manto (este proceso se conoce como subducción) o posiblemente la colisión de dos bloques

continentales para crear un sistema montañoso. Japón, Indonesia, Nueva Zelandia, Chile y Centroamérica son ejemplos del proceso de subducción y la parte noroeste de la India, Australia y la placa Euroasiática son ejemplo de colisión de continentes (Barbier, 2002). La fusión de la corteza y el empuje descendente producen cápsulas de magma que se elevan en la placa superior y actúan como fuentes de calor para yacimientos geotérmicos superpuestos.

Anomalías de fusión intraplaca son responsables del vulcanismo Cuaternario y campos geotérmicos asociados donde plumas del manto suben debajo de un continente (Yellowstone en los EE.UU) o una placa oceánica (Hawai). En lugar de romper la placa, las plumas como fuente de calor (o “*hot spot*”) por debajo de la placa móvil, forman una línea de volcanes que gradualmente se van alejando del centro eruptivo.

- 3) Bordes de falla transformante (bordes pasivos): donde dos placas se desplazan lateralmente una respecto de la otra sin la producción ni la destrucción de litosfera.

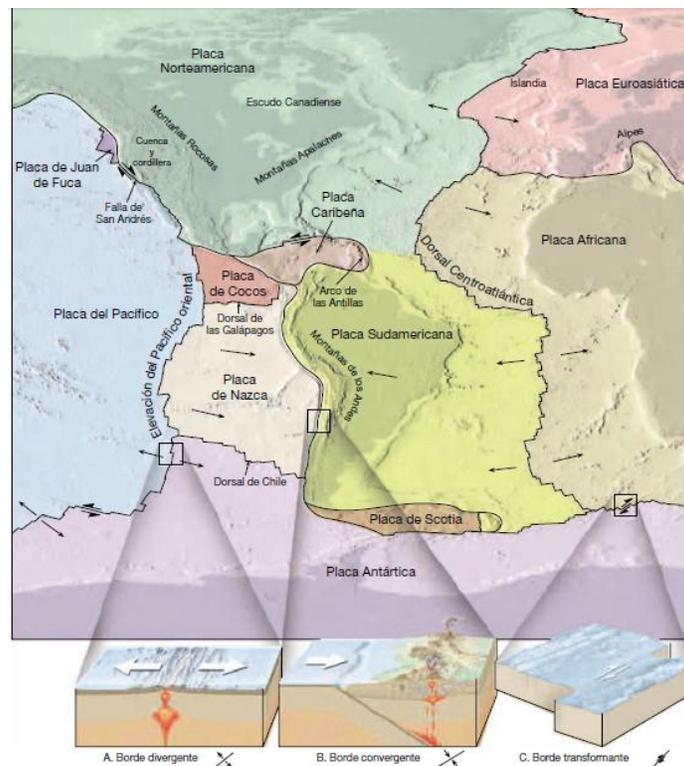


Figura 2.1 – La imagen muestra las principales placas tectónicas y los bordes de placa (tomada de Tarbuck & Lutgens, 2005).

b) Origen de la fuente de calor de la Tierra

El flujo de calor de la Tierra es la cantidad de calor que se libera al espacio desde el interior a través de una unidad de área en una unidad de tiempo. Este flujo varía con el tiempo y de un lugar a otro en la superficie. Se origina a partir del calor generado durante la formación de la Tierra y por la desintegración de los isótopos radiactivos de vida larga comparable a la edad de la Tierra: ^{40}K , ^{232}Th , ^{235}U y ^{238}U . El flujo de calor de la corteza continental deriva de este decaimiento dentro de la corteza superior, junto con el calor generado en el más reciente episodio magmático y el calor procedente del manto. En la corteza oceánica, la concentración de isótopos radiactivos es insignificante, y el flujo de calor se deriva en gran parte del calor que fluye desde el manto por debajo de la litosfera (Barbier, 2002). Por lo que en sistemas geotérmicos, las fuentes de calor pueden ser debidas a: intrusión magmática a alta temperatura ($>6000^\circ\text{C}$) a profundidades someras (5 – 10 km), corrientes convectivas de fluidos a alta temperatura, reacciones exotérmicas dentro de la corteza, fricción entre capas generadas por fallamientos, calor latente liberado por la cristalización del magma, entre otras.

• *Transferencia de calor dentro de la Tierra*

La extracción y la utilización del calor relacionado al movimiento del magma dentro de la corteza requieren un portador para transferir el calor hacia profundidades accesibles debajo de la superficie de la Tierra. Generalmente el calor se transfiere de lo más profundo hacia las regiones superficiales por medio de los fluidos geotérmicos a partir de dos procesos de transferencia:

- La conducción: involucra la transferencia aleatoria de energía cinética entre las moléculas sin transferencia de material, el movimiento de las moléculas causa una vibración más rápida y transfiere calor. La conducción es el principal modo de transferencia de calor en sólidos.
- La convección: involucra la transferencia de calor entre un fluido (líquido o gaseoso) y un cuerpo sólido. Consiste en el movimiento de fluidos calientes de un lugar a otro. Es más eficiente en comparación con la conducción.

La Figura 2.2 muestra la relación del punto de ebullición con la profundidad bajo condiciones estáticas (recarga más densa/ descarga menos densa). En un sistema hidrotermal el agua se infiltra hacia el interior por convección (A-B), debido a las variaciones de densidad causadas por la temperatura (B-C), la transferencia de calor desde las partes más bajas del depósito a sus partes superiores ocurre por conducción (C-F), el calor es transferido por conducción desde el cuerpo de magma hacia las rocas del yacimiento permeable (G-F). Fluidos calientes a menudo escapan del depósito y llegan a la superficie, produciendo la actividad geotérmica visible como punto de ebullición (D-E).

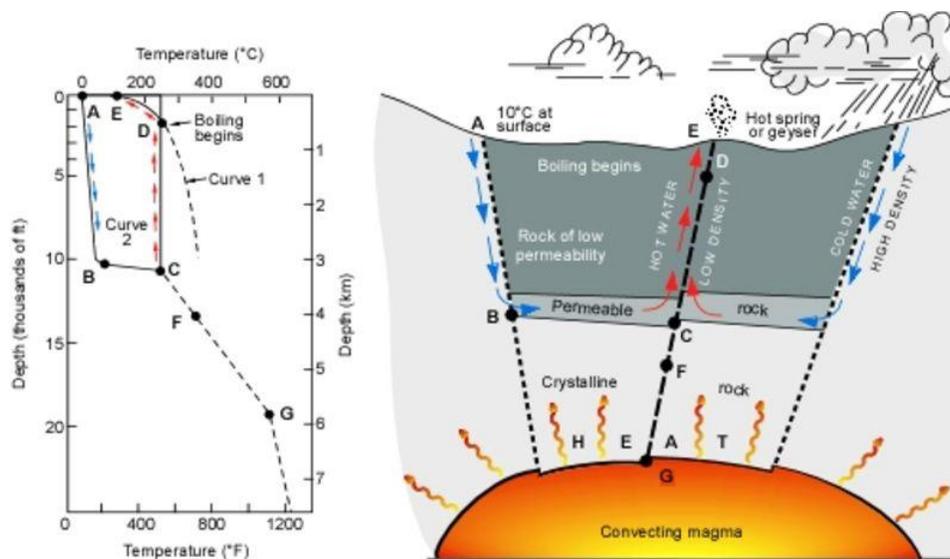


Figura 2.2 – La imagen muestra un sistema hidrotermal (tomado de www.geothermal-energy.org).

c) El gradiente geotérmico de la Tierra y la conductividad térmica de las rocas

El calor de la Tierra se mueve desde el interior hacia la superficie donde se disipa, esto se observa con el gradiente geotérmico, significa que aumenta la temperatura de las rocas con la profundidad, en promedio $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$.

La cantidad de calor que fluye por conducción a través de una unidad de superficie de 1 m^2 de roca sólida en un tiempo determinado, que es la tasa de flujo de calor, es proporcional al gradiente geotérmico y a una constante de proporcionalidad que se conoce como la conductividad térmica de rocas, ésta se define como la cantidad de calor

conducido por segundo a través de un área de 1 m², cuando el gradiente de temperatura es 1°C / m perpendicular a esa área. Si el gradiente se expresa en °C/km y la conductividad térmica en W/m°C, el flujo de calor estará en mW/m².

2.2 Componentes de un sistema geotérmico

Un sistema geotérmico contiene un conjunto de elementos que permiten la circulación continua de calor y fluidos, la fuente de calor, el reservorio y el fluido por el cual ocurre la transferencia de calor son los principales, son sistemas de tipo volcánico, tectónico y sedimentario (Tabla 1).

Tabla 1. Tipos de sistemas geotérmicos.

Tipo de Sistema	Marco Geológico
Volcánico-magmático	Andesítico/ Arco de Islas
	Basáltico / <i>Ridge</i> Oceánico-Hawaiano
	Silíceo / Continental (Calderas)
	Cuencas Sedimentarias profundas / Centros de Dispersión
Flujo de Calor Continental	<i>Basin and Range</i> (Extensión/ alto flujo de calor regional)
	Flujo de calor de fondo
Tipo Fase / Química	Líquido-dominante
	Dos-fases
	Vapor-dominante
	Agua meteórica alterada
	Agua de mar alterada

Actualmente los sistemas geotérmicos que se explotan reúnen las siguientes características: liberación de calor debido a un cuerpo intrusivo o una cámara magmática enfriándose todavía en un estado fluido o en estado de solidificación; un conjunto de estratos de roca porosa a una profundidad accesible por perforación, generalmente con alta presión y temperatura, una recarga constante de agua que asegure el transporte continuo de energía a través de los fluidos geotérmicos y una capa impermeable en las partes someras que evite que los fluidos calientes alcancen fácilmente la superficie y los

mantenga bajo presión, dejando solamente algunos canales-fracturas por los que los fluidos escapen a la superficie a través de zonas de descarga, presentes como manantiales termales, geiseres, pozas de lodos caliente, entre otras (Fig. 2.3).

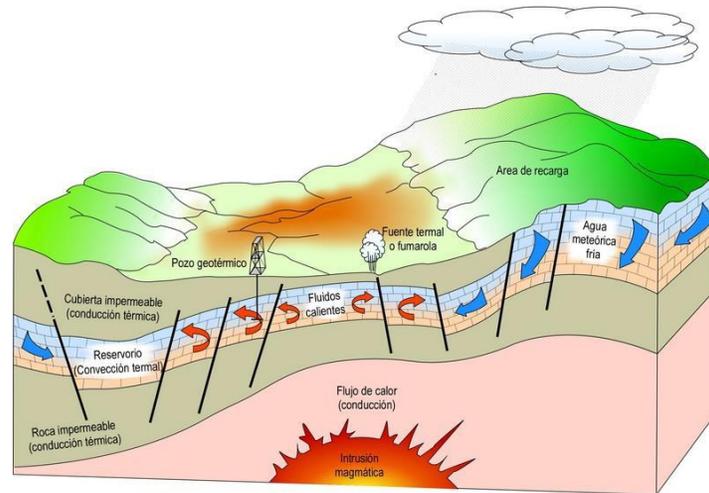


Figura 2.3 – La imagen muestra el modelo conceptual de un sistema hidrotermal (tomado de www.geothermal-energy.org)

Durante la explotación los fluidos se recargan al reservorio a través de la reinyección por medio de pozos que inyectan los fluidos utilizados por las plantas. Este proceso de reinyección puede compensar al menos parte del fluido extraído por la producción, y tendrá un cierto límite para prolongar la vida útil comercial del sistema geotérmico. (Barbier, 2002; Huenges, 2010; Prol-Ledesma & Nieva, 2013).

Los rasgos superficiales relacionados con actividad geotérmica son:

- Manantiales calientes, fumarolas y pozas de lodo.
- Zonas con descarga de gases.
- Composición geoquímica anómala de agua subterránea.
- Brechas producidas por erupciones geotérmicas.
- Depositación de minerales: sílice, carbonato de calcio, sulfatos, boratos.
- Alteración hidrotermal.
- Escarpes de falla.
- Anomalías de la vegetación.
- Anomalías de temperatura superficial o somera.

- Rocas volcánicas jóvenes.

2.3 Etapas de un proyecto de energía geotérmica

Un proyecto de energía geotérmica es un conjunto de actividades interrelacionadas que desarrolla un equipo de personas multidisciplinarias o entidad para alcanzar objetivos específicos de exploración y explotación de los recursos geotérmicos dentro de los límites que impone un presupuesto, calidad establecida y un lapso de tiempo definido. En la Tabla 2 se muestran en general las etapas de desarrollo de un proyecto geotérmico.

En los estudios geológicos regionales se ha utilizado con gran éxito el análisis de imágenes de satélite con técnicas de percepción remota para obtener información de la superficie del terreno como la cartografía de lineamientos estructurales, fallas, fracturas y zonas mineralizadas con alteración hidrotermal para elaborar planos geológicos preliminares del subsuelo que sirven de guía en las subsecuentes etapas de exploración superficial como parte de la fase inicial de un proyecto geotérmico o minero (Wright *et al.*, 1990; Prol-Ledesma *et al.*, 1993; Wannamaker *et al.*, 1994; Ruiz-Armenta & Prol-Ledesma., 1998; Sabins, 1999; Urai *et al.*, 2000; Nash *et al.*, 2004; Littlefield *et al.*, 2009; Mboin, I., 2011; Mutua *et al.*, 2011).

Como se ha mencionado, los fluidos calientes a menudo escapan del reservorio hacia la superficie a través de zonas de debilidad estructural como fracturas y fallas existentes, formando las manifestaciones hidrotermales. La alteración mineral de las rocas de tipo hidrotermal se genera a partir de esta circulación de fluidos calientes que interactúan con la roca, por ello con la identificación de fallas, fracturas y alteración hidrotermal desde la etapa de reconocimiento de un proyecto geotérmico se podría generar información útil acerca del patrón de circulación de los fluidos, la zona de ascenso y descarga de un sistema hidrotermal.

Tabla 2. Etapas de desarrollo de un proyecto geotérmico.

Reconocimiento	Proceso de evaluación ambiental	Reconocimiento		Recopilación de la información disponible		Evaluación del recurso	
		Evaluación de la información	Trabajos de gabinete	Preparación y ejecución de un programa de investigaciones geocientíficas de campo y laboratorio			
		Análisis de imágenes de satélite con técnicas de percepción remota					
		Inventario geotérmico y cartografía de lineamientos estructurales, fallas, fracturas, manifestaciones termales, temperatura, flujo de calor y zonas mineralizadas.		Planos geológicos preliminares			
		Interpretación integrada de los estudios		Definición del área o áreas de interés geotérmico.			
Exploración	Evaluación de impacto ambiental inicial	Exploración superficial		Modelo conceptual: Geología, Geoquímica y Geofísica		Evaluación del recurso	
		Perforación exploratoria		Características de pozos			
		Estudios de prefactibilidad		Reporte de Prefactibilidad			
		Evaluación de pozos perforados		Características de pozos			
Factibilidad		Estudios de factibilidad		Disposición de salmuera, corrosión e incrustaciones		Evaluación del recurso	
Diseño	Evaluación de impacto ambiental	Diseño desarrollado		Localización de pozos y ruta de tuberías			Estudios de ingeniería de reservorios
		Licitaciones y contratos					
		Planta	Obras civiles	Líneas de transmisión	Desarrollo de pozos		
		Construcción de planos	Sistema de colección de fluidos		Perforación		
		Planta potencia/proceso	Diseños finales		Características de producción		
Construcción y Operación	Control y monitoreo ambiental	Construcción e instalación de planta			Manejo del campo	Estudios de ingeniería de reservorios	
		Control de calidad					
		Condicionamiento					
		Operación y mantención comercial				Gestión de concesión y permisos ambientales	

Alteración mineral de tipo hidrotermal en las rocas de la superficie

En un sistema hidrotermal el fluido ascendente en contacto con las rocas provoca una serie de reacciones de hidrólisis producto de un desequilibrio químico entre las condiciones originales de formación de las rocas y las condiciones de composición, temperatura y pH del fluido, que alteran la roca y, por ende, los minerales primarios que la constituyen, lo cual da lugar a la formación de minerales secundarios o de alteración mineral, a través de la transformación de fases minerales, crecimiento de nuevos cristales, disolución de minerales y/o precipitación, cambio textural y reacciones de intercambio iónico (Henley & Ellis, 1983).

La alteración mineral de tipo hidrotermal son asociaciones de minerales secundarios (como óxidos de hierro, hidroxilos, arcillas y carbonatos) formados por el reemplazamiento de otros minerales que han formado la roca (olivino, piroxeno, anfíbol, feldespato potásico y plagioclasas) y son una herramienta útil para conocer elementos de sistemas geotérmicos activos y fósiles, tales como la capa sello, la zona de ascenso y descarga, el patrón de circulación de los fluidos y sus características, además proporcionan un mejor conocimiento de procesos de interacción agua/roca y son parte integral de la investigación geotérmica e interpretación con base en la mineralogía observada (Kauffmann, 1988).

Feldespatos alcalinos dan lugar a una fase que son las illitas, y estas mismas illitas dan lugar a la caolinita. La caolinita como mineral de alteración de rocas ígneas, típicamente volcánicas, es un indicador de que ha circulado fluido de muy alta acidez y temperatura cercana a los 100°C. Otras reacciones están relacionadas con cambios en las posiciones de óxido reducción, por ejemplo, los cambios de fase que contienen hierro, como la pirrotita que se pierde en condiciones de mayor oxidación, se oxida a pirita y estos a óxidos como hematita o la goethita. El óxido de hierro se observa con frecuencia en los afloramientos de rocas alteradas hidrotermalmente como resultado del intemperismo, su identificación es una clave útil para definir las áreas que contengan rocas alteradas hidrotermalmente por intemperismo.

En los hidroxilos se encuentran minerales como: alunita, yeso, talco, clorita, pirofillita, caolín, muscovita, montmorillonita e illita, los cuales son formados a partir de una reacción química llamada hidrólisis (Henley *et al.*, 1983).

Los minerales de alteración hidrotermal comunes en campos geotérmicos son: calcita, cuarzo, minerales arcillosos (esmectitas, illita), arcillas cloríticas, ceolitas, clorita, pennina, epidota, anhidrita, pirita y wairakita, entre otros. Las facies argilítica y filítica son la asociación de minerales secundarios presentes en superficie (Tabla 3). Las facies permiten definir rangos de temperaturas a las que se formaron esos minerales, identificarlos ayuda a saber si se está acercando al reservorio geotérmico, para la parte mecánica de perforación, sirve para proponer la estabilidad del pozo.

Tabla 3. Asociaciones minerales presentes en las zonas de alteración hidrotermal de los principales tipos de rocas encajonantes (Ruiz-Armenta & Prol-Ledesma, 1998).

Zona	Mineralogía
Propilítica	Sericita*, Albita, Feldespato-K, Biotita*, Siderita*, Pirita, Hematita, Ankerita, Calcita*, Montmorillonita*, Zeolita, Epidota*, Clorita*.
Argilica	Caolinita*, Montmorillonita*, Pirita.
Fílica	Sericita*, Topacio, Turmalina
Argilización avanzada	Caolinita*, Alunita*, Pirofilita*, Pirita.
Potásica	Sericita*, Calcita*, Ankerita, Pirita, Biotita*, Feldespatos-K, Hematita, Siderita*, Clorita*.

*Minerales con rasgos espectrales en el infrarrojo cercano y medio.

Estructuras geológicas que controlan el movimiento de los fluidos en profundidad

El control del movimiento de los fluidos geotérmicos en profundidad, en un sistema de rocas fracturadas, es realizado por las fracturas y fallas geológicas; aunque también puede haber algún control ejercido por contactos entre diferentes capas litológicas.

En el caso de reservorios en medio de porosidad y permeabilidad primaria, el control lo ejercen los poros interconectados entre sí y también pueden estar presentes fracturas, fallas geológicas y contactos litológicos.

Las estructuras activas como fallas y fracturas que incrementen la permeabilidad de los estratos y que sugieran la salida del recurso geotérmico pueden localizarse utilizando el

método propuesto por Moore & Waltz (1983) para realce de bordes con los filtros espaciales en la imagen y sobre un modelo digital del terreno con iluminación artificial (Ferrer *et al.*, 1986).

Los Sistemas de Información Geográfica (en adelante SIG) son una importante herramienta para integrar información espacial de diferentes campañas de exploración. Por lo que los SIG han sido utilizados en la exploración geotérmica (Prol-Ledesma, R. M., 2000; Nash *et al.*, 2001; García-Estrada *et al.*, 2003; Velador *et al.*, 2003; Moghaddam *et al.*, 2014; Noorollahi *et al.*, 2007, 2008; Noorollahi, Y., & Itoi, R., 2008; Carranza *et al.*, 2008; Seugn-Gyun *et al.*, 2010; Tüfekçi *et al.*, 2010).

2.4 Energía geotérmica en México

En México la primera unidad geotermoeléctrica empezó a operar desde 1959 con 3.5 MW de capacidad, en el campo geotérmico de Pathé, Hidalgo, actualmente fuera de operación. A través de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), el país cuenta con una extensa experiencia en la generación geotermoeléctrica, opera actualmente 38 unidades con una capacidad instalada total de 1051 MW (Tabla 4). Según la información recolectada por Lund *et al.* (2010) en México, al final del 2009 para utilización de energía geotérmica para usos directos alcanzó una capacidad instalada de 155.8 MWt; con un uso anual de 4022.8 TJ/año; uso anual 1117.5 GWh/año; factor de capacidad: 0.8, y del Sistema de Información Eléctrica con información de CFE se conoce que la capacidad efectiva instalada y la generación bruta de energía geotérmica a Junio de 2015, son de 873 MW y 536,331.406 MWh respectivamente.

Los cuatro campos geotérmicos en operación comercial de CFE son: Los Azufres y Los Humeros, dentro del Cinturón Volcánico Mexicano, Las Tres Vírgenes y Cerro Prieto en la península de Baja California y una futura concesión para instalar un nuevo campo en Cerritos Colorados, Jalisco (Gutiérrez-Negrín *et al.*, 2015). El campo geotérmico Domo de San Pedro en Nayarit está a cargo de una empresa privada que planea empezar la producción en el corto plazo (Del Valle, 2015).

Tabla 4. Características de los cinco campos geotérmicos que operan en México.

Campo	Inicio	Capacidad [MW]	
		Instalada	Operando
Cerro Prieto, BC.	1973	720	570
Los Azufres, Mich.	1982	227.4	224.4
Los Humeros, Pue.	1990	93.6	68.6
Las Tres Vírgenes, BCS.	2001	10	10
Domo San Pedro, Nay.	2015	10	10
Total		1061	883

3. ÁREA DE ESTUDIO

3.1 Localización

El área de estudio se ubica en la parte SSW del estado de Nayarit y el límite NNW del estado de Jalisco; entre las coordenadas geográficas 21°6' y 21°25' de latitud norte y los meridianos 104°28' y 104°48' de longitud oeste, con una superficie de 1208,19 km² (34,5 x 35,02 km). Políticamente se localiza entre los municipios de Santa María del Oro, Jala, Ahuacatlán, San Pedro Lagunillas, Xalisco y Tepic (Fig. 3.1).

3.2 Geología regional

El área de estudio se encuentra en el Graben Tepic-Zacoalco, considerado como uno de los bordes del Bloque Jalisco (en adelante BJ), en el extremo noroccidental del Cinturón Volcánico Mexicano (en adelante CVM). El contacto tectónico entre el BJ y el CVM está cubierto por productos volcánicos calcioalcalinos, transicionales y alcalinos sódicos (Ferrari *et al.*, 2003).

El CVM es un complejo arco continental relacionado con la subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Placa Norteamericana a lo largo de la Trinchera Mesoamericana. Se extiende desde el Mar de Cortés hasta el Golfo de México (Fig. 3.1). Abarca una buena porción de la parte central de México y está formado en su mayoría por conos cineríticos basálticos y volcanes escudo, estratovolcanes andesíticos a dacíticos y domos dacíticos a riolíticos. Se divide en tres sectores: occidental, central y oriental, que presentan diferencias significativas en lo que respecta al tipo de vulcanismo y su composición química (Demant, 1978,1981; Suárez & Singh, 1986).

El sector occidental donde se localiza el área de estudio, está limitado al este por el "riff" de Colima, el arco volcánico se sobrepone a la parte norte del BJ (Cretácico-Paleoceno) y al límite meridional de la Sierra Madre Occidental (Oligoceno-Mioceno temprano). Presenta vulcanismo del periodo cuaternario influenciado por la subducción de la Placa Rivera debajo de la Placa Norteamericana. Contiene una transición (que ocurre de manera simultánea a la reorganización de la placa causada por la extensión del Golfo de California) de rocas volcánicas silíceas en la Sierra Madre Occidental (en adelante SMO)

a rocas volcánicas más máficas (Ferrari *et al.*, 2000). Las rocas basálticas del CVM dominan esta región y son resultado de procesos extensivos más recientes (Ferrari *et al.*, 1994)

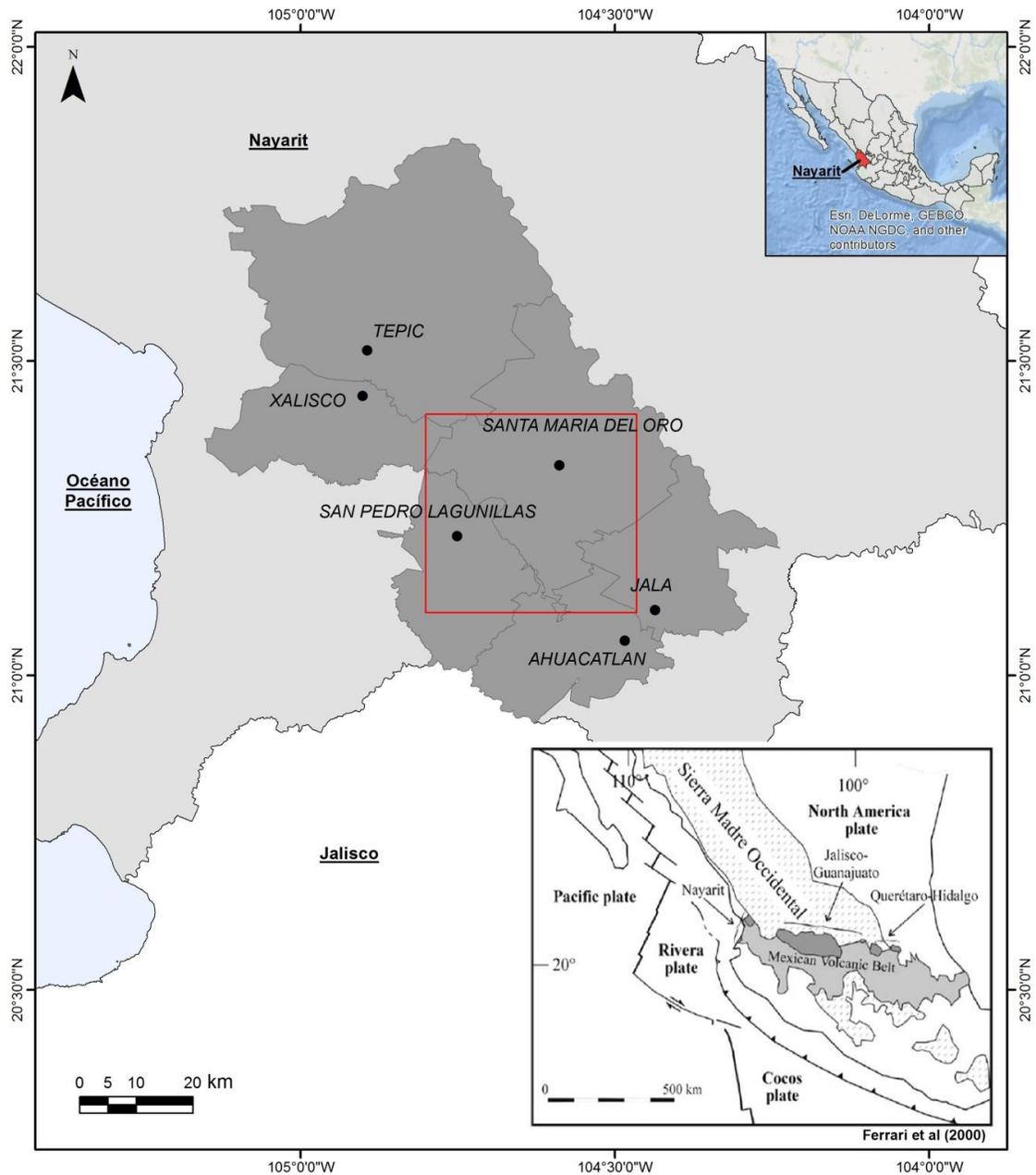


Figura 3.1 – La imagen muestra la localización del área de estudio y un mapa modificado de Ferrari *et al* (2000) que muestra la geología y tectónica del centro de México, las principales provincias volcánicas cenozoicas y las cuatro placas tectónicas principales. Además representa en gris oscuro los afloramientos de lavas máficas de finales del Mioceno.

3.3 Tectónica

La tectónica regional para este sector está caracterizada por el BJ definido como un sistema de tres fallas extensionales: Graben Tepic-Zacoalco, Graben Chapala y Graben Colima con orientación N-S, E-W y NW-SE donde cada sistema corresponde a “*rifts*” activos independientes (Ferrari *et al.*, 1994). Las rocas dominantes en el área de los tres grábenes son andesitas calcoalcalinas y rocas relacionadas, típicas de los arcos volcánicos de subducción. En el Graben Colima y Graben de Tepic-Zacoalco se han producido magmas alcalinos contemporáneamente con magmas calcoalcalinos desde el Plioceno (Luhr *et al.*, 1985).

El Graben Tepic-Zacoalco se extiende 180 km hacia el Noroeste, a 50 km del punto triple de Jalisco, y eventualmente se une a la parte noroeste del CVM. Está caracterizado por una fuerte asimetría y la presencia de bloques de alrededor de 1 km de largo. Muestra fallas transformantes laterales derechas con orientación paralela al azimut de las fallas transformantes del golfo de California y fallas laterales izquierdas del Mioceno-Plioceno inferior, seguidas de un fallamiento lateral-derecho en el Plioceno superior-Cuaternario (Ferrari *et al.*, 1994). La existencia de este graben está claramente marcada por la perfecta alineación NW-SE de volcanes activos, desde Guadalajara al SE hasta Tepic al NW, e incluye los centros volcánicos de la Sierra La Primavera, Tequila, Ceboruco, Tepetitlic, Santa María del Oro, Sangangüey, Las Navajas, San Juan, pequeños conos escoriáceos y domos riolíticos y dacíticos, con la excepción de las Sierras La Primavera y Las Navajas, que son volcanes riolíticos alcalinos, los volcanes de esta porción del CVM han emitido lavas y cenizas calcoalcalinas (Nelson, 1986). Toda esta región está cubierta de material volcánico reciente, el más joven de los volcanes de ésta zona erupcionó hace menos de mil años, y se sabe que han venido erupcionando desde el Pleistoceno (Ferrari *et al.*, 1994).

El Graben Tepic-Zacoalco está compuesto por numerosos sistemas de fallas, que se agrupan en dos ramas principales:

- Rama Norte: formada por dos cuencas escalonadas, el Graben Ceboruco y el graben de Barrancas-Santa Rosa. En los límites entre estas dos cuencas o depresiones se presentan movimientos de deslizamiento. En la parte sureste del

graben Plan de Barrancas-Santa Rosa se encuentran rocas del Cuaternario, que se ven afectadas por pequeñas fallas (Rosas-Elguera *et al.*, 1996).

- Rama Sur: consiste de tres medios grábenes: Amatlán de Cañas, Zacoalco y Río Ameca. Se localizan dentro del Bloque Jalisco y son paralelos a la rama norte del rift Tepic (Rosas-Elguera *et al.*, 1996). Las paredes de los medios grábenes son de rocas graníticas del Cretácico, las cuales son cortadas por las fallas normales de deslizamiento sureste. El primer medio graben está formado por volcanes alcalinos y calcoalcalinos que están encima de un conglomerado granítico con un espesor de 100 m. La depresión situada más al este es el medio graben Zacoalco, que está formado por fallas de deslizamiento con dirección sur-suroeste con un desplazamiento vertical mínimo de 1400 m. Se sugiere el graben del Río Ameca, como una ramificación secundaria del Graben Tepic-Zacoalco.

3.4 Geología local

La actividad volcánica está representada por el volcán Ceboruco y los conos cineríticos asociados con dirección NW-SE. La única erupción histórica bien documentada ocurrió en el año de 1870, cuyo resultado fue un derrame de lava riodacítico en el flanco occidental del Ceboruco (Nelson, 1986).

El Ceboruco es un estratovolcán calco-alcalino de tamaño medio con flujos de lava andesítica que predominan sobre las unidades félsicas de material piroclástico (Ferrari *et al.*, 2003), tiene una altura de 2,200 m.s.n.m y un volumen aproximado de 60 km³. Forma parte de la cadena de volcanes que se extienden desde Guadalajara, Jalisco hasta Tepic, Nayarit. Así como los volcanes San Juan, Tepetitlic y Santa María del Oro, el Ceboruco también tiene calderas (Williams y McBirney, 1979). Las laderas oriental y meridional están cubiertas por vegetación. Sin embargo, las laderas occidental y septentrional están cubiertas por derrames de lava que parecen muy recientes. En la ladera suroriental se encuentran dos domos volcánicos y un cono escoriáceo, y en la noroccidental algunos conos escoriáceos. Estos se alinean con una serie de pequeños volcanes en dirección noroccidental, que pasa por el Ceboruco, paralela a la estructura general de la región (Nelson, 1986). La geología local descrita por Nelson (1986), está dominada por afloramientos de rocas volcánicas, principalmente ignimbritas riolíticas y andesitas que

están sobre una secuencia de rocas arcillosas intrusionadas por granitos y gabros, esto se aprecia también en la Figura 3.2.

Actualmente el Ceboruco es uno de los diez volcanes activos de la república con fumarolas en las cercanías de los focos de la erupción más reciente de 1870. Además de otras dos erupciones, de las cuales la más grande está ubicada sobre la fractura de la caldera exterior, donde el suelo tiene un color rojo debido a la oxidación del hierro. La otra está ubicada en el flanco occidental del domo central en la caldera interior. Las fumarolas de la fuente de erupción de 1870 están depositando cantidades pequeñas de azufre y emiten un olor a H₂S (Nelson, 1986)

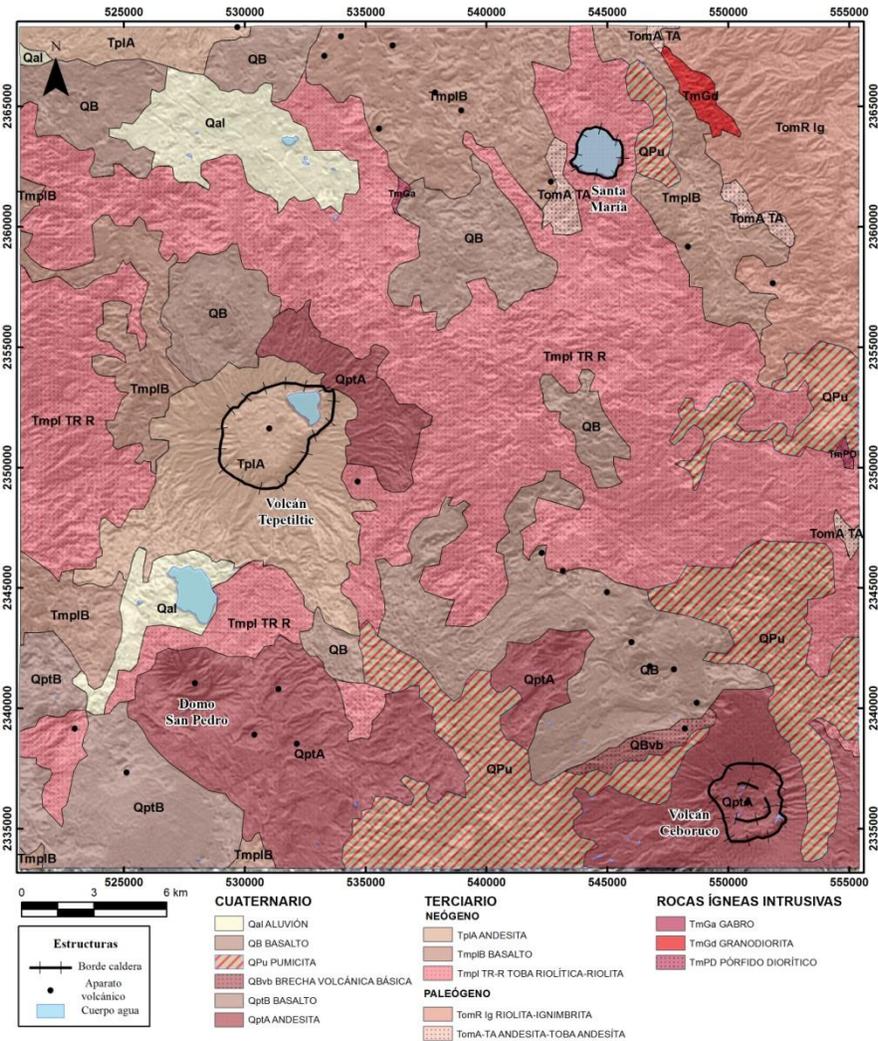


Figura 3.2 – La imagen muestra la geología del área de estudio. (Modificada de la carta geológica minera F13-8 GM 1:250000 del Servicio Geológico Mexicano).

4. METODOLOGÍA

4.1 Fundamentos de Percepción Remota

4.1.1 Definición

La percepción remota es la práctica de adquirir información sobre las superficies de tierra y agua de la Tierra a partir de mediciones efectuadas con instrumentos a una distancia sin llegar a estar en contacto con ellas utilizando la radiación electromagnética reflejada o emitida por la superficie terrestre (Campbell, 2002).

4.1.2 Desarrollo histórico

El concepto de percepción remota fue desarrollado con la invención de la fotografía usando una cámara en el Siglo XIX, y la astronomía fue uno de los primeros campos en utilizar esta técnica. Avionetas planeadoras fueron usadas durante la Guerra Civil Americana para adquirir información a partir de sensores remotos usando fotografías aéreas para el movimiento de tropas y soldados. Éstas tuvieron desarrollo en los años intermedios a las dos guerras mundiales, aplicadas a la agricultura e ingeniería civil. Durante la segunda Guerra Mundial (1939-1945), el empleo del espectro electromagnético fue ampliamente utilizado, tanto las regiones del visible, del infrarrojo y las microondas.

Evelyn Pruitt, científica que trabajaba para la *U.S. Navy's Office of Naval Research* acuñó el término de *remote sensing* (en Campbell *et al.*, 2011) cuando reconoció que el término de fotografía aérea no era lo suficientemente preciso para describir las muchas formas de adquisición de imágenes usando radiación fuera de la región del espectro visible, y fue a principios de la década de 1960 la Administración Aeronáutica y Espacial Nacional de Estados Unidos (NASA) estableció un programa de investigación en percepción remota para apoyar la investigación de la observación con sensores remotos en instituciones de Estados Unidos.

La nueva era de la percepción remota se encaminó hacia satélites para reconocimiento militar, vuelos espaciales tripulados, satélites meteorológicos y satélites de recursos terrestres. Los programas de vuelos espaciales tripulados se iniciaron en 1961 por

EE.UU., lo que resulta en el primer aterrizaje lunar en 1969. El primer satélite espacial dedicado al manejo de los recursos fue lanzado en 1972. Este fue nombrado como ERTS-1 (*Earth Resources Technology Satellite*), y fue muy adecuado para fines agrícolas. Estos satélites son ahora conocidos como Landsat (*land satellite*). Estos satélites se orientaron a adquirir datos de la superficie de la Tierra de forma sistemática y repetitiva en una base multiespectral.

Esta disponibilidad sistemática de datos digitales en un formato estándar creó el contexto que permitió el crecimiento de la popularidad de análisis digital y sentó las bases para el desarrollo de software para su manipulación, así como un mejor diseño de instrumentos mecánicos que llevo a la mejora en la precisión y en la realización de la adquisición, procesamiento, producción y distribución de los datos de percepción remota. De esta manera el programa Landsat fungió como modelo para el desarrollo de otros satélites de observación de la Tierra diseñados y operados por diversas organizaciones en todo el mundo (Campbell *et al.*, 2011). De los más destacados se encuentra el primer satélite de percepción remota con radar (SEASAT) lanzado en 1978. El primero de la serie de SPOT con capacidades estereoscópicas, se puso en marcha en 1985 por Francia. El primer satélite de percepción remota de la India fue lanzado en 1988, y fue nombrado como IRS (*Indian Remote Sensing*). Japón también lanzó su propio satélite de recursos terrestres (JERS) y el satélite de observación marina (MOS). El consorcio europeo ha lanzado satélites de radar ERS (*European Radar Satellite*) en 1991 y en 1995, el (RADARSAT) por Canadá en 1995 (Chandra & Ghosh, 2006).

A principios de 1980 surgió una segunda generación de instrumentos para la adquisición de información con sensores remotos con un mayor detalle en la resolución espacial (10 a 30 m) y para la década de 1990 hasta una resolución de metros, desarrollando las capacidades comerciales (por ejemplo, GeoEye e IKONOS) para la adquisición de imágenes de satélite con resolución espacial fina a subdetalle, esto ha abierto nuevas aplicaciones en distintos campos de investigación.

4.1.3 Panorama del proceso de percepción remota

Es posible utilizar esta herramienta para recopilar datos y transformarlos en información distribuida espacialmente, utilizando técnicas de procesamiento e interpretación de

imágenes y los métodos apropiados para conseguirlo. Esta técnica incluye una secuencia de procedimientos en los que de manera general primero se plantea el problema a resolver, luego se obtienen los datos requeridos, después se realizan una serie de procedimientos que incluyen el análisis estadístico, el pre procesamiento radiométrico y geométrico, el procesamiento digital y la interpretación de las imágenes que registran la interacción entre la energía electromagnética y la materia, por último se presenta la información obtenida del análisis para la toma de decisiones con base en los datos procesados (Fig. 4.1).

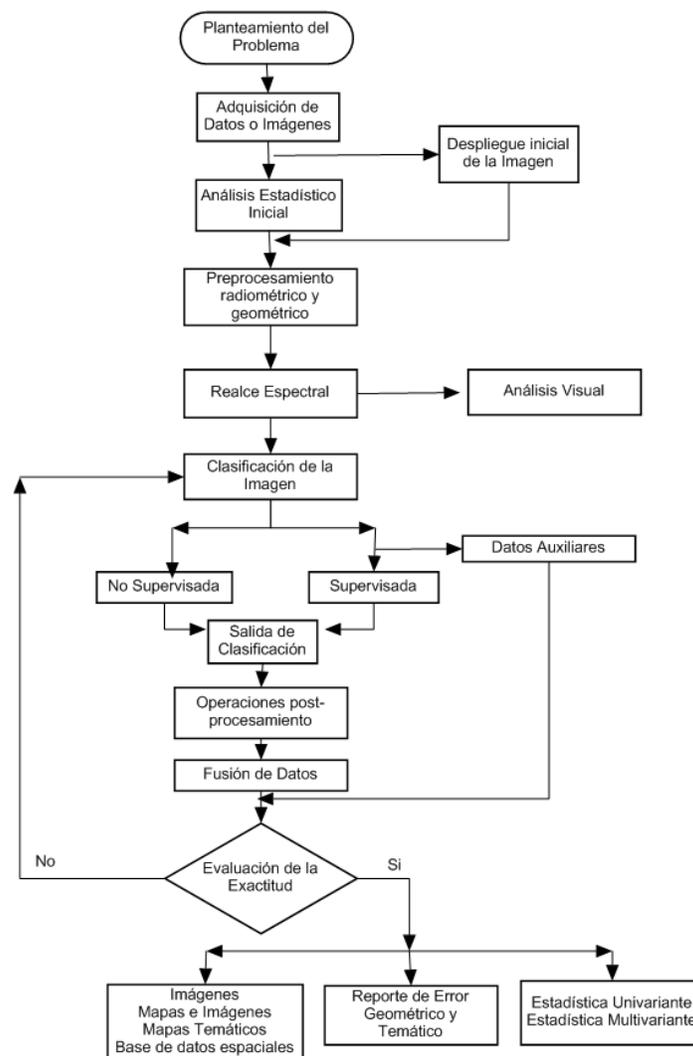


Figura 4.1 - Flujo general o método por el cual se analizan y procesan los datos digitales de sensores remotos (modificado de Campbell, 2002).

4.1.4 Fuente de energía y principio de radiación electromagnética

La energía electromagnética es generada por muchos mecanismos, incluyendo cambios en los niveles de energía de los electrones, aceleración de las cargas eléctricas, decaimiento radiactivo de las sustancias y el movimiento térmico de átomos y moléculas.

Las ráfagas solares son un fenómeno originado en la superficie del Sol, que involucra la producción de radiación electromagnética (en adelante REM) junto con la expulsión y aceleración de partículas cargadas. Las cuales ocurren cuando la energía almacenada en el campo magnético solar es liberada súbitamente y emitida hacia el espacio. Estas reacciones nucleares dentro del sol producen REM en todos los rangos del espectro electromagnético, la cual se transmite a través del espacio sin experimentar grandes cambios.

La radiación electromagnética consiste de un campo eléctrico E que varía en magnitud en una dirección perpendicular a la dirección en la cual la radiación está viajando, y un campo magnético H orientado en ángulo recto al campo eléctrico. La REM es la radiación emitida, transmitida y propagada en un medio y puede ser modelada por ondas o por el transporte de fotones (Chandra & Ghosh, 2006) (Fig. 4.2). Dos características de la REM son particularmente importantes en percepción remota, éstas son la longitud de onda y la frecuencia.

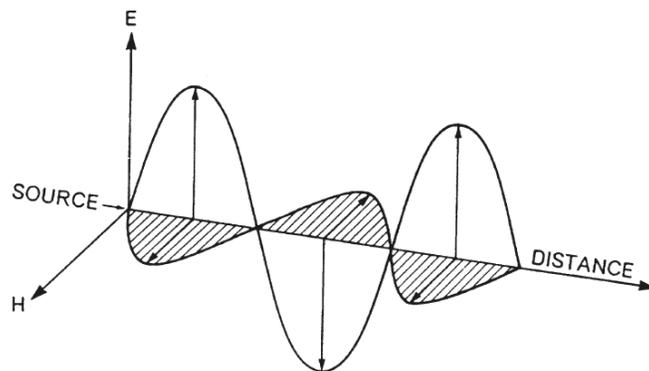


Figura 4.2 – Representación de las componentes de la radiación electromagnética el campo eléctrico (E) y magnético (H). Estas componentes están orientadas en ángulos rectos entre sí y varían a lo largo de un eje perpendicular al eje de propagación (tomada de Campbell *et al.*, 2011).

La longitud de onda es la longitud de un ciclo de onda, la cual puede ser medida como la distancia entre las crestas sucesivas de la onda, usualmente se representa con la letra griega lambda (λ). La longitud de onda se mide en metros (m) o algún factor de metros tal como nanómetros ($nm, 10^{-9} \text{ metros}$), micrómetros ($\mu m, 10^{-6} \text{ metros}$) o centímetros ($cm, 10^{-2} \text{ metros}$). La frecuencia se refiere al número de ciclos de una onda que pasa por un punto fijo por unidad de tiempo, es decir la frecuencia con que las ondas vibran por segundo, está se mide normalmente en (Hz), equivalente a un ciclo por segundo. La relación entre la longitud de onda y la frecuencia se muestra en la ecuación 4.1:

$$\text{Ec. 4.1} \quad c = \lambda \nu$$

Donde:

$$\begin{aligned} \lambda &= \text{longitud de onda (m)} \\ \nu &= \text{frecuencia (ciclos por segundo, Hz)} \\ c &= \text{velocidad de la luz (} 3 \times 10^8 \text{ m/s)} \end{aligned}$$

Por lo tanto, las dos están inversamente relacionadas una de otra. Cuanto más corta es la longitud de onda, mayor es la frecuencia y cuanto mayor sea la longitud de onda, menor será la frecuencia.

Los sensores remotos suelen registrar la radiación electromagnética que viaja a una velocidad de $\sim 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ de la fuente, directamente a través del espacio o indirectamente por reflexión de la radiación hasta el sensor. La REM representa un enlace de comunicaciones de alta velocidad entre el sensor y los fenómenos situados a gran distancia. Los cambios en la cantidad y propiedades de la REM llegan a ser, tras su detección, una valiosa fuente de datos para interpretar las propiedades importantes de los fenómenos con los que interactúan (Jensen, 1996).

4.1.5 Espectro Electromagnético

Las ondas electromagnéticas tienen una clasificación basada en la localización de su longitud de onda dentro de un espectro electromagnético (Fig. 4.3). La mayoría de las divisiones del espectro electromagnético son en esencia definidas arbitrariamente. En un espectro completo de la energía solar no hay cortes bruscos en las divisiones como se indica en la Figura 3.3. Las subdivisiones son establecidas por conveniencia y por la

interacción conocida de las ondas de REM con las sustancias. El espectro electromagnético se extiende desde los rayos cósmicos a longitudes de onda corta y las radiofrecuencias bajas a longitudes de onda larga (Campbell *et al.*, 2011; Jensen, 1996).

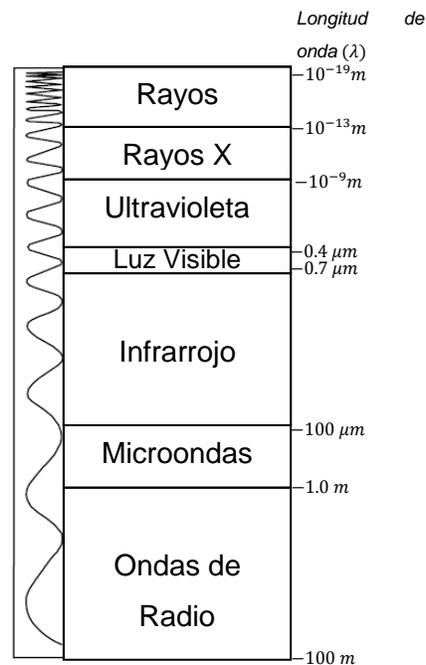


Figura 4.3 – Espectro electromagnético. Las longitudes de onda corta están representadas en la parte superior, y las longitudes de onda larga en la parte inferior.

Dos importantes categorías son el espectro óptico de $0,30 \mu m$ a $15 \mu m$ la cual define las longitudes de onda que pueden ser reflejadas y refractadas con lentes y espejos. La segunda categoría se refiere al espectro reflectivo que se extiende desde $0,38 \mu m$ a $3,0 \mu m$, este define la porción del espectro solar usado directamente por percepción remota (Campbell, 2002).

4.1.5.1 Espectro visible

Aunque el espectro visible constituye una pequeña porción del espectro electromagnético, este tiene una obvia importancia en la percepción remota. Debido a que los límites del visible son definidos por la sensibilidad de nuestro sistema visual.

Las propiedades ópticas de la radiación visible fueron primeramente investigadas por Isaac Newton (1641-1727), quien durante 1665 y 1666 condujo experimentos para revelar que la luz visible puede ser dividida usando prismas, o en su tiempo rejillas de difracción, dentro de secciones. Ahora se sabe que estos segmentos son los colores primarios aditivos, delimitados aproximadamente de 0,4 a 0,5 μm (azul); 0,5 a 0,6 μm (verde) y 0,6 a 0,7 μm (rojo).

Colores Primarios

Los colores primarios se definen tal que un solo color pueda ser formado de una mezcla de otros dos y que todos los otros colores se puedan formar mediante la mezcla de los tres colores primarios en proporciones apropiadas (rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, cian, violeta). Proporciones iguales de los tres colores primarios aditivos se combinan para formar la luz blanca. El color de un objeto se define por el color de luz que refleja. Los colores intermedios se forman cuando un objeto refleja dos o más de los colores primarios, los cuales combinados crean la sensación de “amarillo” (rojo y verde), “magenta” (rojo y azul), “cian” (verde y azul).

Los tres colores primarios sustractivos absorben una tercera parte del espectro visible, el amarillo absorbe en el azul (refleja en el rojo y verde), el cian absorbe en el rojo (refleja en el azul y verde) y el magenta absorbe en el verde (refleja en el rojo y azul). Los sustractivos definen los colores de los pigmentos y colorantes, la combinación de estos primarios se utiliza en la representación de los colores en las impresiones. Una mezcla de proporciones iguales de pigmentos de los tres primarios sustractivos produce negro (completa absorción del espectro visible).

4.1.5.2 Espectro infrarrojo

Las longitudes de onda mayores a la porción del rojo del espectro visible son designadas como la región del infrarrojo, descubierto en 1800 por el astrónomo británico William Herschel (1738-1822). Este segmento del espectro es relativamente largo comparado a la región del visible, va de 0,72 μm a 15,0 μm , por lo que es 40 veces más el ancho del visible.

Dos importantes categorías pueden ser reconocidas. La primera consiste en la radiación del infrarrojo cercano y del infrarrojo medio debida a la radiación del sol reflejada de la superficie terrestre, estas son más cercanas a la región del visible. La segunda categoría es la radiación del infrarrojo lejano emitida por la Tierra, este consiste en longitudes de onda muy alejadas del visible, extendiéndose dentro de las regiones cercanas a la región de las microondas.

4.1.6 Leyes de la radiación

La propagación de la energía electromagnética sigue ciertas leyes físicas. Algunas de ellas son mencionadas a continuación.

- 1) Newton mantenía que la luz es un flujo de partículas minúsculas (“*corpuscles*”) que viajan en líneas rectas. Esta noción es consistente con la teoría moderna de Max Planck (1858-1947) y Albert Einstein (1879-1955). Planck descubrió que la energía electromagnética es absorbida y emitida en unidades discretas llamadas “quanto o fotones”. El tamaño de cada unidad es directamente proporcional a la frecuencia de la energía radiada. Planck definió una constante (h) para relacionar la frecuencia (ν) con la energía radiada (Q):

$$Ec. 4.2 \quad Q = h\nu$$

La ecuación 4.2 explica el efecto fotoeléctrico, esto es la generación de corrientes eléctricas por la exposición de ciertas sustancias a la luz, como el efecto de impacto de estas unidades discretas de energía (quanto) sobre superficies de ciertos metales causando la emisión de electrones (Campbell *et al.*, 2011).

- 2) Ley de Stefan-Boltzman define la relación entre la radiación emitida total (W) y la temperatura (K). Para la cual la radiación total emitida por un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta.

$$Ec. 4.3 \quad W = \sigma T^4$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann con un valor de $5,6697 \times 10^{-8} [W m^{-2} K^{-4}]$, la cual define una unidad de tiempo y una unidad de área.

En esencia, esta ley establece que cuerpos negros calientes emiten más energía por unidad de área que cuerpos negros fríos (Campbell *et al.*, 2011).

- 3) Ley de Kirchhoff establece que todos los objetos emiten radiación electromagnética, excepto aquellos que se encuentren en el cero absoluto, es decir, todos los objetos con temperaturas por encima del cero absoluto tienen temperatura y emiten energía. La cantidad de energía y la longitud de onda en las cuales ésta es emitida dependen de la cantidad de temperatura del objeto. Conforme la temperatura de un objeto aumenta, la cantidad total de energía emitida también incrementa, y el máximo de longitud de onda emitida llega a ser más corto. Estas relaciones pueden ser expresadas formalmente usando el concepto de cuerpo negro de modo que la relación de la radiación emitida por/hacia/ el flujo de radiación absorbida es el mismo para todos los cuerpos negros a la misma temperatura (Campbell *et al.*, 2011).

Un cuerpo negro es una fuente de energía hipotética que se comporta de una manera idealizada, absorbe toda la radiación incidente, y no refleja nada, emite energía con una eficiencia perfecta, su eficacia como radiador de energía varía solamente con variaciones de temperatura. En la naturaleza, todos los objetos tienen emisividad que cae entre los extremos “cuerpos grises”. Para estos objetos, la emisividad (ε) es una medición útil de la eficiencia radiada de REM y se define como la relación entre la emitancia M de un objeto dado y un cuerpo negro a la misma temperatura M_b (Campbell *et al.*, 2011).

$$Ec. 4.4 \quad \varepsilon = \frac{M}{M_b}$$

La emisividad de un verdadero cuerpo negro es uno, y la de un perfecto reflector o cuerpo blanco es cero.

- 4) Ley del desplazamiento de Wien especifica la relación entre la longitud de onda de la radiación emitida y la temperatura del cuerpo negro.

$$Ec. 4.5 \quad \lambda = 2897.8/T$$

Donde λ es la longitud de onda a la cual la radiancia es máxima y T es la temperatura absoluta. Conforme los cuerpos negros lleguen a calentarse, la longitud de onda de máxima emitancia se desplaza hacia longitudes de onda corta.

La radiancia registra el brillo de la radiación reflejada por la superficie de la Tierra, medido en unidades físicas como el brillo (*watts*) por intervalo de longitud de onda (μm) por unidad angular por metro cuadrado de la cual fue reflejada, como valores reales. Se aplica, por ejemplo en la comparación de áreas de la misma superficie adquiridas para diferentes tiempos (Campbell *et al.*, 2011).

4.1.7 Interacción de la radiación

4.1.7.1 Interacción con la atmósfera

Cuando la radiación electromagnética generada por el sol se aproxima a la Tierra, esta interactúa con el estrato más alejado de la atmósfera, la ionósfera, situada aproximadamente entre los 50 y 1000 *km* de altura, antes de alcanzar la superficie terrestre, esta es sujeta a modificaciones por algunos procesos físicos incluyendo la dispersión, la absorción y la refracción. Por lo que una parte es reflejada hacia arriba de la superficie de la Tierra y otra parte es absorbida por la superficie terrestre que luego es nuevamente radiada como energía térmica, por lo que la radiación en forma de ondas electromagnéticas es el tercer mecanismo de transmisión de calor.

A. Dispersión

Es la redirección de la REM por partículas suspendidas en la atmósfera o por las partículas de los gases que componen la atmósfera, de modo que una porción de haz solar entrante se dirige de nuevo hacia el espacio, así como hacia la superficie de la Tierra. La cantidad de dispersión que ocurre depende del tamaño de estas partículas, su abundancia, la longitud de onda de la radiación y la profundidad de la atmósfera en la cual la energía está viajando (Fig. 4.4). Lord J. W. S. Rayleigh (1824-1919) demostró que la cantidad de dispersión de la luz aumenta en gran medida como la longitud de onda se hace más corta.

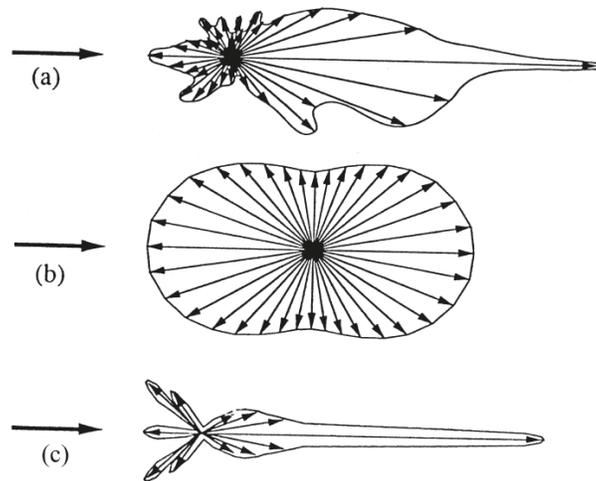


Figura 4.4 – La imagen muestra el comportamiento de la dispersión de tres tipos de partículas atmosféricas: a) Partículas de polvo y humo de forma irregular, estas dispersan la energía formando un pico hacia adelante. b) Moléculas que muestran simetrías parecidas. c) Gotas grandes de agua dispersan la energía formando un pico hacia adelante (Campbell *et al.*, 2011).

a) Dispersión Rayleigh

Ocurre cuando las partículas de la atmósfera tienen diámetros que son relativamente más pequeños que la longitud de onda de la radiación. Estas partículas tienen diámetros que son tan pequeños como la longitud de onda de la radiación en el visible y del infrarrojo cercano. La Ley de Rayleigh establece que esta forma de dispersión es proporcional a la inversa de la cuarta potencia de la longitud de onda.

b) Dispersión Mie

Es causada por partículas gruesas como el polvo, el polen, el humo “smoke” y gotas de agua que tienen diámetros que son muy aproximados a la longitud de onda de la radiación dispersada. Esta dispersión puede influir en un amplio rango de longitudes de onda, dentro y cerca del espectro visible.

c) Dispersión no selectiva

Es causada por partículas que son mucho más largas que la longitud de onda de la radiación dispersada. Para radiación dentro y fuera del espectro visible, las partículas

pueden ser grandes gotas de agua o grandes partículas de polvo de avión. 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.

B. Absorción

La absorción de la radiación ocurre cuando la atmósfera evita o atenúa fuertemente la transmisión de la radiación a través de la atmósfera. El Ozono O_3 , el Dióxido de Carbono CO_2 y el vapor de agua H_2O , son los tres gases responsables de la mayor absorción de radiación solar. El Ozono juega un papel importante en el balance de la Tierra, debido a que absorbe las longitudes de onda corta en la porción del espectro Ultravioleta.

a) Ventanas atmosféricas

Los gases que se encuentran en la atmósfera, juntos forman una importante barrera para la transmisión de la REM a través de la atmósfera. La transmisión selectiva de ciertas longitudes de onda que se transmiten relativamente fácil a través de la atmósfera se les denomina ventanas atmosféricas (Tabla 5). Su posición, extensión y eficacia son determinadas por la absorción espectral de los gases en la atmósfera. Las longitudes de onda dentro de la ventana atmosférica son utilizadas en percepción remota para formar imágenes (Campbell *et al.*, 2011).

Tabla 5. Mayores ventanas atmosféricas. (Tomada de Campbell *et al.*, 2011).

Región	Rango
Ultravioleta y visible	0.30 – 0.75 μm 0.77 – 0.91 μm
Infrarrojo cercano	1.55 – 1.75 μm 2.05 – 2.4 μm
Infrarrojo térmico	8.0 – 9.2 μm 10.2 – 12.4 μm
Microondas	7.5 – 11.5 mm >20.0 mm

C. Refracción

Es la flexión de los rayos de luz que hacen contacto entre dos medios que transmiten luz (Fig. 3.5). Esto ocurre en la atmósfera cuando pasa la luz a través de las capas de la atmósfera de variada claridad, humedad y temperatura. Estas variaciones influyen en la densidad de las capas de la atmósfera, las cuales causan una flexión de los rayos de luz cuando pasan de una capa a otra (Campbell *et al.*, 2011). El ángulo que define la trayectoria del rayo flexionado está dado por la Ley de Snell descrita por la ecuación 2.6:

$$\text{Ec. 4.6} \quad n \text{sen} \theta = n' \text{sen} \theta'$$

Donde n y n' son los índices de refracción del primer y segundo medio, respectivamente, θ y θ' son ángulos medios con respecto a la superficie normal.

Asumiendo un medio uniforme, cuando la luz pasa dentro de un medio denso, este es flexionado hacia la superficie normal como una línea perpendicular hacia la superficie, punto donde el rayo de luz entra al medio denso.

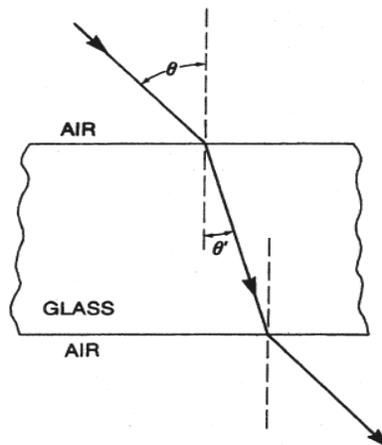


Figura 4.5 – Refracción. Este diagrama representa la trayectoria de un rayo de luz que pasa a través de un medio (aire) a otro (vidrio) y de nuevo al primer medio (tomada de Campbell *et al.*, 2011).

4.1.7.2 Interacción con la superficie

Cuando la radiación electromagnética alcanza la superficie de la Tierra, esta es absorbida, reflejada o transmitida. Las proporciones representadas para cada proceso dependen de la naturaleza de la superficie, de la longitud de onda de la radiación y del ángulo de iluminación.

A. Reflexión

La reflexión ocurre cuando un rayo de luz se redirige al chocar con una superficie no transparente. La naturaleza de la reflexión depende del tamaño de las irregularidades de la superficie (rugosa o lisa) en relación con la longitud de onda de la radiación considerada.

a) Reflexión Especular

Si la superficie es lisa en relación a la longitud de onda, ocurre una reflexión especular. Esta redirige toda o casi toda la radiación incidente en una sola dirección. En tales superficies el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión (Fig. 4.6 a). Para la radiación del visible la reflexión especular puede ocurrir con superficies como espejos, metales lisos o cuerpos de agua calmada.

b) Reflexión Difusa

Ocurre cuando la energía incidente se dispersa más o menos igual en todas las direcciones (Fig. 4.6 b). Para la radiación en el visible muchas superficies de la naturaleza pueden ser ejemplos de reflectores difusos, como el pasto uniforme, pero un perfecto reflector difuso es la superficie *Lambertian*, la cual establece que la radiación percibida de una perfecta superficie difusa no cambia con el ángulo con que se observa. Este concepto es derivado de la Ley de Lambert de la iluminación, por Johann H. Lambert (1728-1777), quien condujo muchos experimentos designados para describir el comportamiento de la luz.

c) Reflexión Bidireccional

La Función de Distribución Bidireccional de Reflexión. Conocida por sus siglas en inglés como BRDF (*bidirectional reflectance distribution function*). Es “bidireccional” en el sentido de que se representa tanto para el ángulo de iluminación y el ángulo de observación. Se aplica para las superficies que presentan patrones complejos de reflexión determinados por detalles de la geometría de la superficie (por ejemplo, tamaño, forma y orientación de la vegetación viva). La BRDF es una descripción matemática del comportamiento óptico de una superficie con respecto a ángulos de iluminación y observación, dado que estos han sido iluminados con un haz paralelo de luz con un azimut y elevación específica. La descripción de superficies BRDF reales, en lugar de superficies idealizadas, permite la evaluación de los grados a los que ellos se aproximan a las superficies ideales de superficies especulares y difusas.

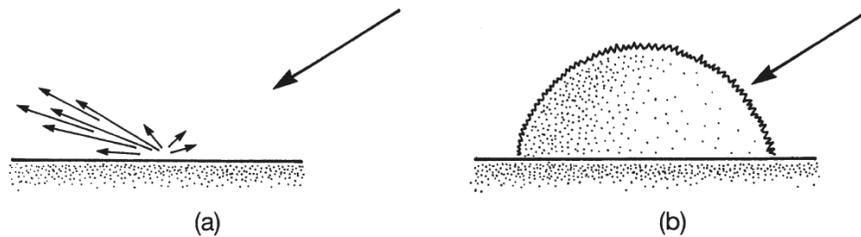


Figura 4.6 – a) Muestra la reflexión especular y b) representa la reflexión difusa (tomada de Campbell *et al*, 2011).

d) Reflectancia

Se expresa como la brillantez relativa de una superficie según se mida durante un intervalo específico de longitud de onda.

$$Ec. 4.7 \quad \text{Reflectancia} = \frac{\text{Brillantez observada}}{\text{Irradiancia}}$$

El cociente de la ecuación 2.7 entre la energía reflejada sobre la energía incidente resulta en un número adimensional entre cero y uno, pero comúnmente se expresa como un porcentaje tal como la ecuación 2.8.

$$Ec. 4.8 \quad \rho(\lambda) = [E_R(\lambda)/E_I(\lambda)]x100$$

Donde:

$\rho(\lambda)$ Es la reflectancia espectral en una longitud de onda particular.

$E_R(\lambda)$ Es la energía en la longitud de onda reflejada desde el objeto.

$E_I(\lambda)$ Es la energía de la longitud de onda incidente sobre el objeto.

En la práctica usual de la percepción remota, la reflectancia no se puede medir directamente, ya que normalmente se presenta sólo la brillantes observada y se debe calcular la irradiancia.

B. Transmisión

La transmisión de la radiación ocurre cuando esta pasa a través de una sustancia sin atenuarse significativamente.

a) Transmitancia

Dado un espesor o profundidad de una sustancia, la capacidad de un medio para transmitir energía se mide como transmitancia.

$$Ec. 4.9 \quad \text{Transmitancia} = \frac{\text{Radiación transmitida}}{\text{Radiación incidente}}$$

En el campo de la percepción remota, la transmitancia de cámaras o filtros es muy importante con respecto a materiales de origen natural, con frecuencia se piensa que sólo los cuerpos de agua son capaces de transmitir grandes cantidades de radiación. Sin embargo, la transmitancia de muchos materiales varía bastante con las longitudes de onda, por lo que las observaciones directas en el espectro visible no se transfieren a otras partes del espectro. Por ejemplo, las hojas de las plantas son generalmente opacas a la radiación visible pero reflejan cantidades significativas de radiación en el infrarrojo (Campbell *et al*, 2011).

4.1.7.3 Interacción con los objetos físicos

La percepción remota consiste en el estudio de la radiación emitida y reflejada de las características físicas de la superficie de la Tierra. Depende de la observación de las diferencias espectrales de la radiación reflejada o emitida de los rasgos característicos de interés.

Una premisa fundamental en la percepción remota es que se puede aprender acerca de los objetos y sus características sobre la superficie de la Tierra por medio del estudio de la radiación reflejada, absorbida y / o emitida por estas características (Campbell *et al.*, 2011). Los objetos de interés para este estudio son la vegetación y minerales producto de alteración hidrotermal como óxidos de hierro e hidroxilos.

Firma Espectral

Usando cámaras y otros instrumentos de percepción remota, es posible observar la incidencia de radiación electromagnética sobre los objetos físicos como una red de distribución de radiación reflejada, emitida y absorbida en un rango de longitudes de onda, un paquete de tales observaciones o mediciones constituyen un patrón de respuesta espectral, algunas veces llamada firma espectral de un objeto. El patrón de respuesta de cada objeto posee características espectrales únicas con las cuales se pueden categorizar e identificar el material de tales objetos, esto se debe a que los átomos y las moléculas absorben energía en función de sus estructuras atómicas y por lo tanto, cada material tendrá una firma espectral única.

Propiedades espectrales de minerales y vegetación

Minerales secundarios como óxidos de hierro, hidroxilos, arcillas y carbonatos tienen rasgos de absorción de radiación electromagnética característicos en el rango del visible e infrarrojo cercano (VNIR, por sus siglas en inglés) y el infrarrojo de onda corta (SWIR, por sus siglas en inglés) respectivamente, porque estas regiones del espectro son muy sensibles a vibraciones de enlaces de moléculas y radicales que están dentro de estructuras cristalinas de minerales, principalmente los hidroxilos (OH), el enlace entre el catión y el hidroxilo (AlOH, Fe₂OH, MgOH), también el agua estructural (H₂O), el amonio

(NH_4^+) y los carbonatos (CO_3). Estos grupos de minerales pueden ser identificados a través de sus firmas espectrales (Crosta & Moore, 1989; Fraser, S. J., 1991; Loughlin, 1991; Ruiz-Armenta *et al.*, 1998; Fernández *et al.*, 2001).

La cobertura de vegetación muestra características de absorción de 0,45 a 0,68 μm y alta reflectancia en el infrarrojo cercano entre 1,6 y 2,2 μm , ambos son debido al contenido de clorofila en las hojas. Los rasgos de absorción observados cerca de 1,4 y 1,9 μm por la vegetación están relacionados al contenido de agua (Fig. 4.7). Estas características de absorción del agua son también observados en el espectro de los minerales que contienen H_2O o OH^- en su estructura cristalina (Ruiz-Armenta & Prol-Ledesma, 1998; Fernández *et al.*, 2001).

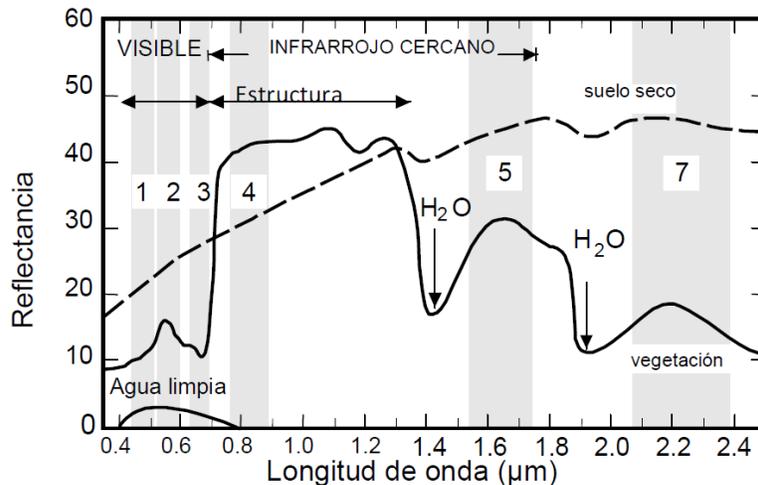


Figura 4.7 – La imagen muestra el comportamiento de la vegetación, suelo seco y agua limpia a la incidencia de la radiación electromagnética en las bandas TM (tomado de Drury, 2001).

Los óxidos de hierro y la vegetación tienen reflectancia similar en la banda 1 del sensor TM (0,45-0,52 μm) y la banda 2 del sensor TM de Landsat (0,52-0,60 μm) por lo tanto estas bandas no son utilizadas para la separación de dichos materiales. En la Figura 3.7 se observa que la región del espectro cubierta por la banda 3 TM (0,63-0,69 μm) muestra una alta reflectancia para óxidos de hierro y una fuerte absorción para la vegetación, esta característica puede ser usada para diferenciar óxidos de vegetación (Ruiz-Armenta & Prol-Ledesma, 1998).

La firma espectral de algunos óxidos, como la jarosita muestra rasgos de absorción bien definidos en 0,43 μm y 0,92 μm , la hematita tiene una reflectancia mínima en 0,85 μm y la goethita cerca de 0,94 μm (Hunt & Ashley, 1979) (Fig. 4.8).

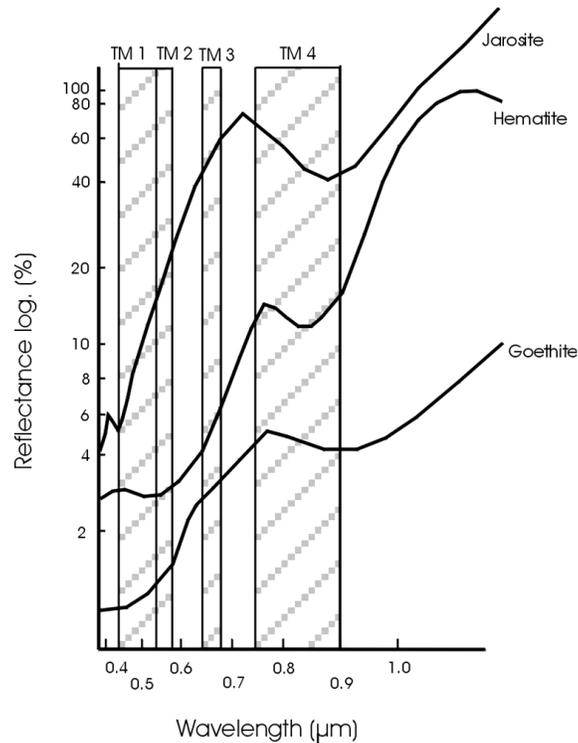


Figura 4.8 – Curvas del patrón de respuesta espectral de óxidos de hierro (tomada de Fernández *et al.*, 2001).

En los hidroxilos se encuentran minerales como: alunita, yeso, talco, clorita, pirofillita, caolín, muscovita, montmorillonita e illita, los cuales son formados a partir de una reacción de descomposición química que involucra la descomposición del agua llamada hidrólisis (Fig. 4.9) (Ruiz-Armenta & Prol-Ledesma, 1998).

Los hidroxilos también pueden ser identificados utilizando el sensor TM de Landsat, por las características espectrales que presentan: un alto porcentaje de reflectancia en la banda cinco del sensor TM y una alta reflectancia en la banda siete del sensor TM. Las bandas TM 5 y TM 7 corresponden a la parte del infrarrojo medio en el espectro electromagnético.

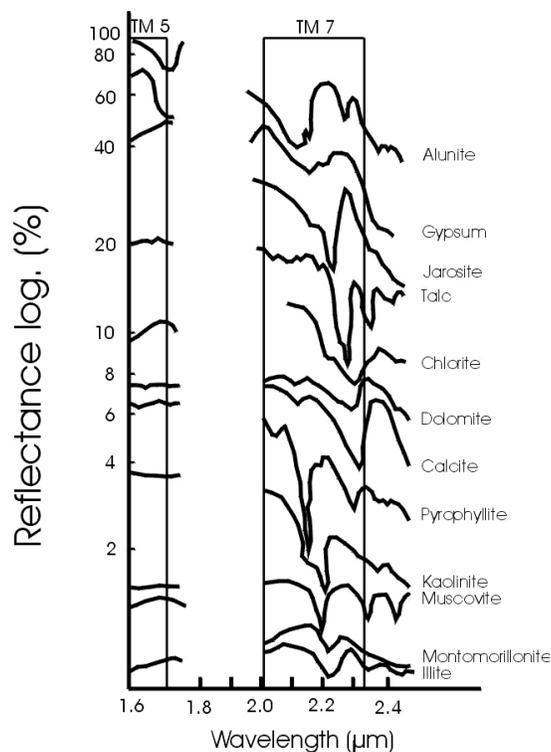


Figura 4.9 – Reflectancia espectral de minerales arcillosos, filosilicatos, carbonatos y sulfatos (tomada de Tomada de Fernández *et al.*, 2001).

En la Tabla 6 se muestran algunos rasgos característicos de absorción y de reflectancia de vegetación, óxidos e hidroxilos.

Tabla 6. Características espectrales para vegetación, óxidos e hidroxilos del sensor TM (Ruiz-Armenta & Prol-Ledesma, 1995).

Materiales	Reflectancia	Absorción
Vegetación	TM4*, TM2, TM5 y TM7	TM3 y TM1
Hematita	TM3	TM2* y TM1
Goethita	TM3* y TM2	TM1
Jarosita	TM3*, TM2 y TM1	
Minerales arcillosos, carbonatos, filosilicatos y sulfatos.	TM5*	TM7*
*Bandas con los rasgos espectrales más característicos.		

Las bandas del sensor Thematic Mapper son demasiado anchas para identificar minerales aislados, sin embargo estas sirven para identificar grupos de minerales para propósitos de exploración de recursos minerales en el espectro visible e infrarrojo de las rocas con alteración hidrotermal (Hunt, 1977, 1979; Hunt & Ashley, 1979; Crosta & Moore, 1989; Fraser, S. J., 1991; Loughlin, 1991; Ruiz-Armenta *et al.*, 1998; Fernández *et al.*, 2001).

4.1.8 Sistema de percepción remota

La instrumentación de la percepción remota actúa como un sistema cuya función es captar la energía procedente de la superficie terrestre, codificarla y registrarla o enviarla directamente al sistema de recepción donde está disponible para el usuario (Fig. 4.10).

Este modelo de percepción remota usa principalmente energía en las partes del visible y del infrarrojo cercano del espectro. Las variables clave incluyen la claridad atmosférica, las propiedades espectrales de los objetos, el ángulo y la intensidad del haz de luz solar, las opciones de cámaras y filtros.

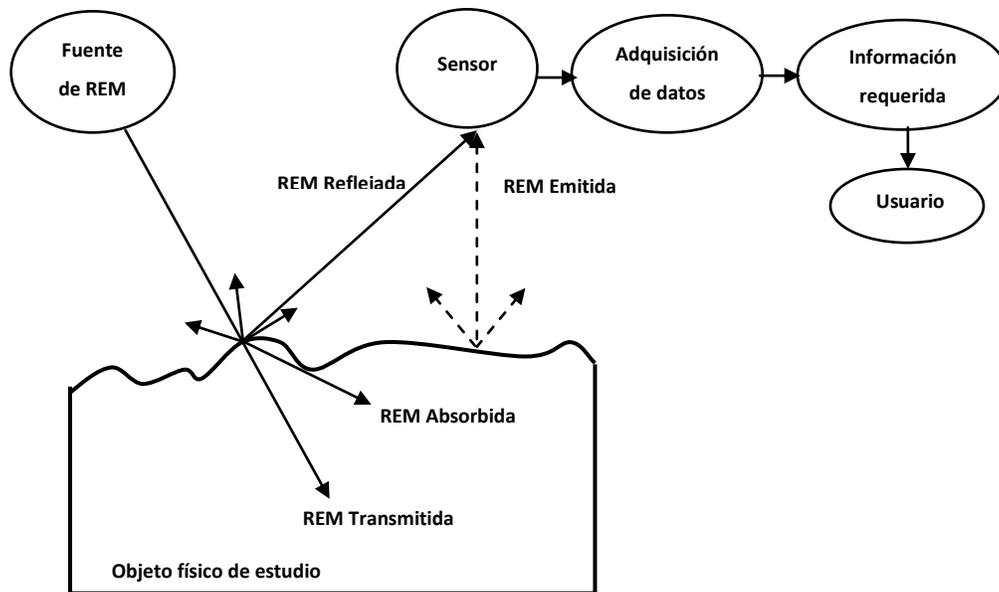


Figura 4.10 – La imagen muestra el sistema ideal de percepción remota (modificada de Chandra & Ghosh, 2006).

a) Fuente de energía electromagnética

El sol actúa como la principal fuente de energía que da origen a la radiación electromagnética.

b) Objeto físico de estudio

Los objetos físicos que se desean examinar son todos aquellos que se encuentren sobre la superficie terrestre, como edificios, cobertura vegetal, suelos, agua, etc.

c) Sensor y Plataforma

El equipo espacial está formado por una plataforma y un sensor, la primera es aquella en la que va acoplado el sensor, dos ejemplos son los satélites y los aviones; el segundo es el aparato que adquiere la información, es el dispositivo que registra la REM del sol, dispersada o emitida por los materiales de la superficie de la Tierra y la atmósfera. Estos sistemas pueden ser activos o pasivos.

Los sensores pasivos registran la ocurrencia natural de la radiación electromagnética que es reflejada o emitida por el material de interés. Los sensores activos tales como el radar o el sonar impregnan el terreno con energía electromagnética artificial y luego registran la cantidad de flujo radiante que vuelve al sistema del sensor. Estos sistemas de percepción remota pueden obtener dos tipos de datos, los analógicos (p.ej. fotos aéreas o video) y los digitales (p.ej. una matriz (raster) con valores de brillo obtenidos con un scanner) (Jensen, 1996).

o IFOV

El campo instantáneo de vista de un mecanismo de escaneo óptico, conocido por sus siglas en inglés como IFOV (*Instantaneous Field of View*) se refiere al área vista por el instrumento. Define las pequeñas áreas vistas por el escáner y establece un límite para el nivel de detalle espacial o resolución espacial que puede ser representado en una imagen digital.

- Orbitas de los satélites
 - La órbita Geoestacionaria es aquella en la que los satélites mantienen una posición constante con respecto a una región específica de la superficie de la Tierra.
 - Las órbitas sincronizadas con el sol están diseñadas para reducir las variaciones en iluminación moviendo sistemáticamente la trayectoria de la órbita de tal manera que se mueva hacia el oeste 360° cada año. De modo que un satélite puesto en este tipo de órbita observará cada parte de la Tierra dentro de su punto de vista al mismo tiempo que el sol local cada día. Ésta última característica es la diferencia con las órbitas inclinadas que no están sincronizadas con el sol.
- Satélite Landsat 5

El satélite Landsat 5 con el sensor Thematic Mapper (TM) fue lanzado dentro de una órbita repetitiva a sus predecesores, circular, sincrónica con el sol y cerca de los polos, al ecuador, tienen un ángulo de inclinación de 98.2° con respecto al ecuador. Tiene la capacidad de tomar imágenes de un punto de la superficie terrestre cada 16 días (resolución temporal), compuesto por 7 bandas con resolución espacial a 30 metros (para todas las bandas excepto la banda térmica la cual tiene una resolución de 120), la resolución radiométrica se realiza por una conversión análoga-digital sobre un rango de cuantificación de 256 números digitales lo que corresponde a 8 bits , las cuales pueden ser combinadas de distintas formas para obtener variadas composiciones de color u opciones de procesamiento (Jensen, 1996).

d) Adquisición de datos

Los sensores contienen arreglos de dos dimensiones de dispositivos de carga acoplada, conocidos por sus siglas en inglés como CCDs (*Charged-Coupled Devices*) que responden electrónicamente y linealmente al brillo sin necesidad de un movimiento mecánico, pueden ser colocados en el plano focal del sensor de tal manera que vean una delgada tira rectangular orientada en ángulo recto con la trayectoria de vuelo. El movimiento de avance del satélite mueve el campo de visión hacia adelante a lo largo de

la trayectoria de vuelo, construyendo una cobertura, este proceso se conoce como escaneó óptico de barrido (Fig. 4.11).

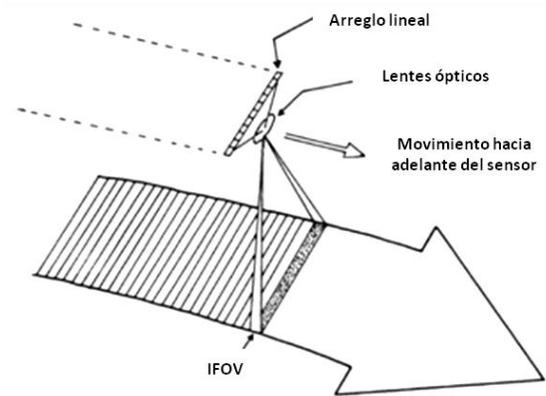


Figura 4.11 – Esquema de un arreglo lineal (modificado de Campbell *et al.*, 2011).

Los dispositivos de carga acoplada (en adelante CDD) son detectores compuestos por materiales sensibles a regiones selectas del espectro (incluyendo el visible e infrarrojo) incrustados en un chip de silicio (Fig. 4.12).

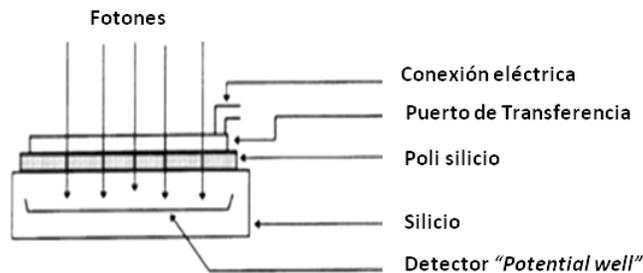


Figura 4.12 – Dispositivo de Carga Acoplada (CDDs) (modificado de Campbell *et al.*, 2011).

Cada detector dentro de un CDD recoge los fotones reflejados o emitidos de áreas individuales sobre el terreno (pixels "*picture elements*") que golpean su superficie y acumulan una carga proporcional a la intensidad de la radiación que recibe de la superficie terrestre. En un intervalo especificado, las cargas acumuladas para cada detector pasan a través de un puerto de transferencia, la cual controla el flujo de datos desde los detectores.

Los microcircuitos conectan los detectores dentro de un arreglo para formar registros de desplazamiento (*shift*). Estos registros permiten recibir las cargas para cada detector

dividiendo la radiación en varios segmentos en bandas espectrales distintas, cada una aporta información sobre el brillo de una región separada del espectro, para después ser pasado a elementos adyacentes, registrando temporalmente la información hasta que sea conveniente para transferir a otra parte del instrumento. A través de este proceso, la información leída desde el registro de desplazamiento se lee secuencialmente.

La corriente eléctrica proporcional a la intensidad de la radiación recibida de la superficie terrestre suministra una versión electrónica continua del brillo del terreno observado por el/los sensores, por lo tanto esta se encuentra en forma análoga. Para crear una versión digital, la señal eléctrica debe subdividirse en unidades distintas para crear los valores discretos necesarios para el análisis digital. Esto se lleva a cabo mediante el muestreo de la corriente en un intervalo uniforme de acuerdo al detalle espacial registrado por la imagen, proceso conocido como conversión análoga digital (AD) (Fig. 4.13). Debido a que los valores dentro de este intervalo se representan como un único promedio, todas las variaciones dentro de este intervalo se pierden.

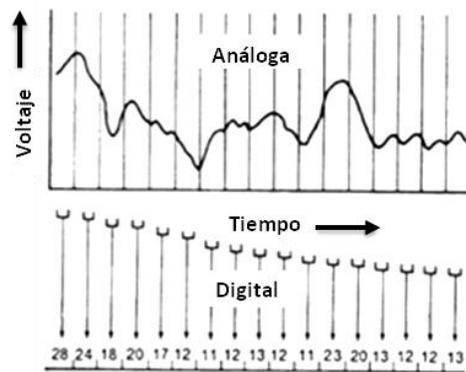


Figura 4.13 – Conversión Análoga-Digital (modificada de Campbell *et al.*, 2011).

Cada pixel representa el brillo línea por línea de una pequeña región sobre la superficie terrestre registrada digitalmente como un valor numérico discreto, conocido por sus siglas en inglés como DNs (*Digital Numbers*), a menudo con valores separados para cada una de las varias regiones del espectro electromagnético (Campbell *et al.*, 2011).

Cada valor digital (en adelante DN) se registra como una serie de valores binarios conocidos como bits. El sistema Landsat 5 registra 8 bits para cada valor digital, esto

significa que ocho lugares binarios están disponibles para registrar el brillo percibido para cada banda del sensor.

El nombre valor digital (DN) indica que no son valores reales de brillo (es decir, radiancia) de un cuadro del terreno sino que se escalan valores que representan brillo relativo dentro de un cuadro de terreno. El número de valores de brillo dentro de una imagen digital está determinado por el número de bits disponibles ($8 \text{ bits} = 2^8 = 0 - 255$ para cada pixel) que a su vez está determinado por el diseño del sistema especialmente la sensibilidad del sensor y de sus capacidades para el registro y transmisión de datos.

Los datos de la imagen desplegada se llevan a cabo en el “*Frame-Bufer*”, este es un largo segmento de la memoria de la computadora dedicado a la manipulación de los datos para su visualización. El *Frame-Bufer* proporciona uno o más bits para registrar el brillo de cada pixel que se muestra en pantalla (o plano de bits), así se genera el despliegue de la imagen, bit por bit en el *Frame-Bufer*.

Para la visualización real en la pantalla, el valor digital para cada pixel se convierte en una señal eléctrica que controla el brillo del pixel en la pantalla. Esto requiere una conversión digital analógica (DA) que traduce los DN a señales eléctricas continuas.

Por lo tanto una imagen digital está compuesta de una matriz de muchos miles de píxeles, cada uno demasiado pequeño como para ser resuelto individualmente por el ojo humano. Las imágenes a color se componen de varias de tales matrices de la misma área de terreno, cada uno representando el brillo en una región separada del espectro (Fig. 4.14).

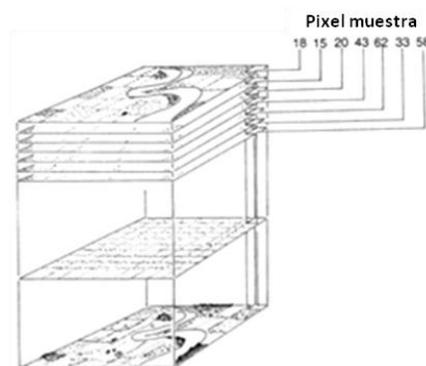


Figura 4.14 – Píxel multispectral (modificada de Campbell *et al.*, 2011).

e) Formato de datos

Los datos de los sensores son transmitidos en forma digital por señales de microondas hacia un sistema de recepción con estaciones terrestres equipadas para recibir los datos transmitidos por la plataforma, procesarlos y grabarlos en un formato apropiado para que el usuario final acceda a ellos.

Raster: En el análisis de imágenes digitales se utilizan estructuras de datos raster en la que cada imagen es tratada como un arreglo o matriz de valores, así cada pixel es tratado como una unidad independiente, la cual puede ser siempre localizada dentro de la imagen por sus coordenadas de fila y columna.

Vector: Se utiliza cuando no se quiere representar los pixeles individuales, es decir, como zonas de pixeles, tales como máscaras o zonas discretas. Este formato utiliza máscaras poligonales y sus límites como las unidades fundamentales para análisis y manipulación.

4.1.9 Resolución de instrumentos de percepción remota

La resolución o poder de resolución es la medida de la capacidad de un sistema óptico para distinguir entre señales que están espacialmente cerca o son espectralmente similares (Tabla 7). La resolución de una imagen tiene cuatro aspectos o tipos de resolución estos son:

Resolución espacial: Medida de menor separación angular o lineal entre dos objetos que pueden ser resueltas por el sensor.

Resolución espectral: Número y ancho de los intervalos de longitud de onda en el espectro electromagnético para el cual el sensor es sensible.

Resolución temporal: Es la frecuencia de obtención de imágenes de un mismo sitio.

Resolución radiométrica: Sensibilidad de un detector a diferencias en la intensidad de la señal entre los objetos físicos y su entorno.

Tabla 7. Resolución de algunos sistemas de percepción remota (Campbell *et al.*, 2011).

Satélite	Fecha de lanzamiento	Sensor	Resolución espacial [m]	Resolución espectral [μm]	Resolución temporal [días]	Resolución radiométrica [bits]
Landsat 1	23/07/1972	RBV	80	B1 (verde) 0.475-0.575 B2 (rojo) 0.630-0.680 B3 (IR cercano) 0.690-0.830	18	6
		MSS	80	B4 (verde) 0.5-0.6 B5 (rojo) 0.6-0.7 B6 (IR cercano) 0.7-0.8 B7 (IR cercano) 0.8-0.11	18	6
Landsat 5	01/03/1984	MSS	75	B1 (verde) 0.5-0.6	16	8
		MSS		B2 (rojo) 0.6-0.7		
		MSS		B3 (IR cercano) 0.7-0.8		
		MSS		B4 (IR cercano) 0.8-0.11		
		TM	30 (120 para B6)	B1 (azul) 0.45-0.52	16	8
		TM		B2 (verde) 0.52-0.60		
		TM		B3 (rojo) 0.63- 0.69		
TM	B4 (IR cercano) 0.76-0.90					
TM	B5 (IR medio) 1.55-1.75					
TM	B6 (IR lejano) 10.4-12.5					
TM	B7 (IR medio) 2.08-2.35					
Landsat 7	15/04/1999	ETM+	30 (60 para B6 y 15 para B8)	B1 (azul) 0.45-0.52 B2 (verde) 0.52-0.6 B3 (rojo) 0.63-0.69 B4 (IR cercano) 0.76-0.9 B5 (IR medio) 1.55-1.75 B6 (IR térmico) 10.4-12.5 B7 (IR cercano) 2.08-2.35 B8 (Pancromática) 0.5-0.9	16	9
Landsat 8	11/02/2013	OLI	30 (15 para B8)	B1 (Coastal) 0.433-0.453 B2 (azul) 0.45-0.515 B3 (verde) 0.525-0.60 B4 (rojo) 0.63-0.68 B5 (IR cercano) 0.845-0.885 B6 (SW IR) 1.56-1.66 B7 (SW IR) 2.1-2.3 B8 (Pancromática) 0.5-0.68 B9 (Cirrus) 1.36-1.39	16	12
		TIRS	100	B10 (LWIR) 10.6-11.2 B11 (LWIR) 11.5-12.5	16	12

Continuación de la Tabla 7.

SPOT-4	23/03/1998	HRVIR	20 (10 para la pancromática)	(Verde) 0.5-0.59 (Rojo) 0.61-0.68 (IR cercano) 0.79-0.89 (IR medio) 1.58-1.75 (Pancromática) 0.49-0.73	26	8
		Vegetation Instrument	1000	(Azul) 0.43-0.47 (Rojo) 0.61-0.68 (IR cercano) 0.79-0.89 (IR medio) 1.58-1.75	26	8
SPOT-5	04/05/2002	HRG	10 (5 para la pancromática)	(Verde) 0.50-0.59 (Rojo) 0.61-0.68 (IR cercano) 0.79-0.89 (IR medio) 1.58-1.75 (Pancromática) 0.49-0.73	26	8
WorldView w2	08/10/2009	Multispectral	1.85	B1 (coastal) 0.40-0.45 B2 (Azul) 0.45-0.51 B3 (Amarillo) 0.58-0.62 B4 (Verde) 0.51-0.58 B5 (Rojo) 0.63-0.69 B6 (Rojo edge) 0.705-0.745 B7 (IR cercano) 0.770-0.895 B8 (IR cercano) 0.86-0.104 B9 (Pancromática) 0.45-0.80	1.1	12
NOAA-18	20/05/2005	AVHRR	1100	B1 0.58-0.68 B2 0.72-1.1 B3A 1.58-1.64 B3B 3.55-3.93 B4 10.5-11.3 B5 11.5-12.5	12 horas	10
GeoEye-1	06/09/2008	Multispectral	0.5	(Pancromática) 0.450-0.800 (Azul) 0.450-0.510 (Verde) 0.510-0.580 (Rojo) 0.655-0.690 (IR cercano) 0.780-0.920		8

4.2 Técnicas de procesamiento

La percepción remota se utiliza como herramienta para recopilar datos y transformarlos en información distribuida espacialmente, utilizando técnicas de procesamiento e interpretación de imágenes y los métodos apropiados para conseguirlo. El procesamiento de imágenes de satélite busca mejorar la apariencia de éstas para su posterior análisis e interpretación (Jensen, 1996).

En este trabajo se llevó a cabo un estudio preliminar de exploración geotérmica a escala regional en el occidente del volcán Ceboruco, Nayarit, utilizando procesamiento y análisis de datos digitales mediante realce espacial, y espectral como cociente de bandas y análisis de componentes principales con algoritmos de procesamiento de imágenes de satélite. El análisis se basó en las características multiespectrales de los materiales (vegetación y mineralogía de alteración hidrotermal) en forma de tono y color.

4.2.1 Materiales

4.2.1.1 Imagen multiespectral

El procesamiento de la matriz de datos de percepción remota fue limitado a una subimagen (Ceboruco_NW) de 1,347,872 píxeles (1,154 columnas y 1,168 filas) tomada del satélite Landsat 5 columna 30 y renglón 45 con el sensor TM adquiridas el 20 de Febrero del 2011, se descargaron por cortesía de *U. S. Geological Survey*, siguiendo un flujo de trabajo para el procesamiento digital como lo muestra la Figura 4.15.

De acuerdo a los objetivos del estudio sólo se utilizaron seis bandas del sensor TM, banda uno a cinco y banda siete. La banda seis no se utilizó porque pertenece a la parte del infrarrojo térmico, el cual no es útil para los procesos a realizar en este trabajo.

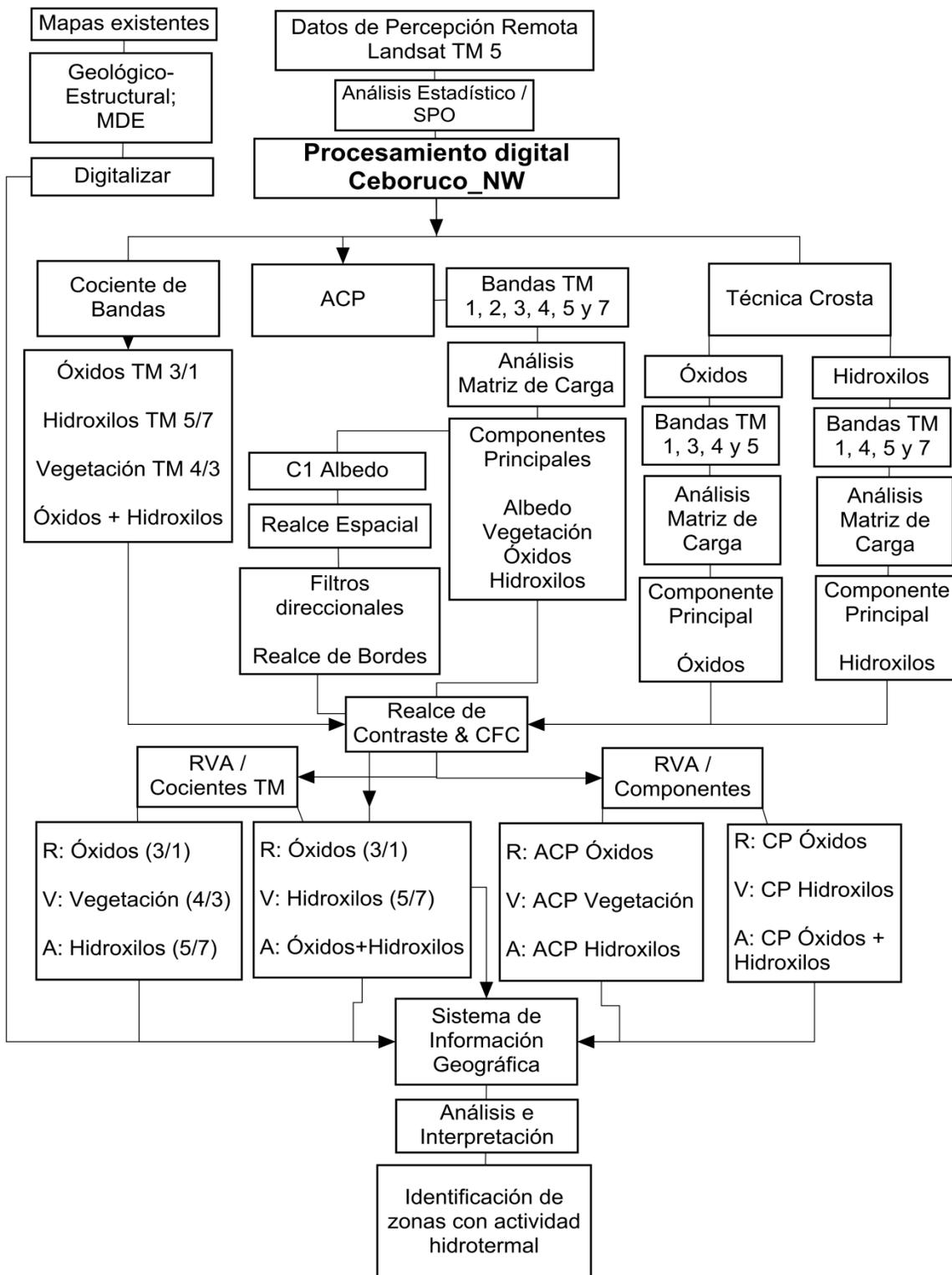


Figura 4.15 – Flujo de trabajo de la metodología. Las abreviaturas son: Sustracción del Pixel Oscuro (SPO); Modelo Digital de Elevaciones (MDE); Análisis de Componentes Principales (ACP); Composición en Falso Color (CFC); Rojo, Verde, Azul (RVA)

4.2.1.1 Software y hardware

La imagen Ceboruco_NW fue procesada en una computadora personal con procesador Intel Core TM i3, 4.00 GB de memoria RAM, 287 GB de disco duro y un sistema operativo de 64 bits. El software usado para el procesamiento digital de imágenes fue IDRISI Selva Versión 17.00 desarrollado por la “Graduate School of Geography” de la Universidad de Clark y ArcMap 10.2 de ArcGIS como herramienta para el mapeo de lineamientos y para la visualización de los resultados.

4.2.2 Pre-procesamiento

La aplicación del pre-procesamiento se justifica debido a la existencia de varios errores inherentes y accidentales en las mediciones que deben ser corregidos previos a su manipulación digital.

4.2.1.1 Análisis estadístico

El análisis estadístico de la imagen Ceboruco_NW se realizó primero a partir del cálculo de la estadística univariada de las diferentes bandas contenidas en la imagen, para conocer la distribución de la información como paso previo al despliegue de las diferentes bandas de la imagen. Se emplearon métodos estadísticos multivariados para detectar la interdependencia entre variables, tales como el análisis de correlación y el análisis por componentes principales.

Se obtuvo el rango de valores de brillo a partir de los valores máximos y mínimos del conjunto de datos. Se calculó la media para tener una estimación de la tendencia central de las observaciones, la varianza para obtener el grado de dispersión de los datos alrededor de la media, saber que tan separados se ven los valores de su valor medio, y la desviación estándar para conocer que tanto se alejan las mediciones de la muestra.

4.2.1.2 Pre-procesamiento radiométrico

Los valores de brillo en una imagen pueden ser influenciados por diversos factores como la respuesta del instrumento, la iluminación del objeto o la escena que está siendo

escaneada, un mal funcionamiento en el instrumento y las condiciones atmosféricas. El objetivo de aplicar este proceso es lograr que la imagen restaurada se asemeje a la escena en el terreno.

Corrección por dispersión atmosférica

Toda la radiación alcanzada por los instrumentos de percepción remota pasa a través de una porción de la atmósfera de la Tierra. Al hacerlo, la energía del sol es alterada en intensidad y longitud de onda por las partículas y gases suspendidos en la atmósfera terrestre. Bajo estas condiciones, los efectos atmosféricos pueden tener un impacto sustancial sobre los datos medidos por los sensores (Campbell *et al.*, 2011). Por lo que una serie de operaciones son llevadas a cabo para separar la información recibida del sensor de todas aquellas perturbaciones que no sean debidas a la propia naturaleza del objeto o escena escaneada, las más comúnmente aplicadas son:

a) Código de Transferencia Radiativo

Conocido por sus siglas en inglés RTC (Radiative Transfer Code). El cual cuenta con un modelo físico de comportamiento de la radiación, así como de su paso a través de la atmósfera, el cual permite ajustar los valores reales, como si se observaran bajo una atmósfera limpia mejorando de ese modo la calidad de la imagen. Sin embargo este método requiere una medición in situ de la radiación proveniente de la zona que se está registrando con el sensor y simultáneamente con la adquisición de la imagen (Campbell *et al.*, 2011).

b) Sustracción del cuerpo oscuro

Conocido por sus siglas en inglés como DOS (*Dark Object Subtraction*). Propuesta por Chávez (1975) como una herramienta práctica, simple y directa que sirve como base para la normalización de imágenes multispectrales mediante el ajuste de las variaciones en los valores digitales causado por atenuación atmosférica, ya que trabaja con la información presente dentro de la propia imagen. Esta técnica asume que se conoce el espectro de algún objeto de estudio como un cuerpo oscuro en ausencia de la dispersión atmosférica, por lo que se utiliza como referencia estándar, por ejemplo la sombra de una

nube o un cuerpo de agua (debido a que el agua limpia absorbe fuertemente en el infrarrojo cercano y porque muy poca radiación en esta región es dispersada hacia el sensor de píxeles sombreados). Esta técnica se lleva a cabo mediante el análisis del histograma de los valores digitales de la escena, en él se puede observar que los valores más bajos no son cero, sino que tienen un valor mayor a cero, dicho incremento representa el valor aportado por la dispersión atmosférica para cada banda. Este incremento luego es sustraído, de tal forma que cada histograma comenzará en cero (Campbell *et al.*, 2011).

Hay gran variedad de estrategias, técnicas y herramientas más avanzadas para realizar esta corrección, sin embargo algunas tratan de modelos complejos que requieren el uso de programas informáticos complicados. Además, requieren información meteorológica detallada relacionada con la humedad y la concentración de los gases atmosféricos y partículas. Estas informaciones varían con el tiempo y la altitud, por lo tanto es difícil obtener dichas informaciones con tal detalle.

Otras técnicas requieren conocer la configuración geográfica local y el comportamiento espectral del objeto de estudio en el momento en que la imagen fue adquirida, lo cual no es tan común. Por lo tanto el uso de alguna de estas técnicas dependerá de los objetivos de la investigación, las mejoras en las imágenes que se deseen realizar y los recursos económicos y computacionales con los que se cuente (Campbell *et al.*, 2011; Chandra & Ghosh, 2006).

4.2.1.3 Pre-procesamiento geométrico

Todas las imágenes de percepción remota son inherentemente sujetas a distorsiones geométricas debido a su adquisición aunque muchas de ellas pueden ser corregidas utilizando fórmulas matemáticas. Estas distorsiones se deben a varios factores tales como: la perspectiva de los sensores ópticos, el movimiento del sistema de escaneo, el movimiento de la plataforma, su altitud y velocidad, el relieve del terreno, y la curvatura y rotación de la Tierra.

Muchas de estas variaciones son sistemáticas o predecibles en la naturaleza, se corrigen por medio del modelado preciso del movimiento del sensor y la plataforma, y la relación

geométrica de la plataforma con la Tierra, aunque no lo es así para los errores no sistemáticos o aleatorios. Sin embargo, ambos errores se pueden corregir mediante el uso de un número adecuado de puntos de control en la tierra, conocidos por sus siglas en inglés como GCP (*ground control points*), que son los puntos de la superficie terrestre con coordenadas dentro de la imagen (medidos en fila y número de píxeles) que pueden ser localizados con precisión en la tierra sobre un mapa (medidos en latitud y longitud o cualquier sistema de coordenadas). La localización de estos puntos permite realizar el registro geométrico de las imágenes a una superficie con sistema coordinado conocido, empleando una regresión lineal de mínimos cuadrados y determinar las ecuaciones que logran la transformación de coordenadas (Campbell *et al.*, 2011).

Una vez adquiridas las imágenes para esta investigación, se observó la información del archivo de metadatos de cada una de ellas para conocer sus características (número de filas y columnas, coordenadas máximas y mínimas, sistema de referencia, resolución, etc.). Para corregir los errores generalmente presentes en las imágenes de percepción remota, se analizaron visualmente las imágenes de cada una de las bandas mediante un despliegue inicial de ellas. Éste análisis mostró que no es necesaria la aplicación de procesos de corrección radiométrica ni geométrica a las imágenes de cada banda, excepto la atmosférica, debido a que no se presentó errores por bandeamiento o pérdida de información. Además, para conocer la distribución de la información se emplearon los resultados obtenidos del análisis estadístico, la información de los metadatos y el histograma.

En cuanto a la corrección de los errores causado por la dispersión atmosférica, se corrigieron las imágenes por el método de sustracción del pixel oscuro (en adelante SPO) restando el valor mínimo a cada banda, garantizando que los nuevos valores mínimos para cada una de las bandas comiencen en cero.

4.2.3 Realce digital

El realce de imágenes digitales se entiende como la modificación y mejoramiento del aspecto visual de la imagen para realzar o destacar información dentro de la misma imagen y revelar rasgos que de otra manera no serían fácilmente visibles (Campbell, 2002). Implica técnicas para aumentar las diferencias visuales entre las características,

mediante la mejora de la distinción tonal entre varias características en una escena utilizando patrones espaciales específicos de una imagen.

Se emplearon métodos como deformación lineal del histograma, realce de bordes y análisis de componentes principales para efectuar realce de contraste, espacial y espectral de las imágenes respectivamente, para mejorar y destacar información dentro de las mismas, con el fin de distinguir el patrón de distribución de la alteración hidrotermal para localizar los principales flujos ascendentes del sistema geotérmico que deban ser estudiadas con trabajo de campo a detalle.

4.2.2.1 Realce de contraste

El contraste se refiere al rango de los valores de brillantes presentes en una imagen (Campbell, 2002). Este tipo de contraste es aplicado a los componentes individuales de la imagen, como un máximo estiramiento posible del histograma para destacar las diferencias sutiles en valor de brillo por modificación del contraste. El rango tratado es caracterizado por la cualidad común de que sólo se genera a partir de su valor existente un nuevo valor de brillo para un píxel. Se aplica sobre cada píxel en forma individual, sin considerar los píxeles vecinos, y se realiza a cada banda en forma independiente.

Deformación lineal del histograma

Convierte los valores digitales originales en una nueva distribución, utilizando nuevos valores máximos y mínimos específicos. El nuevo máximo coincide con el antiguo máximo y de igual manera con el mínimo. Todos los viejos valores intermedios se escalan proporcionalmente entre los nuevos valores mínimos y máximos. Los nuevos y los viejos valores de brillo de los píxeles de una imagen están relacionados de manera lineal (Campbell, 2002).

Deformación lineal con saturación

Se satura cierto porcentaje de los píxeles extremos (valor mínimo y máximo) del histograma mientras se aplica el realce de contraste lineal (Richards, 2013).

4.2.4 Transformación de imágenes

Estas son operaciones similares en concepto al realce de imagen. Generalmente, la operación de mejora de imagen se lleva a cabo en una sola banda, mientras que las transformaciones de imagen se realizan por lo general en múltiples bandas. Las operaciones aritméticas como la resta, suma, multiplicación y división, se llevan a cabo para combinar y transformar las bandas originales en nuevas imágenes que mejoran o resaltan espectralmente ciertas características en la escena. Además, en el conjunto de datos multibanda, cuando el rango espectral de las bandas se encuentra muy cerca uno del otro, información repetitiva conduce a disposición de la redundancia de los datos.

Se emplearon las técnicas de cociente de bandas, análisis de componentes principales, componentes principales dirigidas y composición en falso color, como técnicas de realce espectral para diferenciar las zonas que contienen minerales típicos de alteración hidrotermal de zonas cubiertas con vegetación.

4.2.3.1 Cocientes de bandas

Es para realzar información espectral. Se aplica para identificar cierto material pero espectralmente. En el numerador se encuentra la banda con el rasgo de alta reflectancia y en el denominador el de alta absorbancia.

Se utilizaron las imágenes corregidas atmosféricamente y se aplicaron los cocientes de bandas espectrales de la imagen Ceboruco_NW para mejorar las diferencias en las características de reflectancia espectral de la vegetación, óxidos e hidroxilos y poder identificarlos. El proceso para realizar este tipo de realce espectral se describe a continuación:

1. Con base en las características de la firma espectral de la vegetación, óxidos e hidroxilos, se realizó el cociente de las bandas CEB TM 4/3, CEB TM 3/1 y CEB TM 5/7 respectivamente, porque de este modo en el numerador se encuentra la banda con el rasgo de alta reflectancia y en el denominador el de alta absorbancia (Tabla 6).

2. Puesto que es un cociente, es necesario considerar que el valor del denominador no puede ser cero, porque el resultado de la operación sería un valor indeterminado, por ello se hace una reclasificación de valores digitales, en la cual se le asigna un nuevo valor de uno, para todos los valores de cero hasta justo antes de uno de la banda colocada en el denominador.
3. Finalmente se realizaron los cocientes CEB TM 4/3, CEB TM 3/1 y CEB TM 5/7 a los cuales se les aplicó una deformación lineal del histograma con saturación del 1 % para desplegar y mejorar la visualización de la información generada de los cocientes.

Una vez obtenidos los cocientes de bandas para la identificación de óxidos e hidroxilos se realiza un realce de contraste a la suma de las imágenes obtenidas de los cocientes CEB TM 3/1 y CEB TM 5/7, con el fin de resaltar en la misma imagen ambos grupos minerales.

4.2.3.2 Análisis de componentes principales

Técnica estadística multivariada reconocida en inglés como *Principal Components Analysis* (PCA). Selecciona sucesivamente combinaciones lineales no correlacionadas (matriz de carga de los vectores característicos) de las variables en orden decreciente de varianza (Mutua & Mibei, 2011), esto implica que disminuye la distribución espacial de la abundancia de la respuesta espectral de ciertos materiales en superficie, por lo que ayuda a reducir el número de bandas para el análisis y por lo tanto la redundancia (Loughlin, 1991). A continuación se explica la función de los resultados del análisis estadístico multivariado:

- Matriz de varianza-covarianza: expresa la dispersión de los datos alrededor de la media.
- Matriz de correlación: útil para conocer cuáles bandas son diferentes entre sí.
- Matriz de valores y vectores característicos: el vocablo original de raíz anglosajona es “eigen” y, por eso, se la ha traducido también como “eigen valores” o “eigen vectores”. Los “eigenvalores” indican el tamaño de cada una de las componentes y los “eigenvectores” dan la nueva dirección de cada una de las componentes.

- Porcentaje de varianza: informa acerca del grado de dispersión de los datos alrededor de la estimación de la tendencia central de las observaciones o media. De tener poca varianza en los datos indica que hay poca información, es decir pocos materiales. El mayor porcentaje de varianza indica que en esa componente está contenida la mayor parte de la información.

Las componentes principales transforman una nueva coordenada espectral de los datos de la imagen de percepción remota mediante el establecimiento de la forma diagonal de la matriz de covarianza. Las nuevas coordenadas son combinaciones lineales de las bandas espectrales originales (Richards, 2013). De este modo es posible representar los píxeles en un espacio vectorial con tantos ejes o dimensiones dependiendo de la resolución espectral de la imagen, lo cual genera nuevas variables o componentes independientes que contienen información espectral específica para cada píxel.

A partir de las imágenes corregidas por SPO, se aplicó el análisis de componentes principales (en adelante ACP) de la imagen Ceboruco_NW para mejorar las diferencias en las características de reflectancia espectral de la vegetación, óxidos e hidroxilos y poder identificarlos. El proceso para realizar este análisis se describe a continuación:

1. Se utilizaron como datos de entrada las seis imágenes corregidas atmosféricamente de la imagen Ceboruco_NW, que generan seis nuevas componentes.
2. Para seleccionar las nuevas variables o componentes principales que aporten mayor información para el realce de la vegetación, óxidos e hidroxilos, se analizó el conjunto de datos multivariados: matriz de varianza-covarianza, correlación, vectores característicos y matriz de carga.
3. Se aplicó una deformación lineal del histograma con saturación del 1% para desplegar y mejorar la visualización de las tres componentes elegidas.

4.2.3.3 Técnica de Crosta

Crosta & Moore (1989) describen una metodología llamada *Feature Oriented Principal Components* (FPCS), informalmente llamada técnica de Crosta. Se fundamenta en el análisis de componentes principales. Se examina la matriz de carga de los eigenvectores de una selección específica de seis o cuatro bandas, para decidir cuál de las componentes principales de la imagen concentra información directamente relacionada con la firma espectral teórica de los objetivos específicos.

A partir de las imágenes corregidas por SPO, se aplicó la técnica de Crosta de la imagen Ceboruco_NW para mejorar las diferencias en las características de reflectancia espectral de óxidos e hidroxilos y poder identificarlos, útiles para el reconocimiento y localización de posibles zonas mineralizadas (Crosta & Moore, 1989; Fraser, S. J., 1991; Loughlin, 1991; Ruiz-Armenta & Prol-Ledesma., 1998; Fernández *et al.*, 2001). El proceso para realizar este análisis, es el siguiente:

1. Se utilizaron como datos de entrada las bandas CEB TM 1, CEB TM 4, CEB TM 5 y CEB TM 7 para identificar hidroxilos y las bandas CEB TM 1, 3, 4, 5 para identificar óxidos de hierro. Por lo tanto se obtuvieron ocho nuevas componentes, cuatro para hidroxilos y cuatro para óxidos.
2. Para seleccionar las dos nuevas variables o componentes principales que aporten mayor información para el realce de óxidos e hidroxilos, se analizó el conjunto de datos multivariados: matriz de correlación y matriz de carga.
3. Se aplicó una deformación lineal del histograma con saturación del 1% para desplegar y mejorar la visualización de las dos componentes elegidas.

Una vez obtenidas las dos componentes principales para la identificación de óxidos e hidroxilos se realizó un realce de contraste a la suma de las imágenes obtenidas de la técnica de Crosta, con el fin de resaltar en la misma imagen ambos grupos minerales (Loughlin, 1991).

4.2.3.4 Composición en falso color

En inglés *False Color Composite (FCC)* elige tres de las bandas de la imagen y las muestra usando los colores primarios aditivos rojo, verde y azul (RGB, Red, Green, Blue), para dar una mejor discriminación visual entre los tipos de cobertura de interés (Richards, 2013). Lo que se busca con este tipo de realce es asociar los colores observados con las características de reflectancia espectral, es decir, realzar la respuesta espectral de los materiales que se busca identificar, que sean obvios con la composición a color, en la cual se asignan diferentes colores para diferentes brillos.

Con una composición en falso color es posible extraer información combinando bandas que tengan diferencias en reflectancia para diferentes materiales (vegetación, minerales de alteración como óxidos e hidroxilos).

Se realizaron diferentes composiciones en falso color de los resultados obtenidos de las técnicas de cociente de bandas, ACP y técnica de Crosta, como realce espectral para asociar los colores observados con las características de reflectancia espectral y diferenciar las zonas que contienen minerales típicos de alteración hidrotermal de zonas cubiertas con vegetación. El proceso para realizar estas composiciones se describe a continuación:

- Composición en falso color para los cocientes de bandas

Con los colores primarios rojo, verde y azul (en adelante RVA) se realizó una composición en falso para resaltar óxidos, vegetación e hidroxilos, en la cual en la banda del color rojo, está el cociente CEB TM 3/1, en la banda del color verde, está el cociente CEB TM 4/3 y en la banda del color azul, el cociente CEB TM 5/7.

Por medio de los colores primarios RVA se realizó una composición en falso para resaltar óxidos, hidroxilos y la suma de óxidos más hidroxilos, en la cual en la banda del color rojo, está el cociente CEB TM 3/1, en la banda del color verde, está el cociente CEB TM 5/7 y en la banda del color azul, la suma de los cocientes CEB TM 3/1 y CEB TM 5/7.

- Composición en falso color del análisis de componentes principales

Mediante los colores primarios RVA se realizó una composición en falso con las componentes principales para resaltar óxidos, vegetación e hidroxilos, en la cual en la banda del color rojo, está la componente que muestra óxidos, en la banda del color verde, está la componente que señala vegetación y en la banda del color azul, está la componente que indica hidroxilos.

Con los colores primarios RVA se realizó una composición en falso para resaltar óxidos, hidroxilos y la suma de óxidos más hidroxilos, en la cual en la banda del color rojo, está la componente que muestra óxidos, en la banda del color verde, está la componente que señala hidroxilos y en la banda del color azul, la suma de las componentes que indican óxidos e hidroxilos.

4.2.2.1 Realce espacial

Es una técnica que incrementa el contraste de los píxeles dentro de una imagen. Considera la frecuencia espacial, que es la cantidad de cambios de brillo por unidad de distancia, de acuerdo a las diferencias entre los valores de mayor a menor brillo para un conjunto continuo de píxeles (Campbell *et al.*, 2011).

El realce de bordes se emplea para identificar patrones y lineamientos, que en las imágenes de satélite se expresan como variaciones abruptas de brillantez. Estas variaciones no siempre son evidentes en las imágenes, para compensarlo se aplican operaciones de convolución mediante filtros digitales espaciales que modifican el valor de un píxel teniendo en cuenta los píxeles que lo rodean.

Un “*kernel*” es la colección de vecindarios cuadrados definidos por una plantilla o ventana que se coloca sobre la imagen, aunque ésta pueda ser de cualquier forma y tamaño, de modo que tenga un centro natural para colocarlo sobre el píxel de la imagen que se está procesando (Richards, 2013).

La convolución es una operación en la cual se utiliza un “*kernel*” que se mueve sistemáticamente centrado sucesivamente en cada píxel a través de la imagen, comúnmente comienza en el borde superior izquierdo de la imagen, desplazando el

“*kernel*” un pixel a la derecha cada vez, al finalizar una fila se desplaza a la posición inicial para desplazarse una posición hacia abajo y seguir el proceso hasta el final de la imagen. (Sabins, 1997). En cada posición se calcula una media local de los valores dentro de la ventana, el valor central se compara con los promedios de los píxeles adyacentes. El valor de salida es la diferencia entre el doble del valor de entrada y la media local. De este modo aumenta el brillo de los píxeles que ya son más brillantes que la media local y disminuye el brillo de los píxeles que son más oscuros que la media local.

Los filtros digitales espaciales se clasifican según la dirección en la que actúan como direccionales y no direccionales.

- Filtros direccionales

Se utilizan para realzar los lineamientos que se encuentran orientados a una dirección preferencial, los más comunes son en las direcciones Norte, Sur, Este y Oeste. Este tipo de filtros de convolución ocupan un “*kernel*” de nueve píxeles, en un arreglo de 3 filas y 3 columnas (3x3). Se diseña con base en la dirección del lineamiento que se pretende realzar.

- Filtros no direccionales

Llamados también filtros Laplacianos, no varían con la dirección, es decir realza lineamientos igualmente en todas las direcciones, aunque cuando los lineamientos se encuentran orientados paralelamente a la dirección de desplazamiento del filtro, éste no consigue realzarlos. Este tipo de filtros de convolución ocupan un “*kernel*” de nueve píxeles, en un arreglo de 3 filas y 3 columnas (3x3).

A partir de la primera componente principal (C1) del ACP se aplicó primero el realce espacial de lineamientos mediante filtros digitales espaciales de acuerdo a la metodología propuesta por Moore y Waltz (1983), para reforzar los límites visuales entre las regiones de contraste de brillo, con el fin de hacer más visibles e identificar las estructuras geológicas principales. Segundo, con este mismo objetivo, se efectuó una comparación de las estructuras identificadas con los filtros espaciales en la imagen y un análisis del modelo digital del terreno con iluminación artificial.

El método desarrollado por Moore & Waltz (1983) se realizó de la siguiente manera:

1. Se aplicó un filtro pasa-bajas a la imagen de entrada (C1) para remover las altas frecuencias espaciales (ruido). La Figura 4.16 muestra este filtro.

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Figura 4.16 – Filtro pasa-bajas 3x3
(tomado de Campbell, 2002).

2. A la imagen resultante del paso anterior, se le aplicaron individualmente los filtros direccionales N, S, E, W, NE, NW, SE y SW, para resaltar los lineamientos en las direcciones principales. La Figura 4.17 muestra estos filtros.

$$\begin{aligned} N &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix} & S &= \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \\ E &= \begin{pmatrix} -1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{pmatrix} & W &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \end{pmatrix} \\ NE &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} & NW &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \end{pmatrix} \\ SE &= \begin{pmatrix} -1 & -1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} & SW &= \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Figura 4.17 – Filtros direccionales 3x3 (tomado de Campbell, 2002).

3. Se sumaron las imágenes resultantes del paso anterior para obtener un filtro direccional total.
4. Se aplicó el filtro pasa-bajas de la Figura 4.16, a la imagen con el filtro direccional total, para eliminar otros elementos distintos a los bordes.
5. Se aplicó una deformación lineal del histograma con 1% de saturación a la imagen resultante del paso cuatro, para visualizar con mayor detalle los lineamientos.

6. Se realizó una suma de imágenes: la imagen de entrada (C1) más la imagen resultante del paso 5. Para mejorar su visualización e identificar los lineamientos, se le aplicó una deformación lineal del histograma con 1% de saturación.

La herramienta de sombreado (*hillshade*) obtiene la iluminación hipotética de una superficie mediante la determinación de valores de iluminación para cada celda en un raster. Lo hace mediante el establecimiento de una posición de una fuente de luz hipotética y el cálculo de los valores de iluminación de cada celda en relación con las celdas vecinas. El azimuth es la dirección angular del sol, se mide del norte 0° en sentido horario. La altitud es la pendiente o ángulo de la fuente de iluminación sobre el horizonte de 0 (sobre el horizonte) y 90 (cenit) (Burrough & McDonell, 1998).

La metodología para hacer el realce espacial sobre un modelo digital se describe de la siguiente manera:

Como datos de entrada se utilizó el Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) 3.0 del Estado de Nayarit, descargado de INEGI con una resolución de 15 m.

La metodología utilizada para el procesamiento del CEM fue la siguiente:

- A. El CEM fue reproyectado a coordenadas UTM.
- B. Se recortó la zona de estudio del CEM reproyectado.
- C. Se aplicó el filtro hill-shade con altitud de 90° y con azimuth de 0° a 360° cada 45°, para las direcciones E-W, NW-SE, N-S, NW-SW, E-W, NW-SE, N-S, NE-SW y E-W, respectivamente.
- D. Los lineamientos fueron definidos manualmente a diferentes escalas: 1:500000, 1:250000, 1:100000, 1:80000 y 1:50000 con el fin de cubrir la mayor cantidad de lineamientos a diferentes escalas.

Por último se hizo una comparación de las estructuras identificadas con los filtros espaciales en la imagen y un análisis del modelo digital del terreno con iluminación artificial.

4.2.5 Sistema de Información Geográfica

Es una integración organizada de hardware, software y datos geográficos (objetivos) diseñado para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y de gestión, el producto principal son mapas. Un Sistema de Información Geográfica (en adelante SIG) es un sistema de gestión de datos espaciales que recolecta un gran volumen de datos que no pueden ser analizados individualmente de forma efectiva (Burrough, 1986).

El análisis espacial de la información generada en los estudios geocientíficos consiste en la superposición de los datos digitales recopilados en forma de mapas para realizar un posterior análisis visual para generar nuevos documentos cartográficos de interés en la aplicación en curso.

El estudio de fenómenos naturales complejos como la búsqueda de recursos geotérmicos requiere de la manipulación, no sólo de las capas individuales de información, sino también del análisis de las relaciones, especialmente las espaciales, que existen entre ellas, para poder llegar así a obtener los resultados deseados (Bonham-Carter, 1994).

Los resultados del realce espacial y espectral se integraron espacialmente en el contexto de un SIG para identificar y definir las zonas de exploración con actividad hidrotermal relacionada a los lineamientos. La forma en que se integró la información espacial se describe a continuación:

Cocientes de bandas

- Mapas integrados con el realce espectral obtenido a partir de los cocientes de bandas y los lineamientos.

Análisis de Componentes Principales

- Mapas integrados con el realce espectral obtenido a partir del análisis de componentes principales y los lineamientos.

Composición en Falso Color

- Mapas integrados con el realce espectral obtenido a partir de la composición en falso color de cocientes y los lineamientos.
- Mapas integrados con el realce espectral obtenido a partir de la composición a color del análisis de componentes principales y los lineamientos.

5. RESULTADOS

5.1 Análisis estadístico

La estadística inicial de la imagen Ceboruco_NW proporciona una visión de los datos originales recibidos del satélite Landsat 5 TM. Los resultados del cálculo de las estadísticas univariadas y multivariadas de las bandas CEB TM 1, CEB TM 2, CEB TM 3, CEB TM 4, CEB TM 5 y CEB TM 7 se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Estadísticas univariadas y multivariadas de las seis bandas no térmicas de la imagen Ceboruco_NW.

Medidas de tendencia y variabilidad						
Nº de banda	CEB TM 1	CEB TM 2	CEB TM 3	CEB TM 4	CEB TM 5	CEB TM 7
Media	61,49	29,56	34,75	54,84	88,11	38,83
Varianza	52,19	32,14	110,00	134,95	678,65	186,24
Des. estándar	7,22	5,67	10,49	11,62	26,05	13,65
Mínimo	40	15	12	8	4	2
Máximo	183	96	131	133	255	255

Matriz de Varianza-Covarianza						
CEB TM 1	52,18	—	—	—	—	—
CEB TM 2	39,07	32,13	—	—	—	—
CEB TM 3	71,64	57,88	109,99	—	—	—
CEB TM 4	45,59	43,79	75,58	134,96	—	—
CEB TM 5	144,41	116,81	231,67	197,39	678,67	—
CEB TM 7	84,77	65,49	128,78	78,09	332,17	186,24

Matriz de Correlación						
CEB TM 1	—	—	—	—	—	—
CEB TM 2	0,95	—	—	—	—	—
CEB TM 3	0,95	0,97	—	—	—	—
CEB TM 4	0,54	0,67	0,62	—	—	—
CEB TM 5	0,77	0,79	0,85	0,65	—	—
CEB TM 7	0,86	0,85	0,90	0,49	0,93	—

Los valores más pequeños de varianza y covarianza se obtuvieron para la banda CEB TM 2 y la covarianza CEB TM 1 y CEB TM 2. Esta banda es significativamente más baja en contraste que las bandas adyacentes CEB TM 1 y TM 3. La banda CEB TM 5 presenta la varianza más alta causada por las diferencias en la respuesta espectral entre los diferentes materiales que componen la escena.

La matriz de correlación señala más del 90% de correlación entre las bandas CEB TM 1, 2 y 3, y CEB TM 5 y 7, lo que indica que estas bandas contienen información redundante. La banda CEB TM 4 muestra una correlación media con las bandas CEB TM 5 y CEB TM 7, lo que hace suponer la existencia de información no redundante entre ellas. La correlación más baja se presentan entre la banda CEB TM 4 y CEB TM 7 (49%), debido a que la banda CEB TM 4 es característica de la vegetación, en tanto que la banda CEB TM 7 es más apropiada para la diferenciación de materiales geológicos. Por lo que se puede argumentar el uso de estas bandas para diferenciar áreas que contienen minerales hidrotermales de aquellos que sólo contienen vegetación (Ruiz-Armenta & Prol-Ledesma, 1998).

5.2 Resultados del pre-procesamiento

Con la técnica SPO, se corrigieron los errores causados por la dispersión atmosférica, restando el valor mínimo a cada banda, garantizando que los nuevos valores mínimos para cada una de las bandas comiencen en cero. Los valores máximos y mínimos de las imágenes originales y corregidas se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Valores máximos y mínimos de las bandas originales y corregidas por dispersión atmosférica de la imagen Ceboruco_NW.

Bandas originales	Máximo	Mínimo	Bandas corregidas	Máximo	Mínimo
CEB TM 1	183	40	CEB TM 1	143	0
CEB TM 2	96	15	CEB TM 2	81	0
CEB TM 3	131	12	CEB TM 3	119	0
CEB TM 4	133	8	CEB TM 4	125	0
CEB TM 5	255	4	CEB TM 5	251	0
CEB TM 7	255	2	CEB TM 7	253	0

5.3 Realce espectral

5.3.1 Cociente de bandas

A continuación se muestran las imágenes obtenidas a partir del realce espectral mediante cociente de bandas.

La Figura 5.1 muestra el resultado del cociente $CEB_{TM\ 4} / CEB_{TM\ 3}$ en donde en colores blancos se observa la contribución de la vegetación y en colores oscuros aquellos materiales que no son vegetación. En esta misma figura se observan pixeles brillantes en abundancia, la mayoría se concentra en el centro de la escena con tendencia NW-SE y cubre cerca de la mitad del área de estudio.

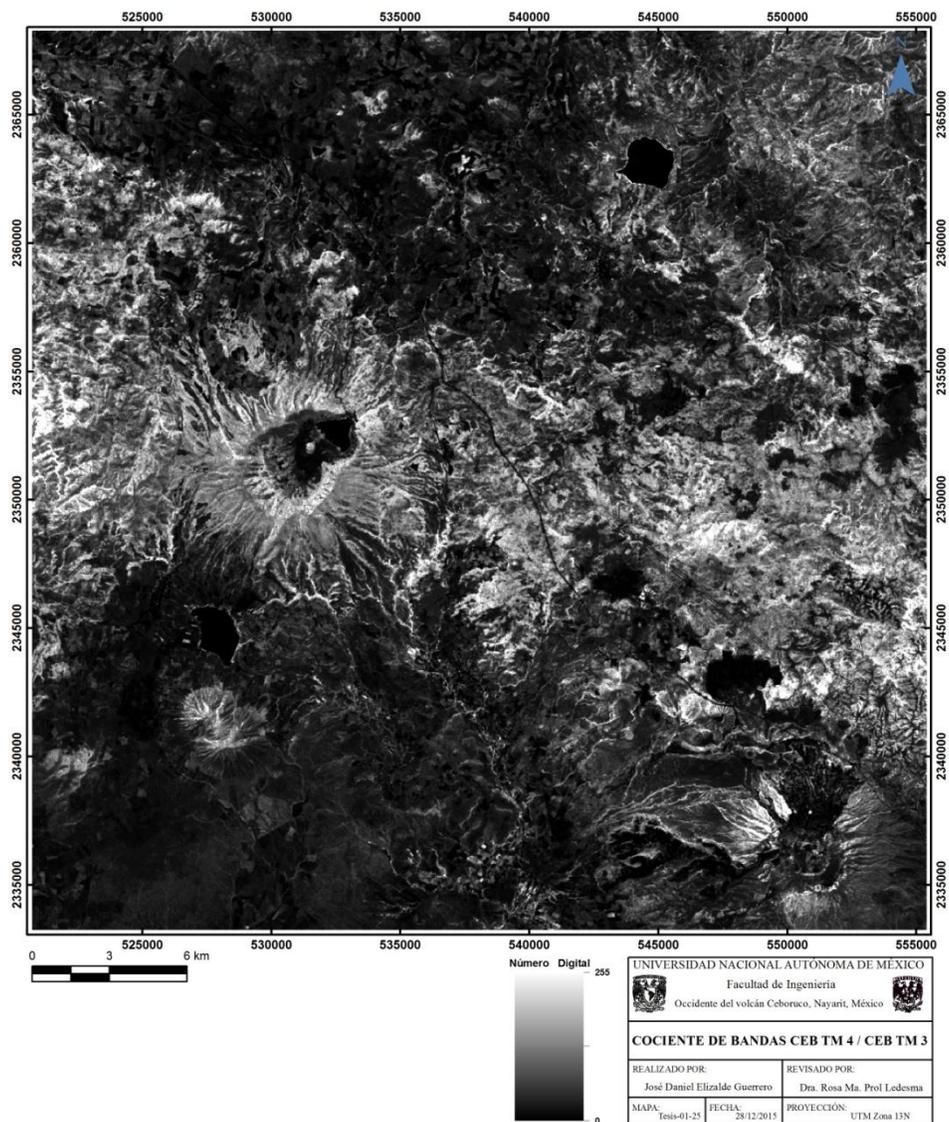


Figura 5.1 – En la imagen se muestra el realce de la respuesta espectral de la vegetación a partir del cociente de las bandas CEB TM 4 / CEB TM 3, con deformación lineal del histograma y 1% de saturación. Los píxeles más brillantes representan las zonas con predominio de cubierta vegetal.

La Figura 5.2 muestra el resultado del cociente $CEB\ TM\ 3 / CEB\ TM\ 1$ en donde en colores blancos se observan las zonas donde la contribución de los óxidos es más importante y en colores oscuros aquellos píxeles donde predominan materiales que no son óxidos. En esta misma figura se observan píxeles brillantes en la esquina superior derecha e inferior izquierda, la mayoría se concentra en la segunda esquina mencionada. Cobre cerca de un cuarto del área de estudio.

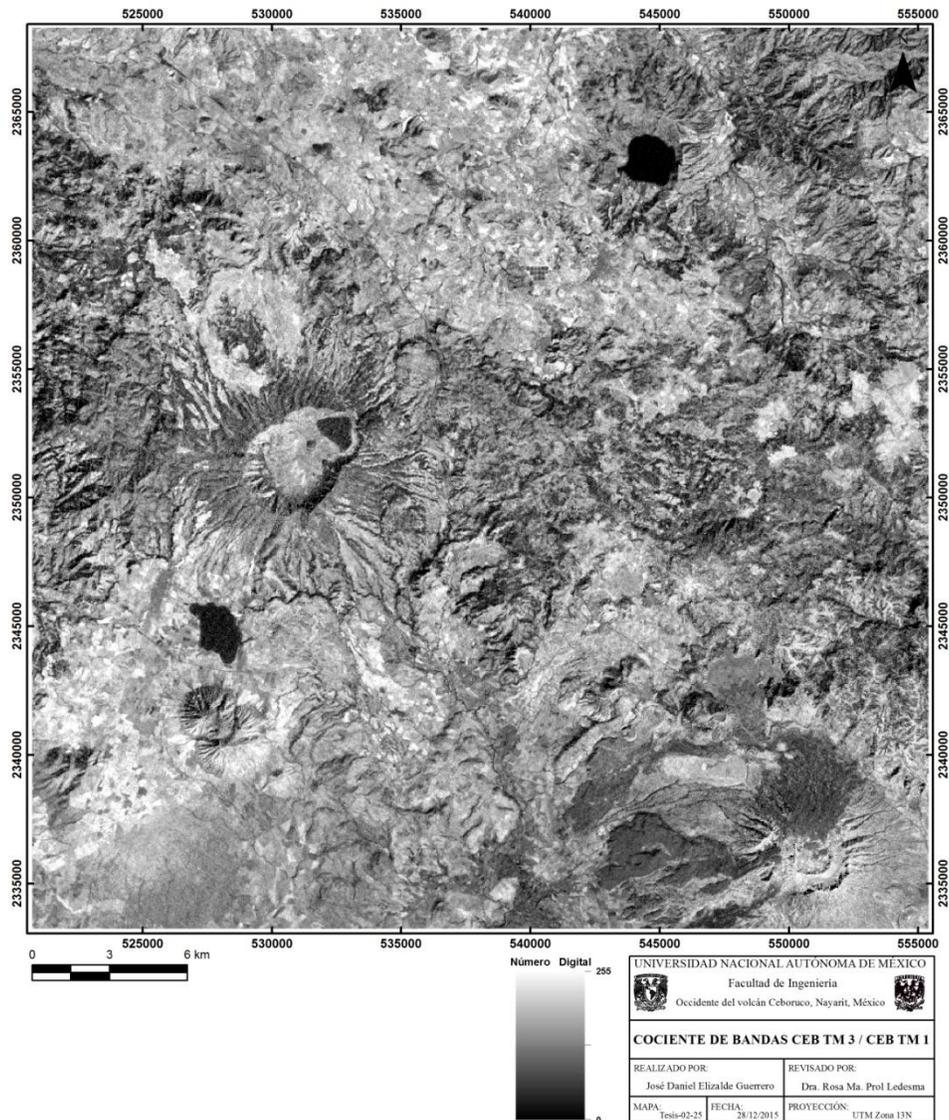


Figura 5.2 – En la imagen se muestra el realce de la respuesta espectral de óxidos a partir del cociente de las bandas CEB TM 3 /1, con deformación lineal del histograma y 1% de saturación. Las zonas más brillantes muestran las áreas donde se tiene la presencia de óxidos.

La Figura 5.3 muestra el resultado del cociente $CEB\ TM\ 5 / CEB\ TM\ 7$ en donde en colores blancos se observan las zonas donde la contribución de los hidroxilos es más importantes y en colores oscuros aquellos pixeles donde predominan materiales que no son hidroxilos. En esta misma figura se observan pixeles brillantes en abundancia, la mayoría se concentra en el centro de la escena con tendencia NW-SE y cubre cerca de la mitad del área de estudio.

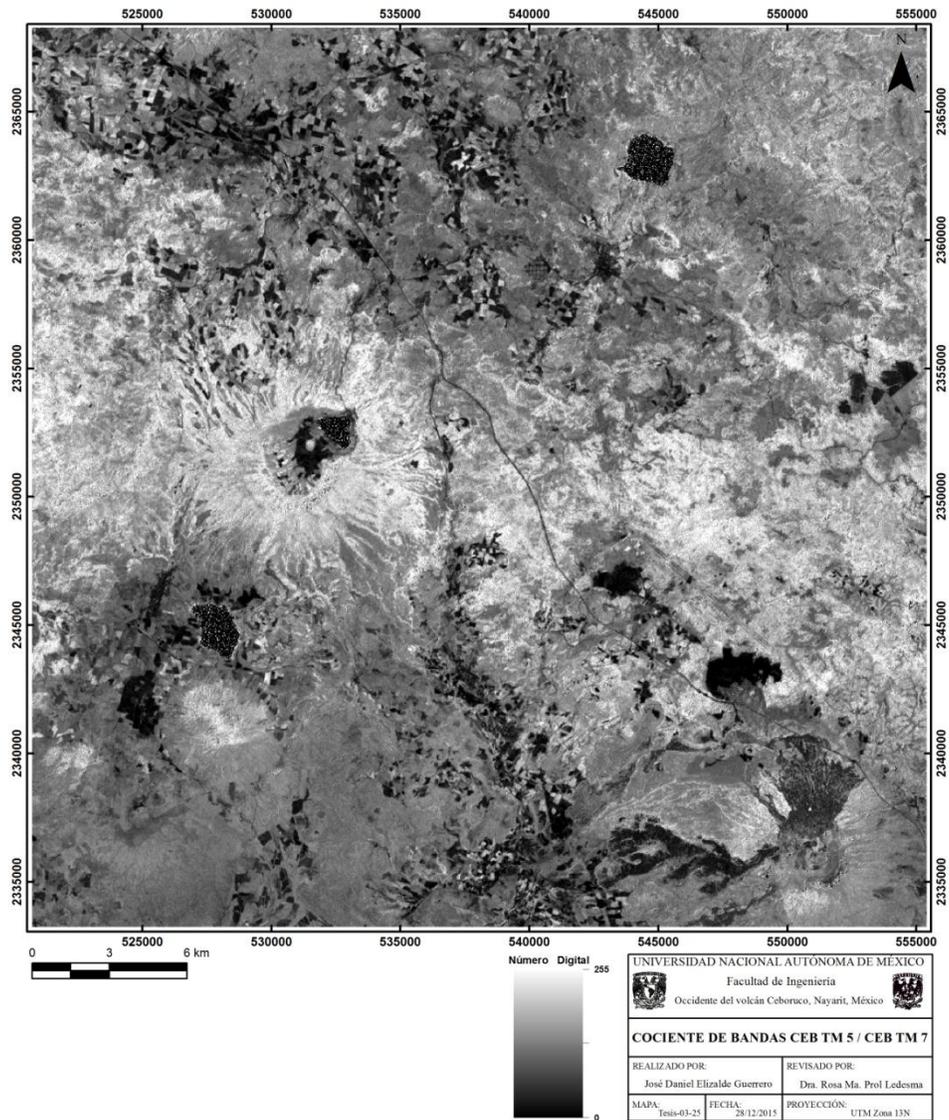


Figura 5.3 – En la imagen se muestra el realce de la respuesta espectral de hidroxilos a partir del cociente de las bandas CEB TM 5 / 7, con deformación lineal del histograma y 1% de saturación. Las zonas más brillantes muestran las áreas donde se tiene la presencia de hidroxilos.

La Figura 5.4 muestra la distribución espacial de los óxidos e hidroxilos a partir de la suma del cociente CEB TM 3/1 y 5/7. Esta suma de cocientes permite destacar ambos grupos minerales en colores blancos y disminuir la alta reflectancia de la vegetación para esta zona, los cuales se muestran en colores oscuros. Se observan pixeles brillantes en abundancia, la mayoría se concentra en el centro de la escena con tendencia NW-SE y cubre cerca de la mitad del área de estudio.

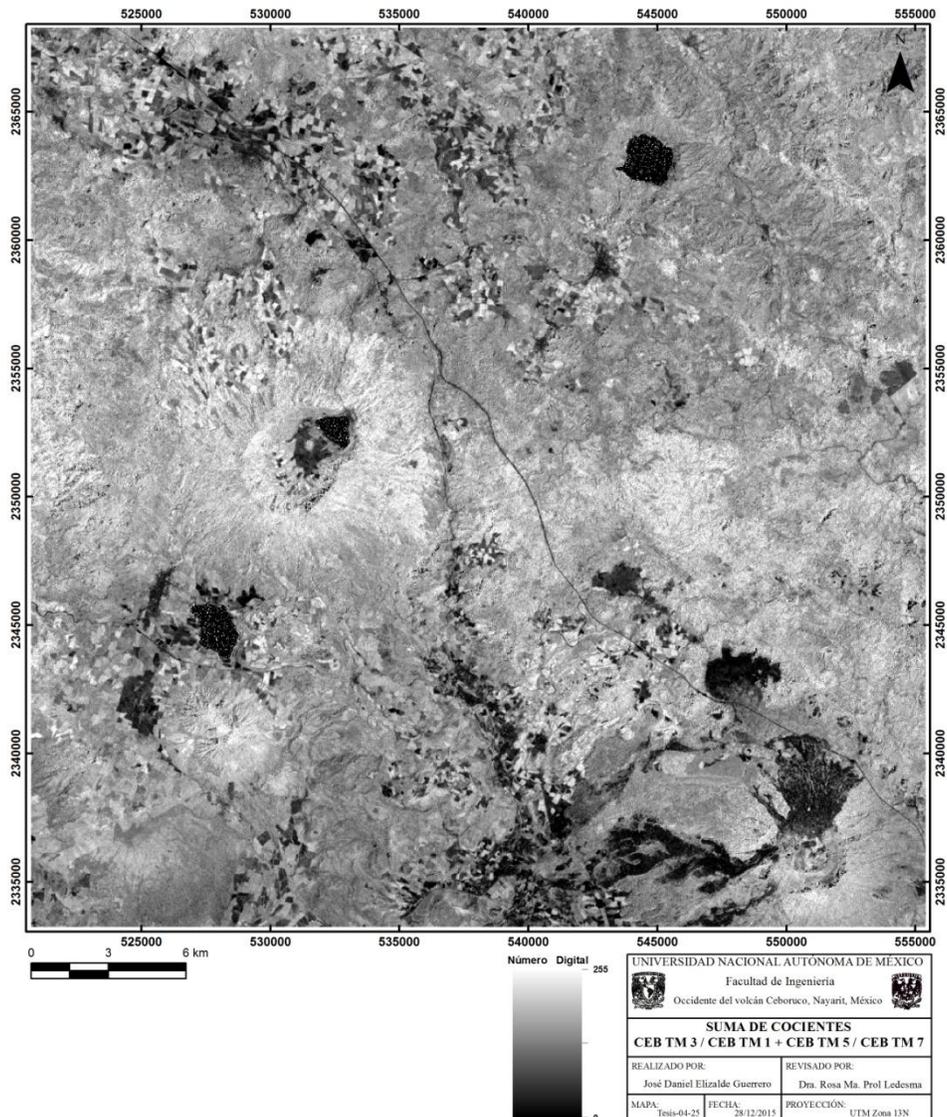


Figura 5.4 – En la imagen se muestra el realce de la respuesta espectral de óxidos e hidroxilos a partir de la suma de los cocientes de las banda CEB TM 3 /1 y 5/7, con 1% de saturación. Las zonas más brillantes muestran las áreas donde se tiene la presencia de ambos minerales.

5.3.2 Análisis de componentes principales

La Tabla 10 describe la transformación de las imágenes de las bandas originales no térmicas contenidas en la imagen Ceboruco_NW, a nuevas imágenes (componentes) que no están correlacionadas unas con otras y que muestran una proporción de la variabilidad total, utilizando la matriz de covarianza (Ruiz-Armenta & Prol-Ledesma, 1998).

Tabla 10. Transformación de Componentes Principales de seis bandas Landsat TM de la imagen Ceboruco_NW para el mapeo de óxidos e hidroxilos.

Componente	C1	C2	C3	C4	C5	C6
% Varianza	87,93	6,92	4,35	0,48	0,27	0,06
Valor característico	1049,99	82,61	51,95	5,77	3,17	0,69
Vector característico 1	0,187620	-0,050919	-0,497262	-0,080153	0,811676	-0,222923
Vector característico 2	0,151704	0,052018	-0,369468	-0,120012	-0,020857	0,907158
Vector característico 3	0,294569	-0,017172	-0,569810	-0,402857	-0,553163	-0,346363
Vector característico 4	0,246801	0,923562	-0,039214	0,280994	-0,015542	-0,073386
Vector característico 5	0,795299	-0,094103	0,505228	-0,302567	0,101018	0,040463
Vector característico 6	0,401997	-0,364121	-0,186406	0,803974	-0,155924	-0,019490
Carga	C1	C2	C3	C4	C5	C6
CEB TM 1	0,841621	-0,064066	-0,496187	-0,026655	0,200001	-0,025632
CEB TM 2	0,867196	0,083405	-0,469806	-0,050858	-0,006549	0,132919
CEB TM 3	0,910127	-0,014882	-0,391621	-0,092274	-0,093881	-0,027430
CEB TM 4	0,688404	0,722564	-0,024331	0,058104	-0,002381	-0,005247
CEB TM 5	0,989219	-0,032831	0,139788	-0,027900	0,006902	0,001290
CEB TM 7	0,954494	-0,242499	-0,098453	0,141516	-0,020336	-0,001186

Del análisis de signo y magnitud de los vectores característicos de las componentes resultantes de las seis bandas de entrada, se tiene que la componente principal uno (C1) no revela rasgos espectrales significativos, dado que está compuesta por una mezcla positiva de todas las bandas, en este caso con una contribución mayor de la banda CEB TM 5 (0,795299). Además sintetiza la máxima variabilidad con el 87,93% de la varianza. Por lo tanto representa únicamente información debido a la topografía y al albedo (Loughlin, 1991).

La componente principal dos (C2) está dominada por la contribución de la banda CEB TM 4 (0,722564) y la CEB TM 3 (-0,014882). Dado que la vegetación presenta una reflectancia alta en la banda CEB TM 4, los píxeles con información acerca de la vegetación se presentan en tonos brillantes en esta componente (Figura 5.5).

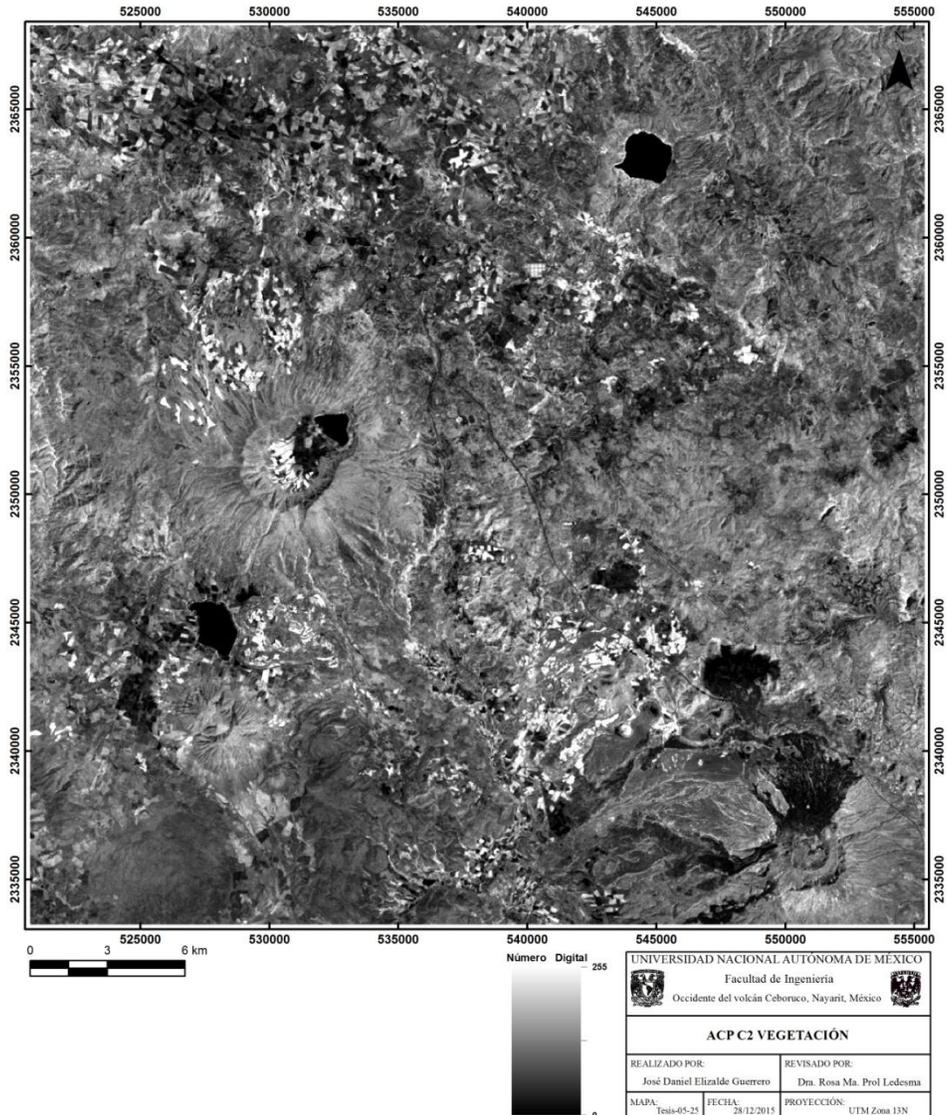


Figura 5.5 – Componente principal (C2) dominada por la contribución de la banda CEB TM 4 con deformación lineal del histograma y 1% de saturación. Los píxeles más brillantes representan las zonas con predominio de cubierta vegetal.

La componente principal tres (C3) está dominada por la contribución de la banda CEB TM 5 (0,139788) y la banda CEB TM 7 (-0,098453). Dado que los hidroxilos presentan una reflectancia alta en la banda CEB TM 5, los pixeles con información acerca de hidroxilos se presentan en tonos brillantes en esta componente (Figura 5.6). Los hidroxilos son mapeados también en tonos oscuros en la componente principal cuatro (C4) debido a la contribución positiva de la banda CEB TM 7 de (0,141516) y a la contribución negativa de la banda CEB TM 5 (-0,027900) (Ruiz-Armenta & Prol-Ledesma, 1998).

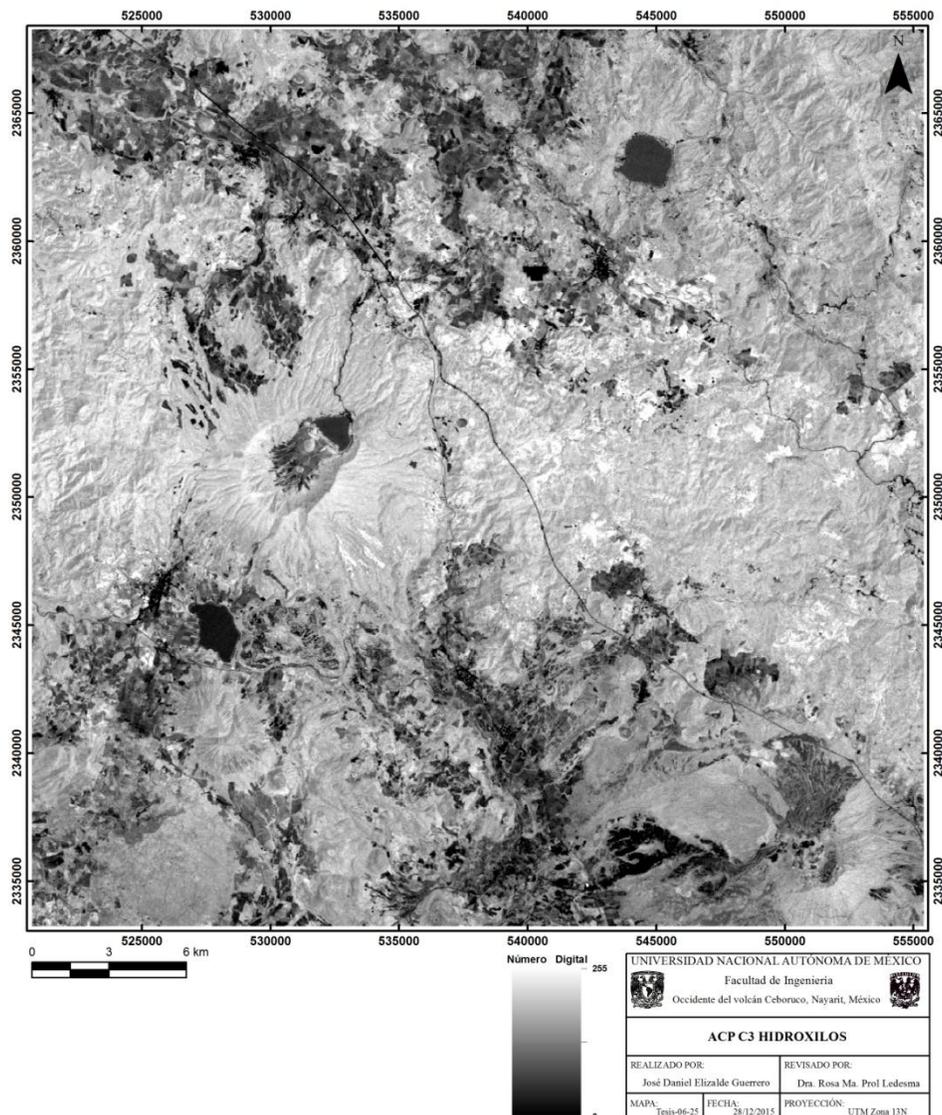


Figura 5.6 – Componente principal tres (C3) dominada por la contribución de la banda CEB TM 5. Se despliega con deformación lineal del histograma y 1% de saturación. Las zonas más brillantes muestran las áreas donde se tiene la presencia de hidroxilos.

En la componente principal cinco (C5) se observa que las cargas con una magnitud mayor, corresponden a la banda CEB TM 1 con el (0,200001) seguido por el (-0,093881) correspondiente a la banda CEB TM 3. De acuerdo a las características espectrales de los óxidos de hierro (Tabla 6), estos serán mapeados en tonos oscuros en C5. Para representar estos minerales en tonos brillantes se obtuvo la imagen inversa de C5 (Figura 5.7).

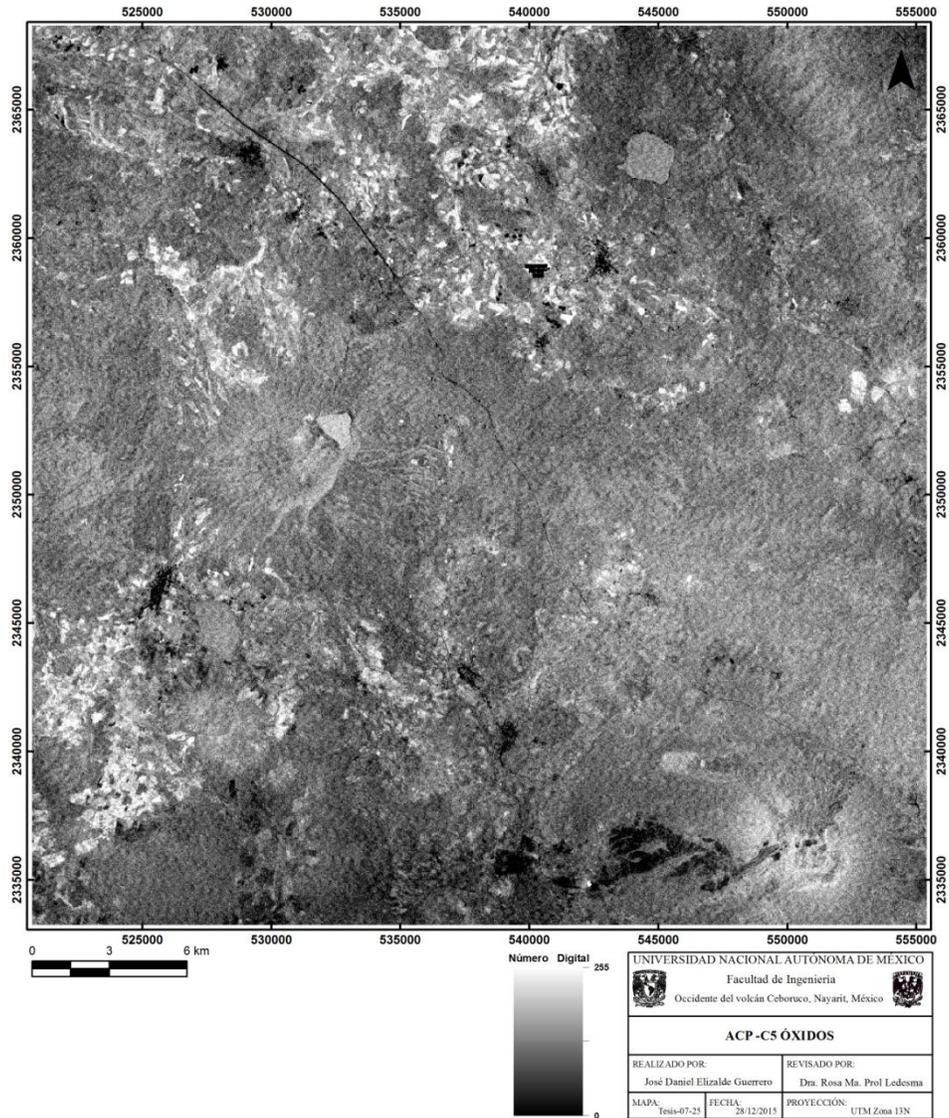


Figura 5.7 – Para representar los óxidos de hierro en tonos brillantes se obtuvo la imagen inversa de C5. Se despliega con deformación lineal del histograma y 1% de saturación. Las zonas más brillantes muestran las áreas donde se tiene la presencia de óxidos.

Una vez obtenidas las dos componentes principales para la identificación de óxidos e hidroxilos se realizó un realce de contraste a la suma de las imágenes obtenidas del análisis de componentes principales, con el fin de resaltar en la misma imagen ambos grupos minerales (Loughlin, 1991). La Figura 5.8 muestra en tonos brillantes las zonas con alteración hidrotermal.

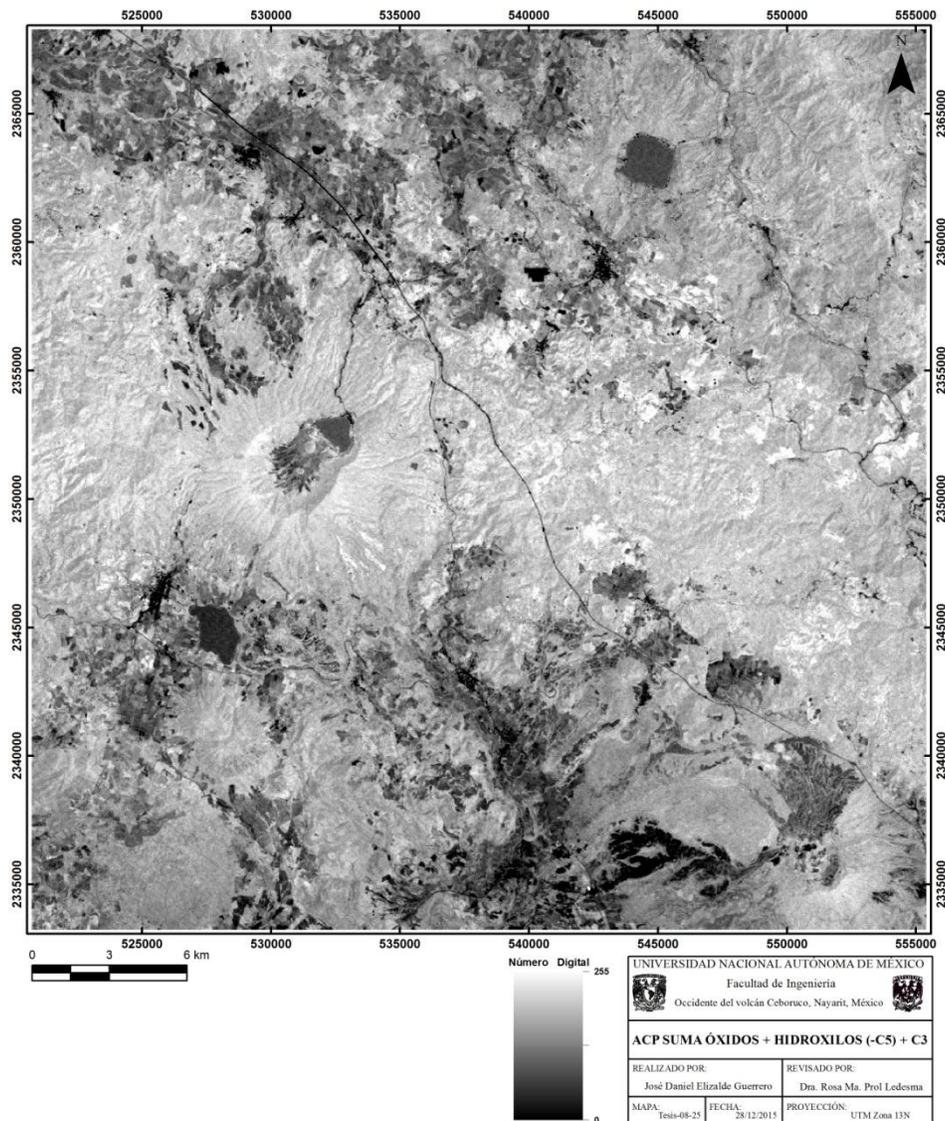


Figura 5.8 – Suma de las componentes de óxidos más hidroxilos y con deformación lineal del histograma y 1% de saturación. Las zonas más brillantes muestran las áreas donde se tiene la presencia de ambos minerales.

Las cargas para la componente principal seis (C6) son (0,132919) para la banda CEB TM 2, (-0,027430) para la banda CEB TM 3, por lo tanto esta componente representa los óxidos (hematita) en tonos oscuros, con base en los rasgos espectrales característicos de este mineral en la Tabla 6 (Ruiz-Armenta & Prol-Ledesma, 1998).

5.3.3 Técnica de Crosta

5.3.3.1 Hidroxilos

Para el mapeo de hidroxilos se eligieron las bandas CEB TM 1, CEB TM 4 y CEB TM 5 y CEB TM 7 de acuerdo a las características de reflectancia enunciadas en la Tabla 6.

La Tabla 11 describe la transformación de componentes principales de la bandas 1, 4, 5 y 7 de la imagen Ceboruco_NW. De la magnitud y signo (positivo o negativo) de los vectores característicos se tiene que la componente principal uno (CP1) representa vectores característicos positivos en todas las bandas. El valor característico (937,93) de la CP1 representa el 89,15% de la varianza de los datos por lo que puede ser interpretada como el efecto topográfico y el albedo de las imágenes originales.

Tabla 11. Análisis de componentes principales para identificar hidroxilos.

Componente	CP1	CP2	CP3	CP4
% Varianza	89,15	7,83	2,57	0,45
Valor característico	937,93	82,37	27,07	4,68
Vector característico 1	0,191881	-0,055706	0,758912	0,619783
Vector característico 2	0,260124	0,924680	0,177126	-0,214310
Vector característico 3	0,846622	-0,088678	-0,446162	0,276237
Vector característico 4	0,422787	-0,366060	0,440021	-0,702590
Carga	CP1	CP2	CP3	CP4
CEB TM 1	0,813512	-0,069988	0,546648	0,185679
CEB TM 4	0,685756	0,722393	0,079334	-0,039923
CEB TM 5	0,995278	-0,030893	-0,089111	0,022947
CEB TM 7	0,948778	-0,243437	0,167765	-0,111413

Las cargas de la componente principal dos (CP2) indican que dicha componente está dominada por la vegetación debido al valor de 0,722393 del vector característico de la banda CEB TM 4. El signo positivo indica que los pixeles influenciados por la vegetación aparecerán brillantes.

De los valores de las cargas de las bandas CEB TM 5 y CEB TM 7 en la componente principal tres (CP3) se tiene que los pixeles influenciados por la presencia de hidroxilos se presentan en tonos oscuros debido al valor negativo y magnitud de la carga del vector característico en CEB TM 5 (-0,089111) y a la magnitud positiva de la banda CEB TM 7 (0,167765). En la componente principal cuatro (CP4) algunas de las bandas contribuyen en proporciones balanceadas como en CP1.

En los rangos de longitud de onda de las bandas CEB TM 5 y CEB TM 7, se encuentra el rasgo de reflectancia máxima y mínimo de la alunita respectivamente (Ruiz-Armenta & Prol-Ledesma, 1998). Esta diferencia se muestra en la CP3 con base en el signo negativo y positivo de la matriz de carga de los eigenvectores. Para representar los hidroxilos (como la alunita) en tonos brillantes se obtuvo la inversa de la CP3 (Fig. 5.9).

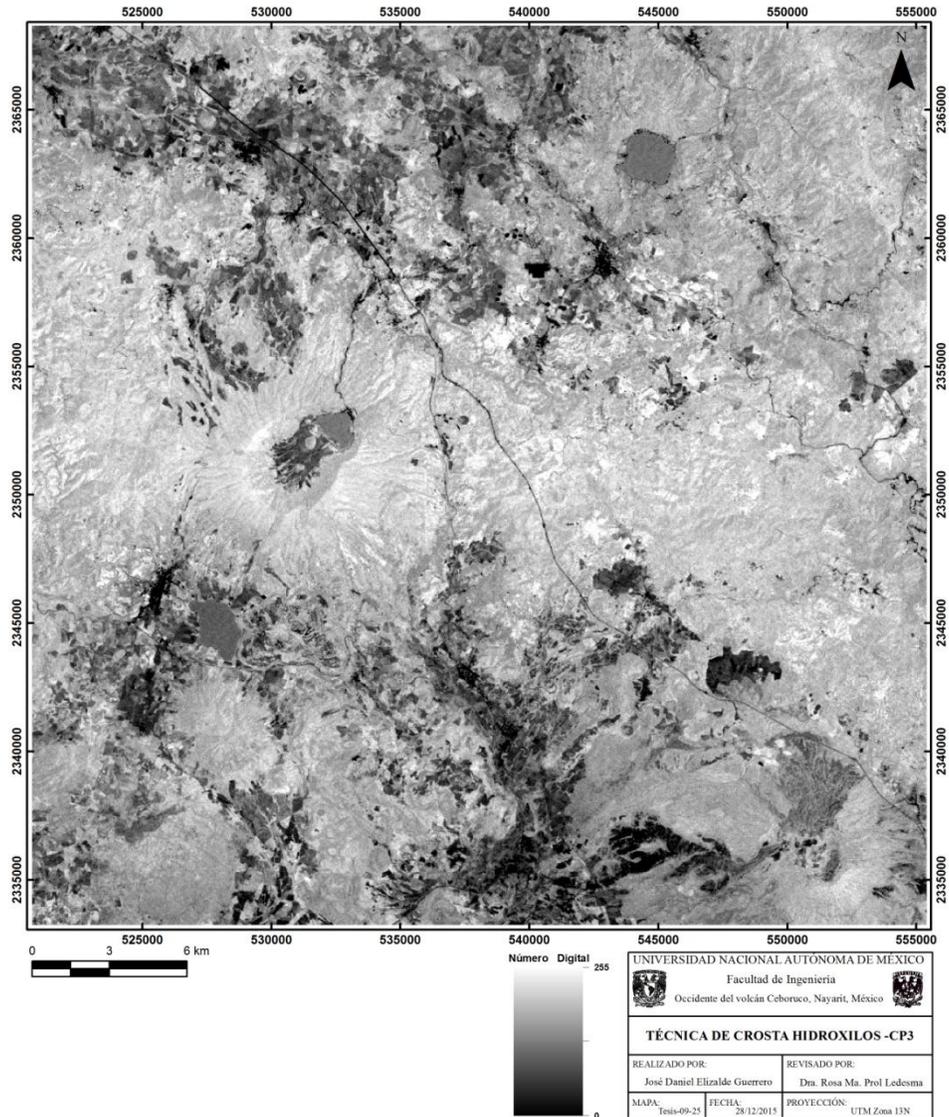


Figura 5.9 – En la imagen se muestra la componente que contienen hidroxilos con deformación lineal del histograma y 1% de saturación. Las zonas más brillantes muestran las áreas donde se tienen hidroxilos como la alunita.

5.3.3.2 Óxidos

Para el mapeo de óxidos de hierro se eligieron las bandas CEB TM 1, CEB TM 3 y CEB TM 5 de acuerdo a las características de reflectancia enunciadas en la Tabla 6, además de la banda CEB TM 4, porque esta es representativa de la vegetación.

La Tabla 12 describe la transformación de componentes principales de la bandas 1, 3, 4 y 5 de la imagen Ceboruco_NW. De la magnitud y signo (positivo o negativo) de los

vectores característicos se tiene que la componente principal uno (CP1) representa vectores característicos positivos en todas las bandas. El valor característico (860,05) de la CP1 representa el 88,14% de la varianza de los datos por lo que puede ser interpretada como el efecto topográfico y el albedo de las imágenes originales.

Tabla 12. Análisis de componentes principales para identificar óxidos.

Componente	CP1	CP2	CP3	CP4
% Varianza	88,14	7,26	4,26	0,33
Valor característico	860,05	70,88	41,61	3,26
Vector característico 1	0,201885	-0,024018	0,603404	0,771083
Vector característico 2	0,320021	-0,001564	0,703611	-0,634441
Vector característico 3	0,285726	0,952660	-0,098812	0,032190
Vector característico 4	0,880449	-0,303084	-0,362038	0,043349
Carga	CP1	CP2	CP3	CP4
CEB TM 1	0,819622	-0,027994	0,538818	0,192644
CEB TM 3	0,894876	-0,001256	0,432755	-0,109175
CEB TM 4	0,721300	0,690429	-0,054866	0,005001
CEB TM 5	0,991141	-0,097951	-0,089642	0,003003

Las cargas de los vectores característicos de la componente principal dos (CP2) indican que dicha componente está dominada por la vegetación debido al valor de 0,690429 del vector característico de la banda CEB TM 4. El signo positivo indica que los píxeles influenciados por la vegetación aparecerán brillantes.

La componente principal tres (CP3) describe las diferencias entre las bandas del visible (CEB TM 1 y CEB TM 3) y las bandas del infrarrojo (CEB TM 4 y CEB TM 5). Los materiales con una alta reflectancia en la región del visible aparecerán en tonos brillantes en CP3 debido al signo positivo de los vectores característicos en CEB TM 1 y CEB TM 3 y aquellos que presentan una alta reflectancia en la región del infrarrojo aparecerán en tonos oscuros debido al signo negativo de los vectores característicos de las bandas CEB TM 4 y CEB TM 5 (Ruiz-Armenta & Prol-Ledesma, 1998).

De los vectores característicos de la cuarta componente (CP4) se tiene que la contribución de CEB TM 4 y CEB TM 5 es mínima en comparación con las cargas de los vectores característicos de las bandas CEB TM 1 y CEB TM 3 de 0,192644 y -0,109175 respectivamente. Las magnitudes de CEB TM 1 y CEB TM 3 son opuestas en signo por lo que se infiere que los óxidos con una alta reflectancia en CEB TM 3 y absorción en CEB TM 1 estarán representados en tonos oscuros debido al signo negativo en CEB TM 3 y al signo positivo en CEB TM 1 (Ruiz-Armenta & Prol-Ledesma, 1998). Para representar los óxidos de hierro en tonos brillantes se obtuvo la inversa de la CP4 (Fig. 5.10).

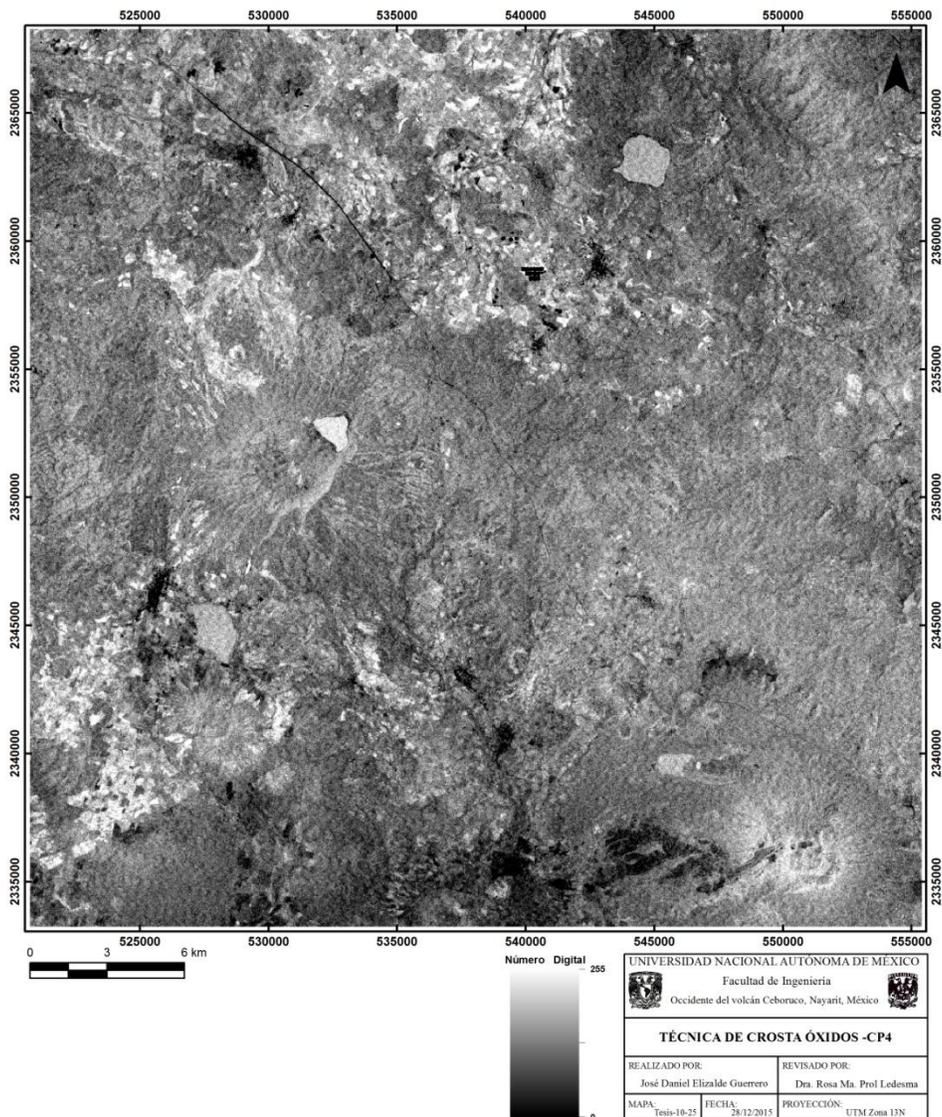


Figura 5.10 – En la imagen se muestra la componente que contiene óxidos con 1% de saturación. Las zonas más brillantes muestran las áreas donde se tienen óxidos.

Para el mapeo de alteración se sumaron las imágenes de las componentes principales que contienen óxidos e hidroxilos de la técnica de Crosta para producir la imagen O+OH en la que los pixeles con concentraciones anómalas de ambos grupos de minerales están representadas por tonos brillantes en la Figura 5.11

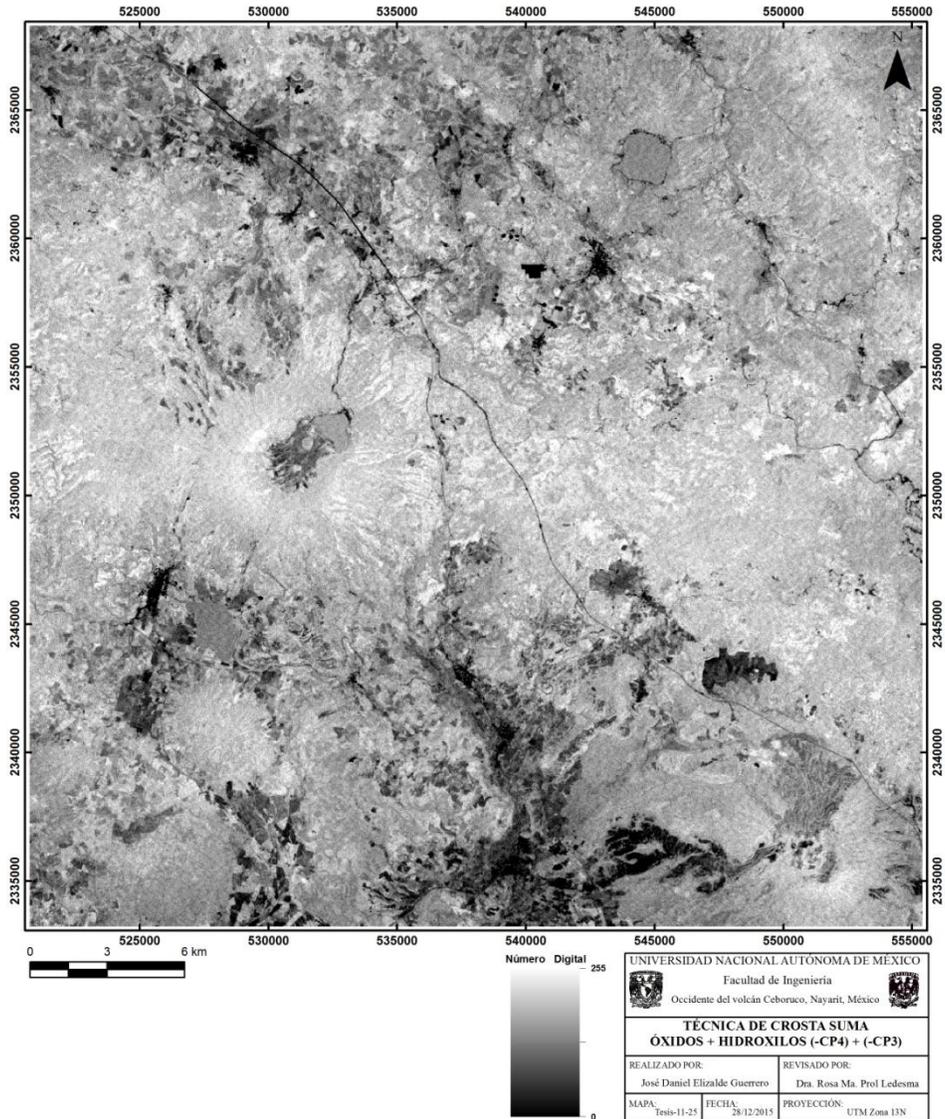


Figura 5.11 – En la imagen se muestra la suma de componentes dirigidas para resaltar óxidos e hidroxilos con deformación lineal del histograma y 1% de saturación. Las zonas más brillantes muestran las áreas donde se tiene la presencia de ambos minerales.

5.3.4 Composiciones en falso color

Se resalta en el color primario rojo el material a identificar, por lo tanto en el cañón del rojo se colocaron las bandas con el rasgo característico de alta reflectancia. Además tienen un realce de contraste del 1% únicamente para mejorar la visualización.

La Figura 5.12 muestra la composición en falso color para resaltar óxidos, vegetación e hidroxilos a partir de los cocientes de bandas CEB TM 3/1, CEB TM 4/3 y CEB TM 5/7, que se despliegan en el color rojo, verde y azul, respectivamente.

La contribución de los cocientes CEB TM 3/1 y CEB TM 5/7 se observa en color magenta (rojo y azul) para resaltar óxidos e hidroxilos. En color cian (verde y azul) se observa la contribución de la vegetación junto con la de los hidroxilos.

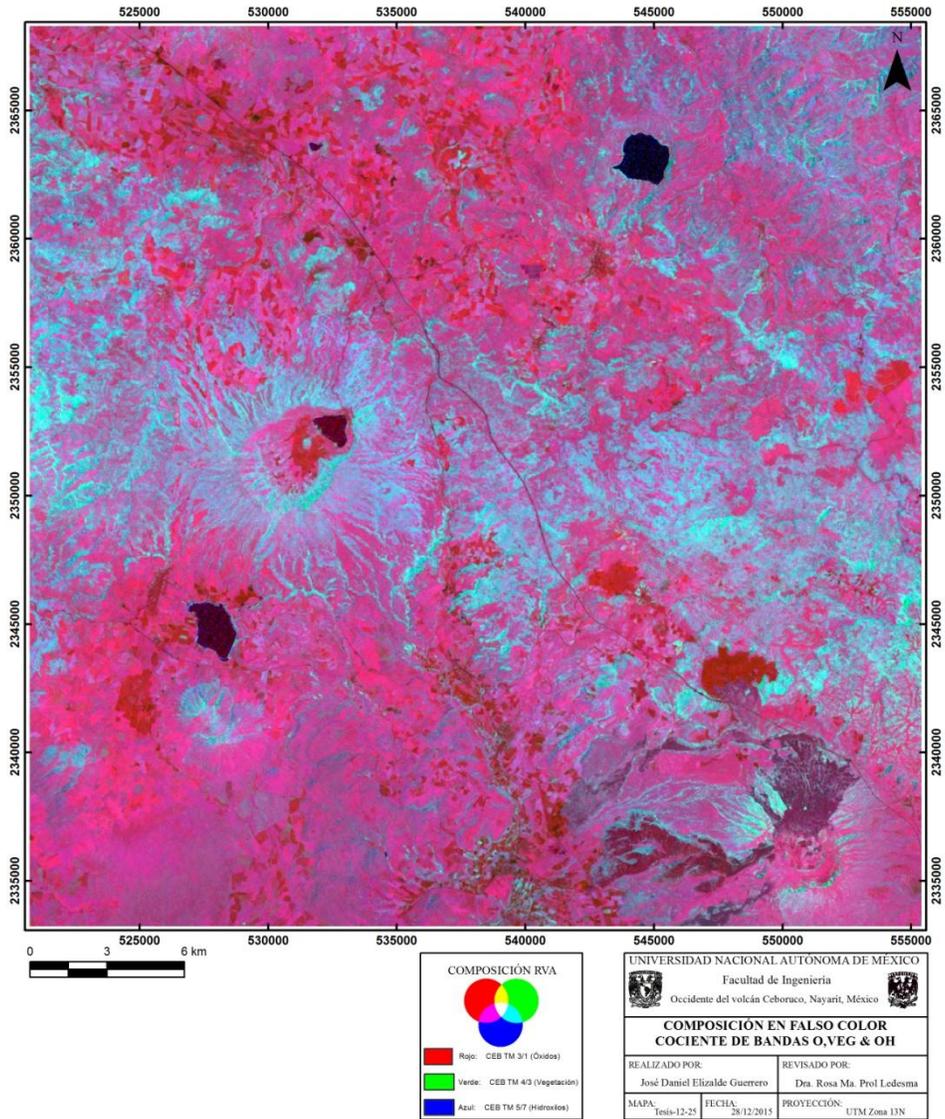


Figura 5.12 – En la imagen se muestra la composición en falso color del cociente de bandas. Se despliega en el cañón del rojo los óxidos (CEB TM 3/1), en el verde la vegetación (CEB TM 4/3) y en el azul los hidroxilos (CEB TM 5/7), (R: O, V: Vegetación, A: OH). La composición se hizo aplicando un ajuste lineal con saturación de 1%.

La Figura 5.13 muestra la composición en falso color para resaltar óxidos e hidroxilos a partir de los cocientes de bandas CEB TM 3/1, CEB TM 5/7 y de la suma de ambos, se despliegan en el rojo, verde y azul, respectivamente.

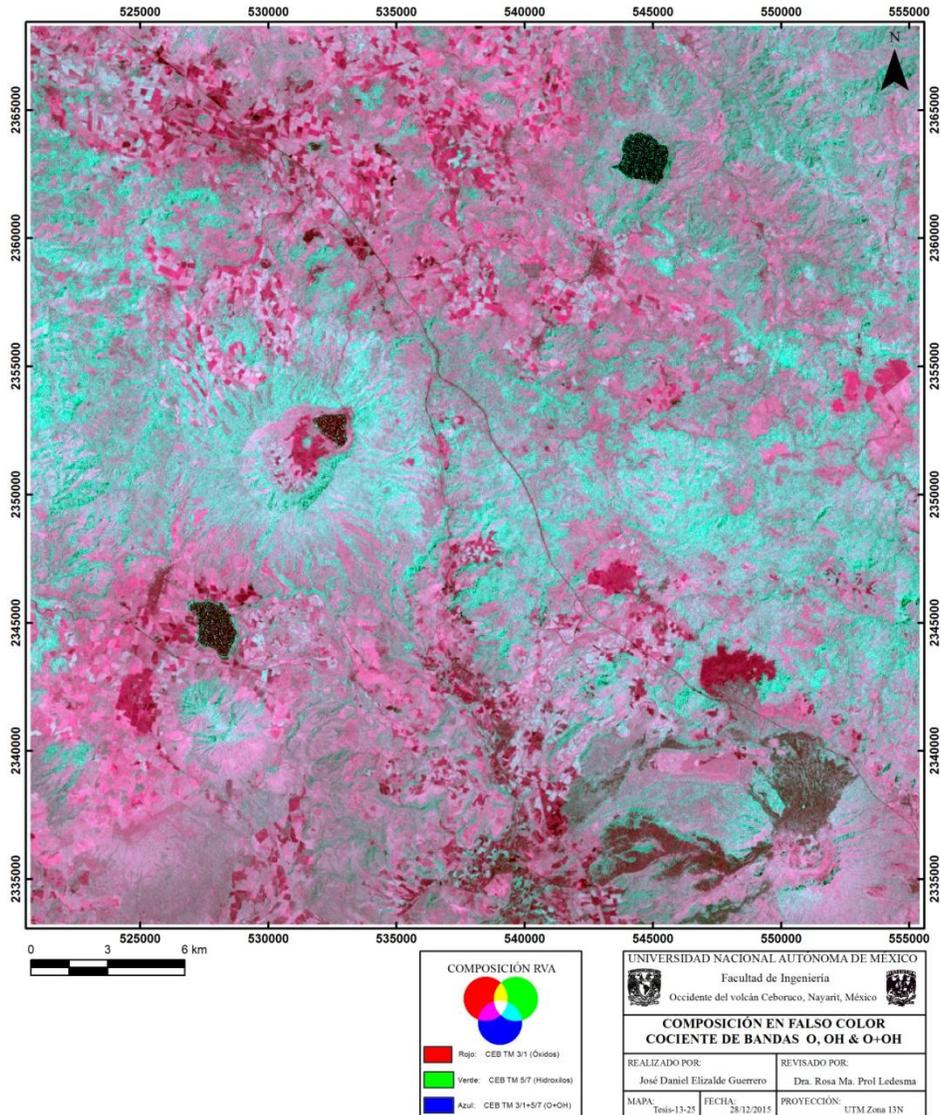


Figura 5.13 – En la imagen se muestra la composición en falso color de la suma de los cocientes de banda. Rojo: CEB TM 3/1 (Óxidos), Verde: CEB TM 5/7 (Hidroxilos), Azul: CEB TM 3/1 + CEB TM 5/7 (O+OH). La composición se hizo aplicando un ajuste lineal con saturación de 1%.

Las zonas que contienen óxidos e hidroxilos se observan en color magenta. En cian se observa la contribución del cociente CEB TM 5/7 para resaltar hidroxilos y la suma de ambos grupos minerales.

La Figura 5.14 muestra la composición en falso color para resaltar hidroxilos, vegetación, y óxidos, a partir de las componentes principales C3, C2 y la inversa de C5, que se despliegan en el azul, verde y rojo respectivamente.

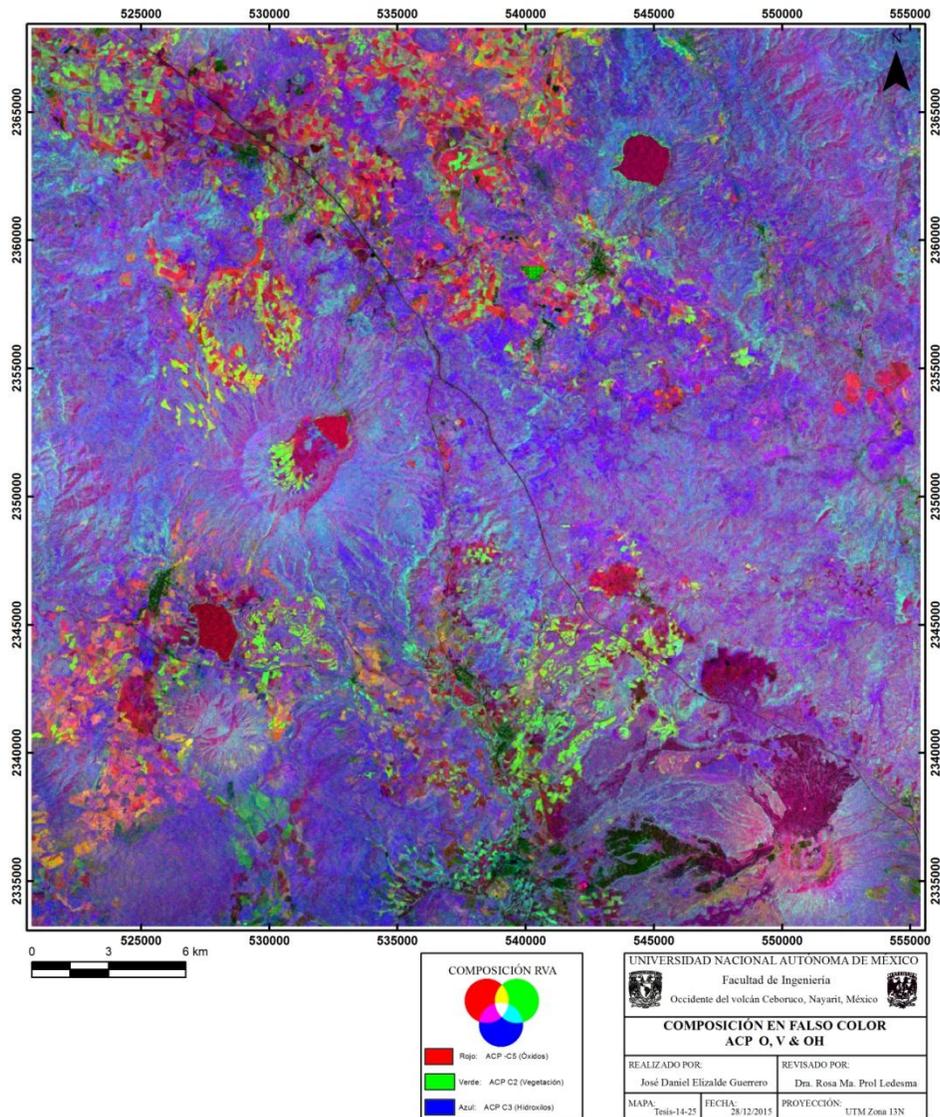


Figura 5.14 – En la imagen se muestra la composición en falso color del ACP. Rojo: -C5 (Óxidos), Verde: C2 (Vegetación), A: C3 (Hidroxilos). La composición se hizo aplicando un ajuste lineal con saturación de 1%.

Se observa en color magenta (rojo y azul) la contribución de las componentes principales C2 e inversa de C5 para resaltar óxidos e hidroxilos, respectivamente. En cian se observa la contribución de la vegetación junto con la de los hidroxilos.

La imagen resultante de la composición en falso color para resaltar óxidos e hidroxilos a partir de las componentes principales C3 e inversa de C5 y la suma de ambas es similar al de la técnica de Crosta, por ello sólo se muestra la imagen resultante de este segundo análisis.

A partir de la técnica de Crosta, los óxidos e hidroxilos son mapeados en la inversa de las componentes principales C4 y C3 respectivamente. La composición en falso color de la Figura 5.15 de estas dos componentes principales muestra la contribución de óxidos de hierro en tonos rojos, hidroxilos en tonos verdes y la contribución de ambos grupos de minerales se muestra en tonos magenta (rojo y azul). En tonos claros y grises se observa la contribución similar de ambos grupos minerales

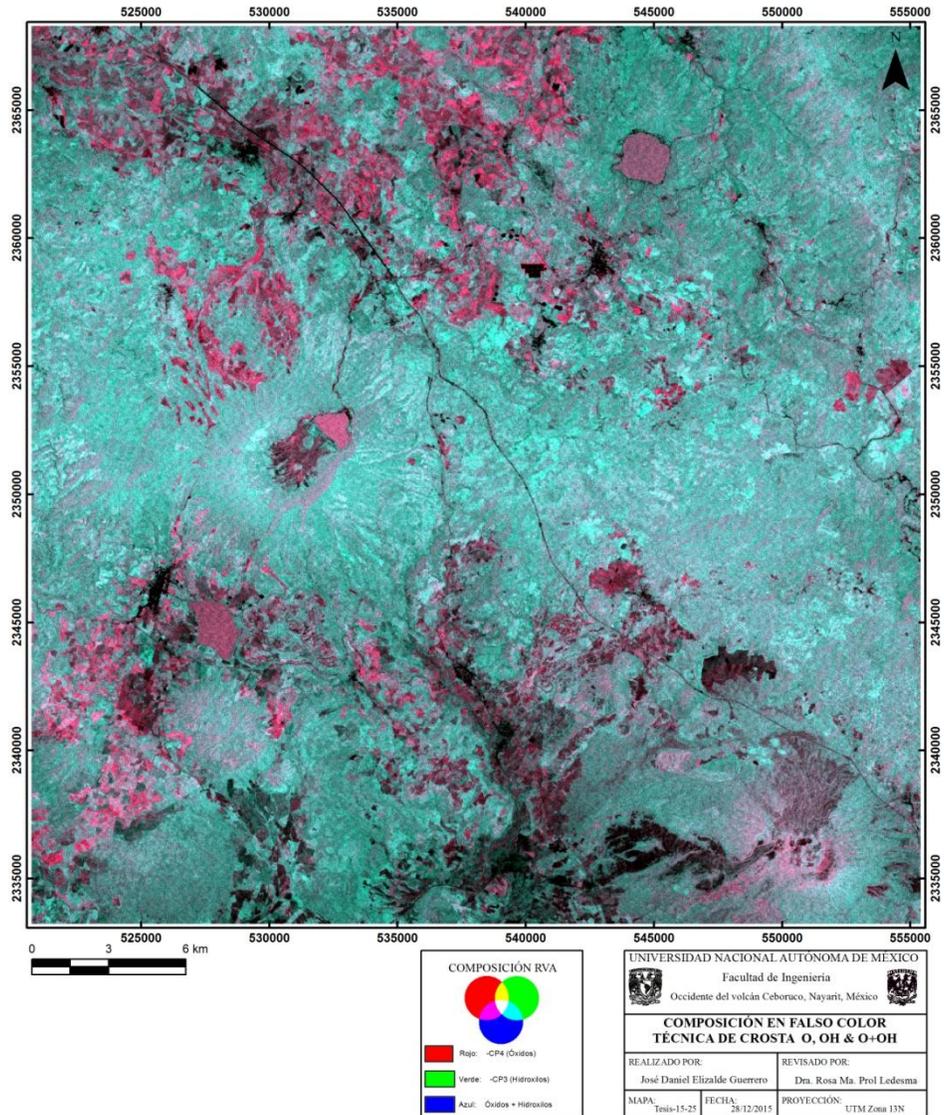


Figura 5.15 – En la imagen se muestra la composición en falso color de la suma de la técnica de Crosta. Rojo: -CP4 (Óxidos), Verde: -CP3 (Hidroxilos), Azul: -CP4 + (-CP3) (O+H). La composición se hizo aplicando un ajuste lineal con saturación de 1%.

5.4 Realce espacial

A partir de la metodología de realce espacial propuesta por Moore & Waltz (1983) aplicada sobre la componente principal C1, se hicieron más visibles las estructuras en el área de estudio, como se observa en la Figura 5.16.

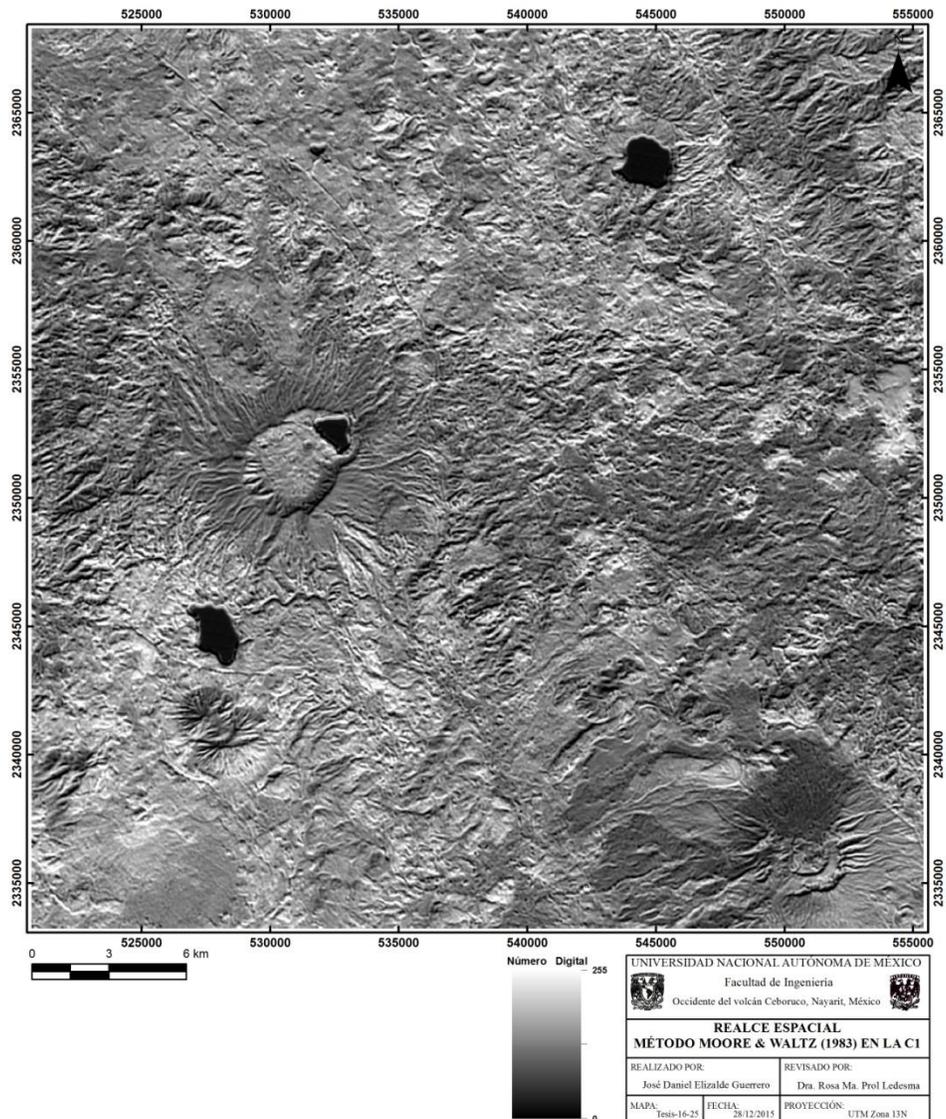


Figura 5.16 – En la imagen se muestra el realce espacial sobre la componente principal C1 (albedo) siguiendo la metodología propuesta por Moore & Waltz (1983), presenta además un ajuste lineal con saturación de 1%. Se observan estructuras volcánicas como el volcán Ceboruco (inferior izquierda), el domo San Pedro (inferior derecha) y el volcán Tepetitlic (mitad del lado izquierdo).

Una vez aplicado el realce espacial de lineamientos mediante filtros digitales espaciales de acuerdo a la metodología propuesta por Moore y Waltz (1983) sobre la C1, se compararon con los resultados obtenidos del análisis del modelo digital del terreno con iluminación artificial y fue posible identificar patrones y lineamientos en ciertas direcciones. La Figura 5.17 muestra los lineamientos con dirección Norte-Sur, como ejemplo de este proceso de realce espacial.

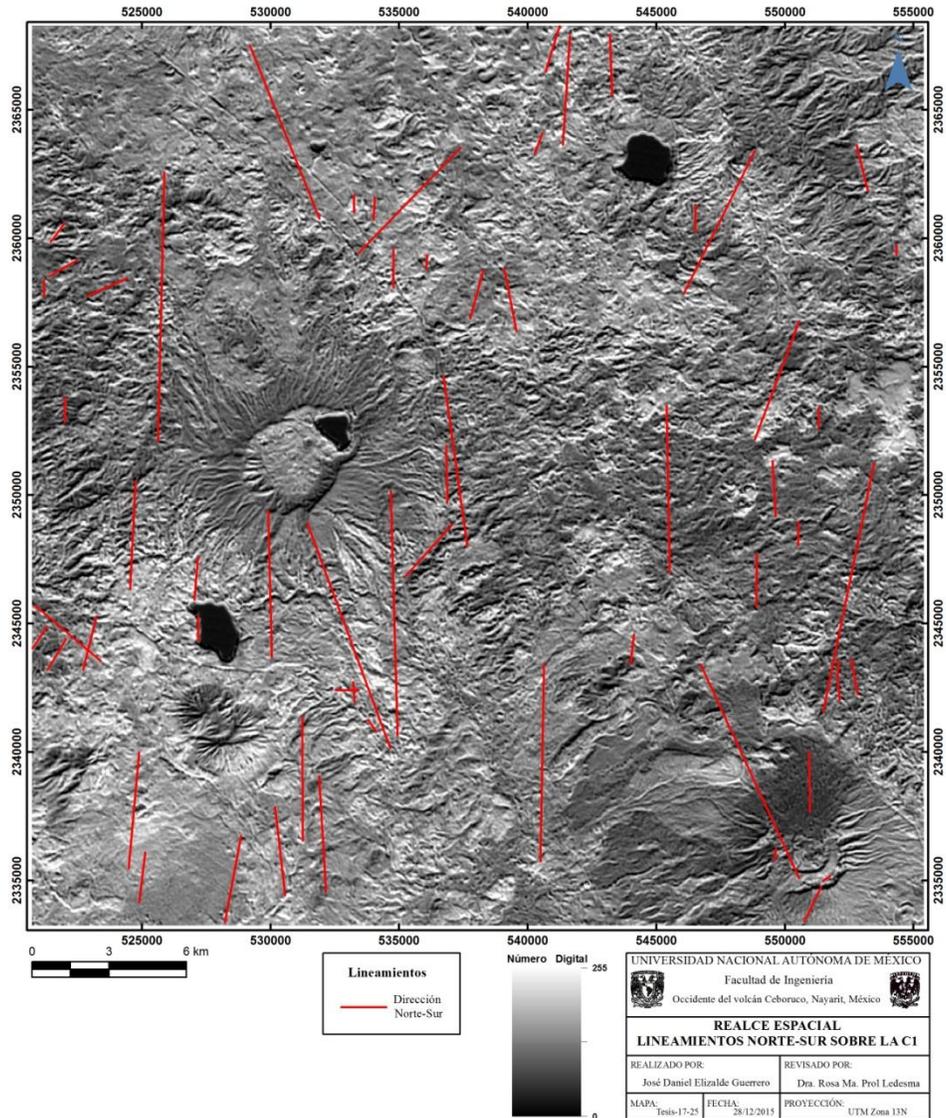


Figura 5.17 – En la imagen se muestran solo los lineamientos con dirección Norte-Sur en color rojo usando la componente uno (C1).

La Figura 5.18 muestra algunas de las fracturas y fallas cartografiadas por el Servicio Geológico Mexicano (SGM) en el área de estudio y los lineamientos definidos manualmente en las direcciones Norte-Sur, NE-SW, Este-Oeste y NW-SE a diferentes escalas de la imagen Ceboruco_NW.

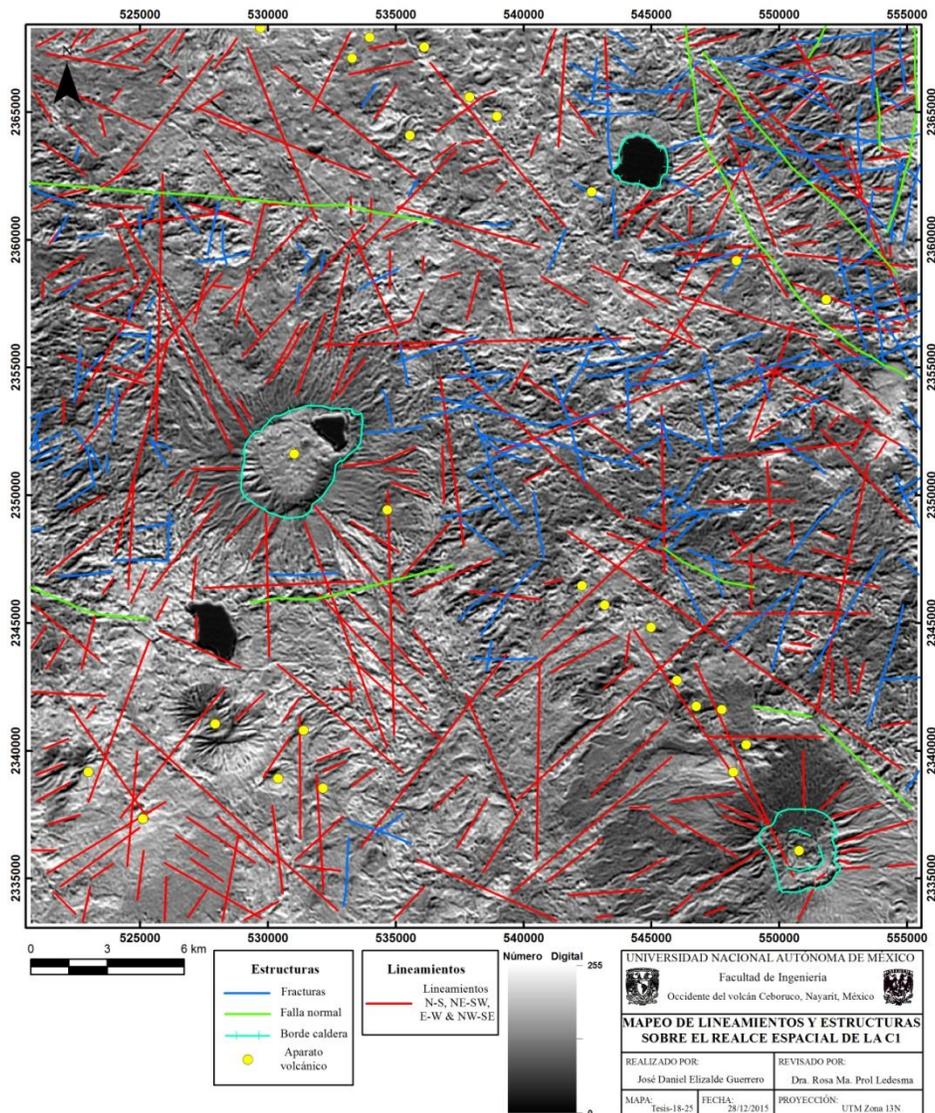


Figura 5.18 – En la imagen se muestran los lineamientos en las distintas direcciones en color rojo usando la C1 y estructuras cartografiadas por el SGM como fracturas, fallas normales, bordes de caldera y aparatos volcánicos.

5.5 Integración de la información espacial

Los mapas integrados se muestran en las Figuras 5.19 a 5.22 en ellos se hizo la integración de los lineamientos, las estructuras del SGM y las composiciones en falso color descritas anteriormente. Además en la Figura 5.22 se señalan en recuadros color amarillo las zonas en las que se ha identificado la presencia de minerales típicos de alteración hidrotermal y el conjunto de la demás información espacial.

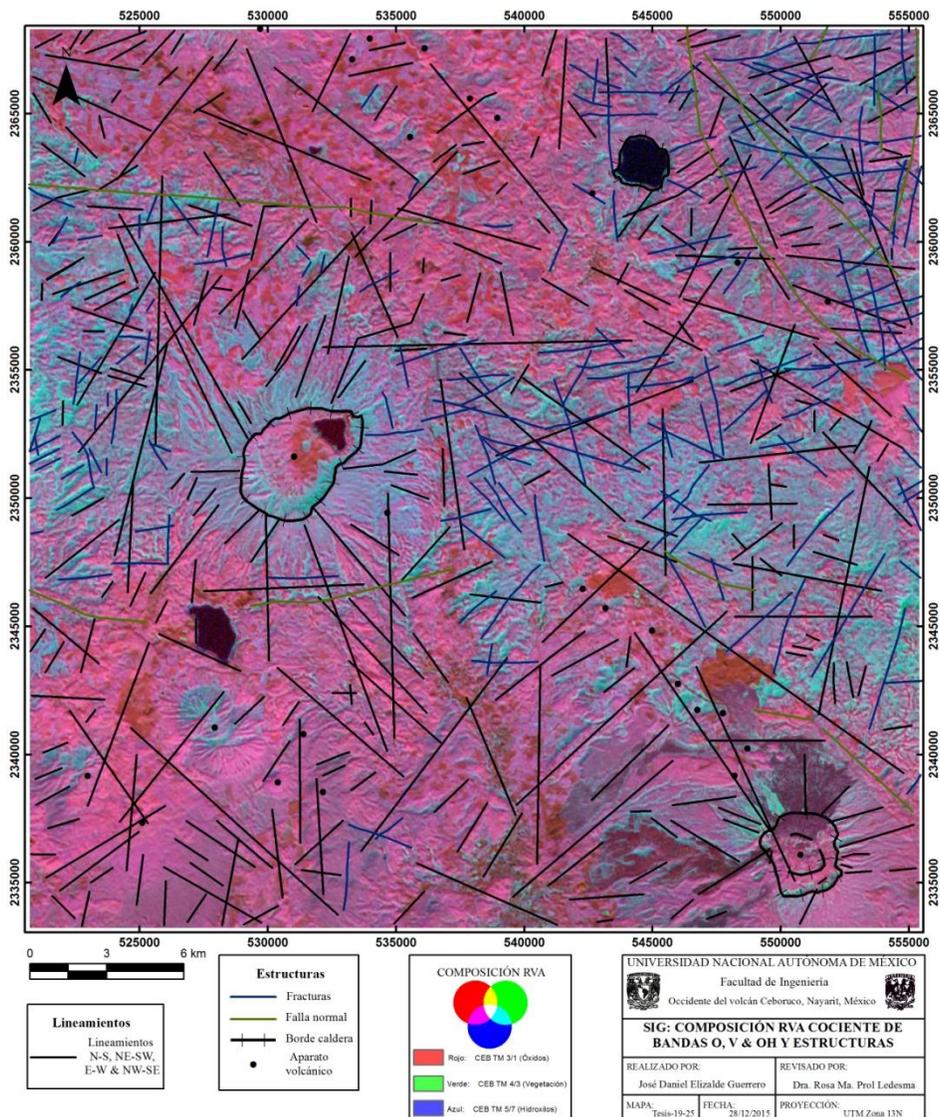


Figura 5.19 – En la imagen se muestra la integración de los lineamientos en color negro, las estructuras del SGM en azul, la imagen del realce espacial de la componente uno y la composición en falso color del cociente de bandas de acuerdo al

siguiente arreglo, rojo: CEB TM 3/1 (Óxidos), verde: CEB TM 4/3 (Vegetación) y azul: CEB TM 5/7 (Hidroxiolos). La composición se hizo aplicando un ajuste lineal con saturación de 1%.

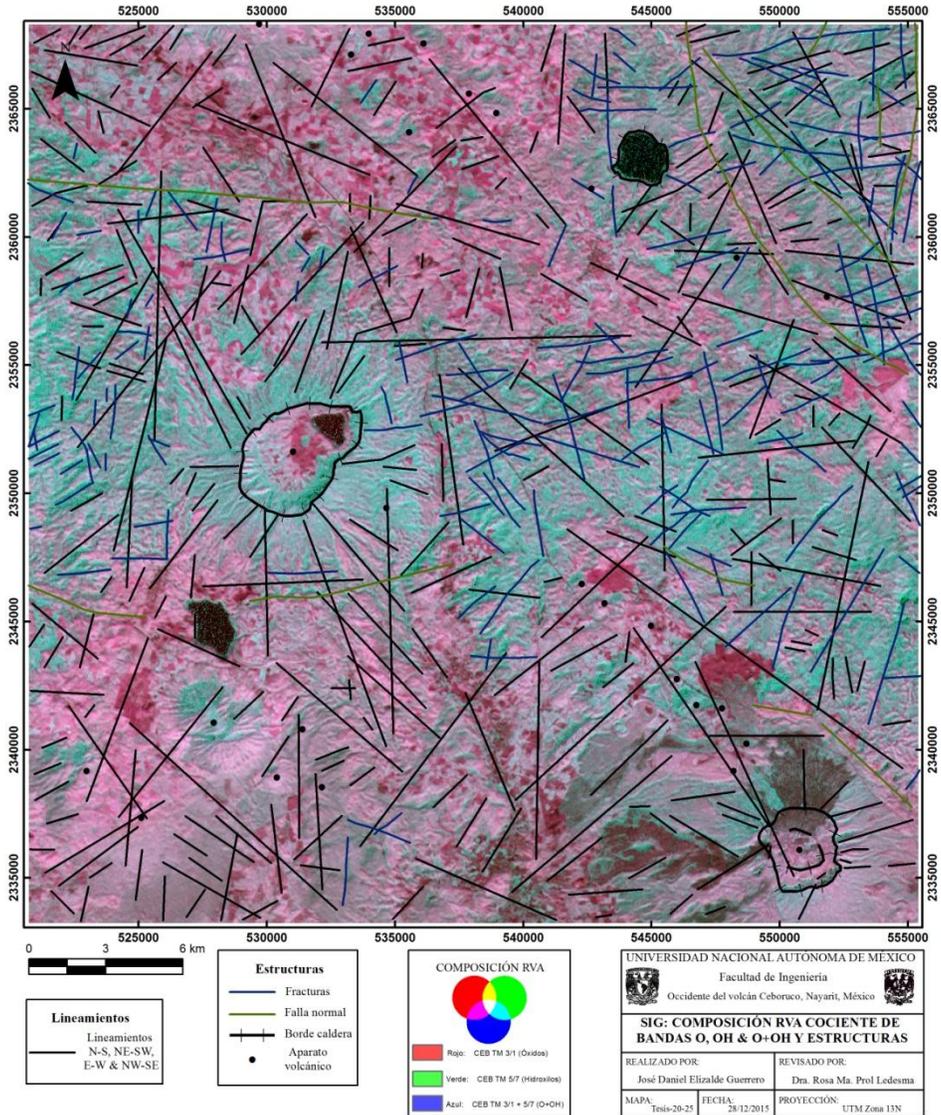


Figura 5.20 – En la imagen se muestra la integración de los lineamientos en color negro, las fracturas del SGM en color azul, la imagen del realce espacial de la componente uno y la composición en falso color de la suma de los cocientes de banda con el siguiente arreglo, rojo: CEB TM 3/1 (Óxidos), verde: CEB TM 5/7 (Hidroxiolos) y azul: CEB TM 3/1+CEB TM 5/7 (O+OH). La composición se hizo aplicando un ajuste lineal con saturación de 1%.

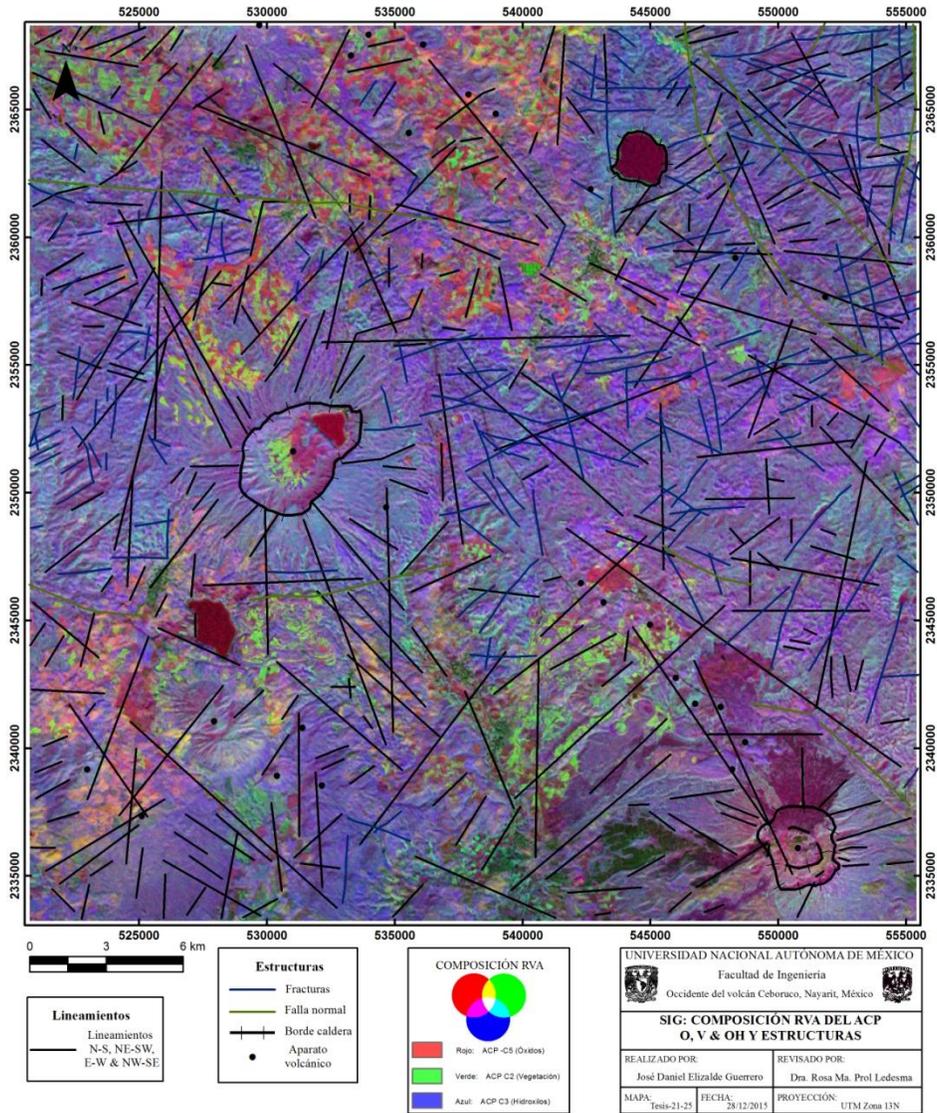


Figura 5.21 – En la imagen se muestra la integración de los lineamientos en color negro, las fracturas del SGM en azul, la imagen del realce espacial de la componente uno y la composición en falso color del ACP con el siguiente arreglo, rojo: -C5 (Óxidos), verde: C2 (Vegetación) y azul: C3 (Hidroxiolos). La composición se hizo aplicando un ajuste lineal con saturación de 1%.

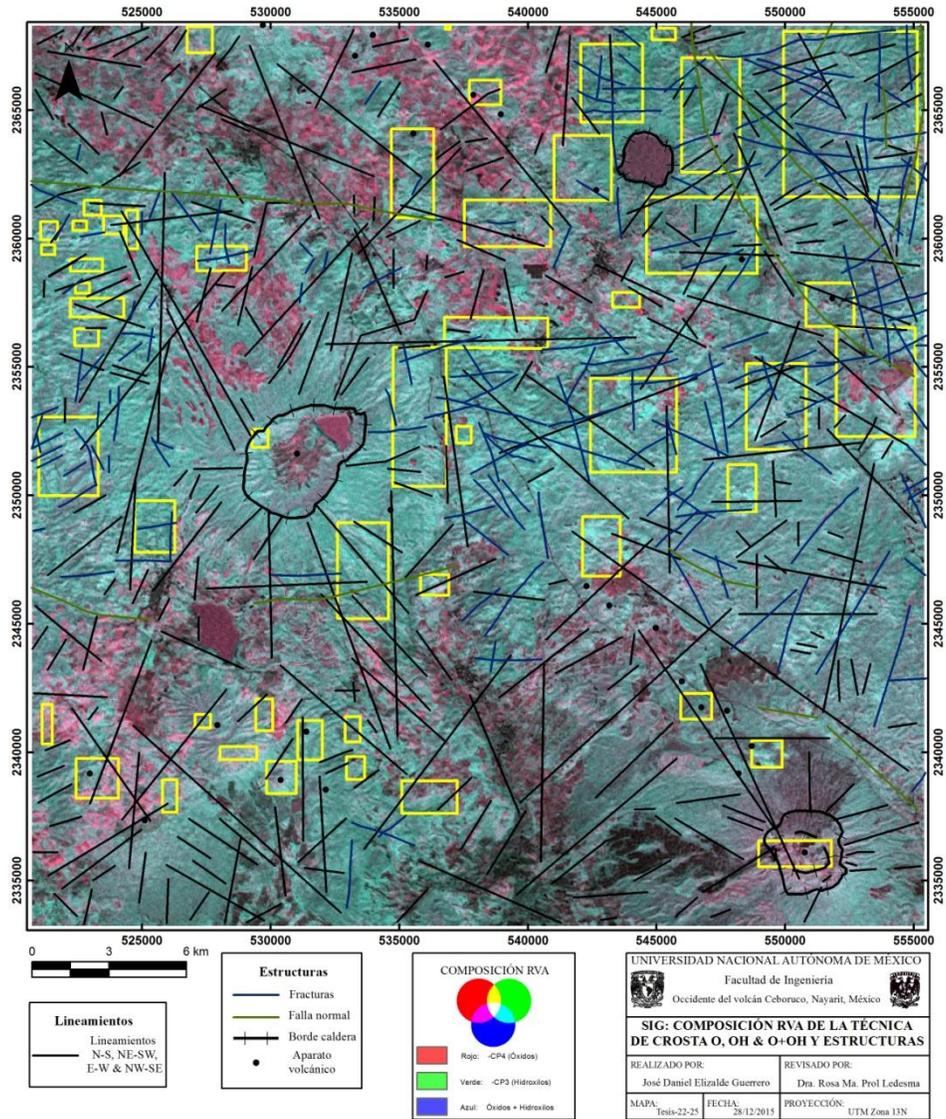


Figura 5.22 – La imagen muestra la integración de los lineamientos en color negro, las fracturas del SGM en color azul, la imagen del realce espacial de la componente uno y la composición en falso color de la suma del Método de Crosta de acuerdo al siguiente arreglo, rojo: -CP4 (Óxidos), verde: -CP3 (Hidroxiolos) y azul: Óxidos más Hidroxiolos (O+OH). La composición se hizo aplicando un ajuste lineal con saturación de 1%.

6. DISCUSIÓN

Se realizó el cociente de las bandas CEB TM 4 / CEB TM 3 para destacar la vegetación en tonos blancos porque la banda CEB TM 4 corresponde al infrarrojo cercano y contiene la información de alta reflectancia de la vegetación. Este resultado es importante porque permite conocer cuánto afectará la reflectancia de la vegetación en las demás técnicas (Fig. 5.1).

Se efectuó el cociente de las bandas CEB TM 3 / CEB TM 1 para destacar los óxidos de hierro en tonos brillantes porque la banda CEB TM 3 corresponde al rojo y contiene la información de alta reflectancia de los óxidos. Este resultado es importante ya que permite aislar algunas zonas de interés (Fig. 5.2).

Se generó el cociente de las bandas CEB TM 5 / CEB TM 7 para destacar los hidroxilos en tonos brillantes porque la banda CEB TM 5 corresponde al infrarrojo medio y contiene la información de alta reflectancia de hidroxilos. La distribución espacial de este material es parecida a la vegetación, es posible que el rasgo de alta reflectancia de la vegetación en ambas bandas esté afectando la identificación de los hidroxilos (Fig. 5.3).

Se ejecutó la suma de los cocientes CEB TM 3/1 y CEB TM 5/7 para resaltar óxidos de hierro e hidroxilos en colores blancos y disminuir la alta reflectancia de la vegetación para esta zona que se mostró en colores oscuros (Fig. 5.4). Es posible que en esta suma, el cociente CEB TM 5/7 contribuya más, ya que no se observan los pixeles brillantes identificados en la Figura 5.2 para óxidos, aunque se notan algunos pixeles brillantes en la esquina superior derecha de la Figura 5.4.

Las imágenes monocromáticas que muestran contribución de óxidos de hierro e hidroxilos generadas con el ACP y la técnica de Crosta son fáciles de interpretar porque en estas imágenes dichas contribución están representadas por pixeles brillantes (Fig. 5.5 a Fig. 5.11). Sin embargo, las imágenes a color son más útiles para discriminar los materiales presentes en el terreno (Loughlin, 1991).

El muestreo de múltiples longitudes de onda es muy importante para la identificación de características y diferentes tipos de cobertura del suelo. A pesar del ancho de banda del

sensor TM, el instrumento resulta útil en el mapeo de minerales. Una composición a color de las bandas multiespectrales separadas con colores RVA, es la forma más común de mostrarlo (Mutua *et al.* 2011). Se resaltó en color rojo el material a identificar, por lo tanto en el cañón de este color se colocaron las bandas con el rasgo característico de alta reflectancia, porque es el que interesa identificar.

Se realizó la composición RVA de los cocientes de bandas CEB TM 3/1, 4/3 y 5/7 para resaltar en colores rojos y azules los óxidos e hidroxilos ya que estos materiales presentan características de reflectancia espectral en los cocientes colocados con este arreglo, aunque la vegetación con bajo vigor presenta también este rasgo espectral en el azul, de acuerdo a la Tabla 6. En esta imagen es complicado diferenciar las zonas que contienen minerales típicos de alteración hidrotermal de zonas cubiertas con vegetación, porque no se observan píxeles en color verde, sino en color cian y magenta, por tanto es posible que la vegetación influya en el cociente para resaltar los óxidos e hidroxilos, porque esta composición muestra una amplia distribución en color magenta en dos esquinas opuestas de la imagen (inferior izquierda y superior derecha) y también una distribución en dirección NW-SE en color cian (Fig. 5.12). Es posible que el rasgo espectral del suelo desnudo esté afectando la respuesta de los hidroxilos, porque la imagen se adquirió en una fecha de escasez de lluvias.

Se efectuó la composición RVA de los cocientes de bandas CEB TM 3/1, 5/7 y 3/1+5/7 para resaltar óxidos en color rojo, hidroxilos en verde y una contribución de ambos en tonos blancos (Fig. 5.13). En esta figura se observa una distribución similar a la Figura 5.12, aunque se logran diferenciar mejor los colores de los píxeles que resaltan los minerales secundarios. Esta segunda composición en falso color es mejor que la anterior para resaltar óxidos e hidroxilos porque permite realzar aún más la respuesta espectral de estos materiales con la suma de los cocientes CEB TM 3/1 y 5/7 y diferenciarlos de la cobertura de vegetación.

Se generó la composición en falso color RVA con las componentes principales para resaltar óxidos, vegetación e hidroxilos respectivamente (Fig. 5.14). Se observa una amplia distribución de tonos azules y magenta, es posible que el vigor de la vegetación sea bajo y aparezca como suelo desnudo e influya en esta componente, aunque se observan píxeles verdes que señalan vegetación con un vigor alto. En esta composición

también se observa, en colores naranjas y amarillos la influencia de la componente que señala vegetación de óxidos. Esta composición y la generada con las componentes de la técnica de Crosta, mostró un resultado similar, por ello sólo se discute la primera.

Se ejecutó la composición RVA de las componentes obtenidas de aplicar la técnica de Crosta para conocer la contribución de los minerales típicos de alteración hidrotermal en pixeles con colores blancos, ya que tienen la misma contribución y tonos claros de magenta por la contribución de la componente que señala óxidos y la suma de ambas componentes que señalan minerales secundarios, y cian por la contribución de esta suma junto con la componente que señala hidroxilos. Ésta última composición resalta de mejor manera la respuesta de ambos minerales y permite diferenciarlos de la vegetación, por lo que se tomó esta imagen para discutir la integración de la información espacial (Fig. 5.15).

Se utilizaron diferentes filtros espaciales para identificar y marcar lineamientos en las direcciones Norte-Sur, NE-SW, Este-Oeste y NW-SE a diferentes escalas. En el caso de la 1:500000 y 1:250000 permitieron marcar lineamientos más largos, los cuales son más propensos a indicar estructuras regionales importantes. Se aprovechó la escala 1:250000 y 1:50000 para digitalizar las estructuras geológicas cartografiadas por el Servicio Geológico Mexicano (SGM) en el área de estudio (Fig. 5.18). Algunos de los lineamientos aquí definidos coinciden con fallas extensionales identificadas por Ferrari *et al* (2003), principalmente los bordes Este y Oeste de la caldera San Pedro y una falla normal paralela al borde del Bloque Jalisco.

Se integraron los resultados del realce espectral, espacial y las estructuras geológicas del SGM en el contexto de un SIG para manipular, superponer, analizar y desplegar dicha información con el fin de crear un mapa que señale las zonas a estudiar con interés geotérmico. Por lo tanto en el mapa integrado de la Figura 5.22 se observan varias zonas señaladas con recuadros color amarillo, nombradas como lo muestra la Tabla 13, en las que se ha identificado la presencia de minerales típicos de alteración hidrotermal, la ocurrencia de lineamientos, afloramientos de rocas volcánicas recientes y estructuras geológicas. Estas características podrían indicar la posible presencia de actividad hidrotermal.

Tabla 13. Zonas identificadas con posible actividad hidrotermal.

Zona	Nombre
1	Ceboruco
2	Ocotes altos
3	Santa María
4	Tepetitlic
5	San Pedro

Las primeras zonas se localizan en la esquina inferior derecha, se les nombró como Ceboruco y se eligen porque se encuentran una serie de aparatos volcánicos (volcán Ceboruco, domos de ceniza), afloramientos de Riolitas del Terciario, Basaltos y Andesitas del Cuaternario (Fig. 3.2) y lineamientos. El mapa integrado de la Figura 5.22 permite identificar de mejor manera la respuesta de ambos minerales en pixeles brillantes con colores blancos, magentas y cian. En la zona donde se encuentra la caldera exterior del Ceboruco, se identifica la contribución de óxidos de hierro como lo reporta el trabajo de Nelson (1986). Las otras tres zonas al norte del Ceboruco son interesantes porque contienen conos cineríticos cerca, la zona más alejada está sobre el lineamiento identificado por Ferrari *et al* (2003) como falla extensional.

Las siguientes zonas se localizan al Este de la parte media del área de estudio y se les dominó como Ocotes altos, se eligen porque en ellas se marcaron lineamientos y se encuentran afloramientos fracturados de Pumicita, Basalto, Riolita, Ignimbrita y un Pórfido Diorítico como cuerpo intrusivo (Fig. 3.2). En el mapa de la Figura 5.20 se observan pixeles brillantes color blanco y rojo que señalan óxidos e hidroxilos. En algunas de estas zonas el SGM tiene identificada una serie de zonas de alteración, principalmente caolinización y en menor medida oxidación y silicificación.

En la esquina superior derecha del área de estudio se muestran más zonas denominadas como Santa María, ya que en ellas se marcaron lineamientos, hay una estructura de caldera, conos cineríticos, fallas inversas y fracturas, también se presentan varios contactos litológicos entre Pumicita del Cuaternario, Basaltos y Riolitas del Neógeno, Riolitas-Ignimbritas y Andesitas del Paleógeno, además de dos intrusivos (Granodiorita y Pórfido Diorítico) (Fig. 3.2). Estas zonas y dos más que contienen conos cineríticos también coinciden con las zonas de alteración señaladas por el SGM y se muestran en

pixeles brillantes color cian, magenta y blanco en la Figura 5.22 que identifican minerales de alteración hidrotermal.

Solo una zona se seleccionó en la esquina superior izquierda del área de estudio, ésta resulta interesante porque está en los límites del volcán Sanganguey, hay fracturas, lineamientos y alforamientos del Cuaternario y Terciario de Basaltos que podrían presentar óxidos de hierro, aunque se identificó una amplia cobertura de vegetación en la Fig. 5.21 como pixeles brillantez color verde y rojo que podrían encubrir la posible alteración.

En la periferia del volcán Tepetitlic se eligieron algunas zonas denominadas con el nombre de este volcán, presentan pixeles brillantes de color blanco y cian en la Figura 5.22 que identifican alteración hidrotermal y se encuentran también lineamientos y fracturas. Las zonas del Oeste y Noroeste posiblemente se deban a los contactos litológicos entre Riolitas y Basaltos del Terciario, hacia el Este y Sureste posiblemente al contacto entre Andesitas y Basaltos del Cuaternario con Riolitas del Terciario, algunas del lado Este coinciden con las zonas de alteración señaladas por el SGM como caolinización.

Las últimas zonas se localizan en la esquina inferior izquierda del área de estudio, se nombraron como San Pedro. Éstas están en las cercanías del domo de San Pedro, entre contactos litológicos de Andesitas (Cuaternario y Terciario) y Basaltos (Terciario) que presentan óxidos de hierro en pixeles brillantes magentas y blancos, además hay aparatos volcánicos, se marcaron lineamientos y hay pocas fracturas y zonas de alteración cartografiadas por el SGM. (Fig. 5.20). Estos resultados y el estudio detallado que presentan Ferrari y colaboradores (2003) de la geología del domo de San Pedro y el volcán Ceboruco sería útil para elaborar planos geológicos que sirvan de apoyo a las siguientes etapas de exploración sobre el terreno que permitan tomar decisiones respecto a la ubicación de zonas para barrenación de pozos de prueba como una etapa de exploración geotérmica a mayor detalle.

Estas últimas zonas junto con las de la parte baja de la periferia del volcán Tepetitlic son las de mayor interés de exploración porque se ha identificado la presencia de minerales

típicos de alteración hidrotermal, la ocurrencia de lineamientos, afloramientos de rocas volcánicas recientes y estructuras geológicas.

El análisis de imágenes de satélite con técnicas de percepción remota constituye una herramienta potente y barata para la exploración geotérmica, pues se obtiene (a) información de la superficie del terreno como la cartografía de lineamientos estructurales, fallas, fracturas y la identificación de zonas mineralizadas para elaborar (b) planos geológicos preliminares del subsuelo que sirvan de guía en las subsecuentes etapas de exploración para localizar los sistemas hidrotermales.

7. CONCLUSIONES

Son tres los sitios propuestos para exploración a mayor detalle definidos con base en los resultados obtenidos de aplicar el análisis de imágenes de satélite, el primer sitio se ubica en los alrededores del volcán Santa María, el segundo en la periferia del volcán Tepetitlic y el último en las cercanías del domo San Pedro, nombrados como zona 3, 4 y 5 en la Tabla 13, respectivamente. Se eligieron porque se identificó la presencia de minerales típicos de alteración hidrotermal, la ocurrencia de lineamientos, afloramientos de rocas volcánicas recientes y estructuras geológicas.

Aplicación de diferentes métodos de procesamiento de imágenes sobre los datos de la imagen Ceboruco_NW, tales como composición en falso color, cociente de bandas, y análisis de componentes principales fueron llevados a cabo para la identificación de minerales de alteración hidrotermal como guía de exploración geotérmica y para hacer un reconocimiento de estructuras de origen vulcano-tectónico. Durante el estudio, el análisis de datos fue llevado a cabo usando el software IDRISI Selva 17.0.

El trabajo futuro de exploración geológica incluirá la validación de estos métodos con trabajo de campo en el área de estudio. Las estructuras previamente identificadas con imágenes de satélite serán delimitadas con mayor precisión y detalle en el terreno y correlacionar con las condiciones geológicas: indicar si hay estructuras de fallas, intersección de fallas, manifestaciones termales grandes en la intersección de dos fallas.

En este estudio la detección y delineación de zonas de alteración y actividad hidrotermal fue hecha para los minerales de alteración clave en el occidente del volcán Ceboruco. El rango espectral de las bandas TM 1, 3, 4, 5 y 7 fue seleccionado para detectar las zonas de alteración hidrotermal.

Los materiales de alteración identificados con estas técnicas son evidencias de la existencia de fluidos hidrotermales. En zonas con vegetación abundante y con climas húmedos, las manifestaciones pueden quedar enmascaradas y ser difíciles de identificar, sin embargo, si la actividad hidrotermal es muy intensa, pueden crear claros en la vegetación.

Algunos yacimientos geotérmicos no tienen manifestaciones o expresiones termales visibles en superficie, es decir están ocultos, mediante el adecuado uso de métodos de percepción remota es posible detectarlos, ya que estos permiten ver la respuesta espectral de algunos materiales en un rango más amplio de longitudes de onda mayores al visible.

La percepción remota es especialmente útil en grandes áreas alejadas, donde la expresión o manifestación en superficie de la actividad geotérmica, no ha sido localizada por medio de métodos convencionales. Además ha demostrado ser una valiosa herramienta de ayuda en la búsqueda de recursos minerales y energéticos.

Los resultados obtenidos de este trabajo sirven para crear rutas y puntos de muestreo in situ de rocas y gases para su estudio geoquímico con el fin de hallar evidencia que muestre que hay actividad geotérmica en esa superficie (suelos humeantes, depósitos de sílice, zonas de alteración, etc).

8. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN A SEGUIR

Se recomienda realizar una verificación en campo de las zonas identificadas en la imagen como favorable para la presencia de mineralización y comparar los resultados obtenidos en el campo tanto para el mapeo de alteración e identificación de estructuras principales con los obtenidos a partir del procesamiento de las imágenes de satélite para comprobar la existencia de una correlación entre ambos conjuntos de resultados (Ruiz-Armenta & Prol-Ledesma, 1995).

Con la presentación de este trabajo se indica el camino a seguir para recomendar una serie de zonas con buen potencial a investigar, ya sea desarrollado por CFE, sector privado o un productor independiente de energía, con el fin de desarrollar un proyecto geotérmico en el estado de Nayarit, México. En los sitios aquí recomendados podrían aplicarse una serie de métodos de exploración, por ejemplo:

- geoquímicos de muestreo de agua y gases para caracterizar los fluidos hidrotermales y dar una idea del origen y dirección de los fluidos,
- estudios electromagnéticos y gravimétricos para localizar y caracterizar las estructuras profundas,
- estudios de microsismicidad para localizar fallas activas por donde circulen los fluidos geotérmicos.
- estudios hidrogeológicos para correlacionar las manifestaciones hidrotermales con fallas, fracturas y otras características tectónicas para identificar la distribución de los acuíferos confinados y no confinados que permitan reconstruir el patrón de circulación del agua subterránea,
- posiblemente estudios de espectroscopia de reflexión IR para identificar la mineralogía de alteración,
- así como para crear los permisos con los propietarios de la tierra dentro de las áreas de exploración de campo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barbier, E. (2002). *Geothermal energy technology and current status: an overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(1), 3 – 65.

Bonham-Carter, G. F. (1994). *Geographic Information Systems for geoscientists-modeling with GIS. Computer methods in the geoscientists*, 13, 398.

Burrough, P. A. (1986). *Principles of geographical information systems for land resources assessment.*

Burrough, P. A., & McDonell, R. A. (1998). *Principles of GIS. Oxford University Press, London*, 190 pp.

Campbell, J. B. (2002). *Introduction to Remote Sensing. (3rd Ed). The Guilford Press. New York, USA.*

Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to Remote Sensing. (5th Ed). The Guilford Press. New York, USA.*

Carranza, E. J., Wibowo, H., Barritt, S. D., & Sumintadireja, P. (2008). *Spatial data analysis and integration for regional-scale geothermal potential mapping, West Java, Indonesia .Geothermics* 37(3), 267-299.

Castillo, D., & De la Cruz, V. (1992). Reconocimiento estructural y volcanológico en la zona termal del Domo San Pedro Lagunillas, Nayarit, México. *Geofísica Internacional* 31(4), 407-415.

Chandra, A. M., & Ghosh, S. K. (2006). *Remote Sensing and Geographical Information System. (1st Ed). Editorial Alpha Science International Ltd. Oxford, U.K.*

Chavez, P. S. (1975). *Atmospheric, Solar, and M.T.F. Corrections for ERTS Digital Imagery. Proceedings, American Society of Photogrammetry. Bethesda, MD: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 69-69a.

- Crosta, A. P., & Moore, J. (1989).** *Enhancement of Landsat Thematic Mapper Imagery for Residual Soil Mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: A Prospecting Case History in Greenstone Belt Terrain. Proceedings of the Seventh Thematic Conference of Remote Sensing for Exploration Geology, Calgary, Alberta, Canada, Oct. 2-6, pp. ERIM, 1173-1187.*
- De investigaciones Eléctricas, I. I. E. (1999).** Electricidad y conservación del medio ambiente.
- Demant, A. (1978).** Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 2(2), 172-187.
- Demant, A. (1981).** Interpretación geodinámica del volcanismo del Eje Neovolcánico Transmexicano. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 5(2), 217-222.
- Del Valle, J. L. (2015).** Perspectivas de desarrollo privado con la nueva Ley de Energía Geotérmica. *Presentation in the 22nd Annual Congress of the Mexican Geothermal Association (AGM), Cuernavaca, Mor. México, 10-11, March 2015.*
- Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2003).** *Istituto di Geoscienze e Georisorse.CNR, Pisa, Italia.* “¿Qué es la energía geotérmica?”.
- Drury, S. A., & Drury, S. A. (2001).** *Image interpretation in geology. 3th ed. Blackwell Science. USA.*
- Fernández De la Vega-Márquez, T., Prol-Ledesma, R. M., & Orozco, G. (2001).** *Hydrothermal alteration and main structures mapping using TM images in La Primavera geothermal field (Mexico).* *Geofísica Internacional*, 40(3), 147-162.
- Ferrari, L., Conticelli, S., Vaggelli, G., Petrone, C.H., & Manetti, P. (2000).** *Late Miocene volcanism and intra-arc tectonics during the early development of the Trans-Mexican Volcanic Belt.* *Tectonophysics*, 318(1), 161-185.

- Ferrari, L., Pasquaré, G., Venegas, S., Castillo, D., & Romero, F. (1994).** *Regional tectonics of western Mexico and its implications for the northern boundary of Jalisco Block.* *Geofísica Internacional*, 33(1), 139-151.
- Ferrari, L., Petrone, C., Francalanci, L., Tagami, T., Eguchi, M., Conticelli, S., Manetti, P., & Venegas-Salgado, S. (2003).** *Geology of the San Pedro – Ceboruco Graben, western Trans-Mexican Volcanic Belt.* *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20(3), 165-181.
- Ferrer, H. P., Bate, E. S., Guerrero, D. R., & Ferrer, A. P. (1986).** *LANDSAT Assisted Geostructural Analysis of the Bacon-Manito Geothermal Field. Southeastern Luzon, Philippines.* *Geothermal Resources Council, Bulletin* 1-13.
- Fraser, S. J. (1991).** *Discrimination and identification of ferric oxides using satellite Thematic Mapper data: A Newman case study.* *International Journal of Remote Sensing*, 12(3), 635-641.
- García-Estrada, G., & López-Hernández, A. (2003).** *The Use of a GIS for the Study of Geothermal Fields. Results at Los Azufres, Mexico.* *Geothermal Resources Council Transactions*, 27, 609-613.
- Gutiérrez-Negrín, L.C., Maya-González, R., & Quijano-León, J.L. (2015).** *Present Situation and Perspectives of Geothermal in Mexico.* *Proceedings World Geothermal Congress 2015 (pp. 19-24).*
- Henley, R. W., & Ellis, A. J. (1983).** *Geothermal systems ancient and modern: a geochemical review.* *Earth-science reviews*, 19(1), 1-50.
- Huenges, E. (2010).** *Geothermal Energy Systems. Exploration, Development, and Utilization.* WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim. Germany.
- Hunt, G. R. (1977).** *Spectral signatures of particulate minerals in the Visible and Near Infrared.* *Geophysics*, 42(3), 501-513.

- Hunt, G. R.** (1979). *Near-infrared (1.3 – 2.4 μm) spectra of alteration minerals-Potential for use in remote sensing. *Geophysics*, 44(12), 1974-1986.*
- Hunt, G. R. & Ashley, R. P.** (1979). Spectra of altered rocks in the visible and near infrared. *Economic Geology*, 74(7), 1613-1629.
- IRENA**, *International Renewable Energy Agency.* (2015). *Renewable Power Generation Costs in 2014.*
- Jensen, J. R.** (1996). *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. (2nd Ed). Prentice Hall Series in Geographic Information Science. USA.*
- Kauffmann, H.** (1988). *Mineral exploration along the aqaba-levant structure by use of TM-data: Concepts, processing and results. International Journal of Remote Sensing*, 9(10-11), 1639-1658.
- Littlefield, E., & Calvin, W.** (2009). *Remote Sensing for Geothermal Exploration Over Buffalo Valley, NV. Geothermal Resources Council Transactions*, 33, 495-499.
- Loughlin, W. P.** (1991). *Principal Component Analysis for Alteration Mapping. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57(9), 1163-1169.
- Luhr, J. F., Nelson, S. A., Allan, J. F., & Carmichael, I, S.** (1985). *Active rifting in South-western Mexico: Manifestations on an incipient eastward spreading-ridge jump. Geology*, 13(1), 54-57.
- Lund, J. W., Freeston, D. H., & Boyd, T. L.** (2010). *Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review. Geothermics*, 40 (3), 159-240.
- Mboin, I.** (2011). *Application of Landsat TM Satellite Imagery to Map Geothermal Resources and Land Cover: Case Study of Silali Prospect. Geothermal Prospect Using Landsat TM. Geothermal Resources Council Transactions*, 35, 911-916.

- Meneses III, F.** (2013). *Use of remote sensing in EDC: Opportunities and challenges. Proceedings of the 10th Asian Geothermal Symposium, 22-24 September 2013.*
- Moghaddam, M. K., Samadzadegan, F., Noorollahi, Y., Sharifi, M. A., & Itoi, R.** (2014). *Spatial analysis and multi-criteria decision making for regional-scale geothermal favorability map. Geothermics, 50, 189-201.*
- Moore, G. K. & Waltz, F. A.** (1983). *Objective Procedures for Lineament Enhancement and Extraction. A five-step digital convolution procedure extracts edge and line segments or produces directionally enhanced images. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 49(5), 641-647.*
- Mutua, J., & Mibei, G.** (2011). *Remote Sensing Application in Geothermal Exploration: Case Study of Barrier Volcanic Complex, Kenya. Geothermal Resources Council Transactions, 35, 943-948.*
- Nash, G. D., Murphy, E., & Umbriaco, J.** (2004). *Remote Sensing for Geothermal Resource Exploration and Characterization: A Summary of Results 2000 – 2004. Geothermal Resources Council Transactions, 28, 31-36.*
- Nash, G. D., & Adams, M. C.** (2001). *Cost Effective use of GIS for Tracer Test Mapping and Visualization. Geothermal Resources Council Transactions, 25.*
- Nelson, S. A.** (1986). *Geología del Volcán Ceboruco, Nayarit, con una estimación de riesgos de erupciones futuras. Revista del Instituto de Geología UNAM, 2(6), 243-258.*
- Noorollahi, Y., Itoi, R., Fujii, H., & Tanaka, T.** (2008). *GIS integration model for geothermal exploration and well sitting. Geothermics, 37, 107-131.*
- Noorollahi, Y., Itoi, R., Fujii, H., & Tanaka, T.** (2007). *GIS model for geothermal resource exploration in Akita and Iwate prefectures, northern Japan. Computers & Geosciences, 33, 1008-1021.*

- Noorollahi, Y., & Itoi, R. (2008).** *GM-GRE: An integration method for Geothermal Potential site selection. Geothermal Training Programme. 30th Anniversary Workshop, 1-12.*
- Prol-Ledesma, R. M., Alcántara, A., & Chávez, M. (1993).** Exploración geotérmica utilizando imágenes de satélite en Los Humeros, Puebla, México. *Geofísica Internacional, 32(1), 99-109.*
- Prol-Ledesma, R. M. (2000).** *Evaluation of the reconnaissance results in geothermal exploration using GIS. Geothermics, 29, 83-103.*
- Prol-Ledesma, R. M., & Nieva, D. (2013).** El futuro de la Geotermia en el siglo XXI. Foro Internacional sobre Energía Geotérmica. 28 y 29 de Octubre de 2013 Salón José María Morelos y Pavón, de la Secretaría de Relaciones Exteriores, México, D.F.
- Richards, J. A. (2013).** *Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction. 5th ed. Springer. Australia.*
- Rosas-Elguera, J., Ferrari, L., Garduño-Monroy, V., & Urrutia-Fucugauchi, J. (1996).** *Continental boundaries of the Jalisco Block in the Pliocene-quaternary kinematics of western Mexico. Geology, 24(10), 921-924.*
- Ruiz-Armenta, J. R., & Prol-Ledesma, R. M. (1995).** Técnicas de procesamiento de imágenes en la exploración de yacimientos minerales de origen hidrotermal. *Universidad Complutense. Física de la Tierra 7, 105-137.*
- 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, 19, 10, 1981-2000.*
- Sabins, F. (1997).** *Remote Sensing. Principles and interpretation. JR, W. H. Freeman and Company, Segunda edición. U.S.A.*
- Sabins, F. (1999).** *Remote sensing for mineral exploration. Ore Geology Reviews, 14(3), 157-183.*

- Saraf, A., & Choudhury, P. (1998).** *Integrated remote sensing and GIS for groundwater exploration and identification of artificial recharge sites. International Journal of Remote Sensing, 19(10), 1825-1841.*
- Secretaría de Energía (SENER).** Capacidad efectiva de generación, Megawatts.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM).** Carta geológica-minera F13-8 GM 1:250000
- Seung-Gyun, B., Hyoungh-Chan, K., & Jeongmin, P. (2010).** *Geothermal potential mapping in Korea using GIS data integration. Proceedings World Geothermal Congress.*
- Suárez, G., & Singh, S.K. (1986).** *Tectonic interpretation of the transmexican Volcanic Belt-Discussion. Tectonophysics, 127, 155-160.*
- Tarbuck, E., & Lutgens, F. (2005).** *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física. Pearson Education.*
- Tüfekçi, N., Lütfi-Süzen, M., Güleç, N. (2010).** *GIS based geothermal potential assessment: A case study from Western Anatolia, Turkey, Energy, 35, 246-261.*
- Urai, M., Muraoka, H., & Nasution, A. (2000).** *Remote Sensing Study for Geothermal Development in the Ngada District, Central Flores, Indonesia. Proceedings of the World Geothermal Congress, 1905-1908.*
- Velador, J .M., Omenda, P. A., & Anthony, E. Y. (2003).** *An Integrated Mapping and Remote Sensing Investigation of the Structural Control for Fumarole Location in the Eburru Volcanic Complex, Kenya Rift. Geothermal Resources Council Transactions, 27, 639-642.*
- Wannamaker, P. E., Ross, H. P., & Arellano, J. F. (1994).** *Geophysical Studies: Ceboruco Geothermal Reconnaissance Area. U.S. Department of Energy, 13-14.*
- Williams, H., & McBirney, A. R. (1979).** *Volcanology: San Francisco, Freeman and Cooper, 397.*

Wright, P. M., Lira, H., & Ramsey, D. R. (1990). *Interpretation of Landsat Thematic Mapper Satellite Imagery at Los Azufres Geothermal Field, Michoacan, Mexico.* *Geothermal Resources Council Transactions*, 14, 1553-1559.