



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

Mapeo de Lineamientos
y Alteraciones
Hidrotermales en Sierra
San Francisco Borja, B. C.

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERO GEOFÍSICO.

PRESENTA:

CECILIA MATA CASTILLO

ASESOR: DRA. ROSA MARÍA PROL LEDESMA

MÉXICO, D.F., 2015

Índice

Resumen	1
Abstract	2
Capítulo 1	3
Introducción.	
Capítulo 2	5
Geología regional y evolución tectónica.	
Capítulo 3	17
Sistemas y alteraciones hidrotermales.	
Capítulo 4	22
Fundamentos teóricos.	
Capítulo 5	40
Técnicas de procesamiento.	
Capítulo 6	65
Resultados.	
Capítulo 7	83
Discusión y conclusiones.	
Agradecimientos	87
Referencias	88

RESUMEN

Las imágenes obtenidas con los sensores de los satélites de la serie Landsat han sido durante muchas décadas la principal fuente de información espectral de los materiales que cubren la superficie terrestre. Comúnmente son utilizadas en las etapas de reconocimiento de la exploración de recursos naturales debido a que permiten explorar grandes áreas a costos muy bajos, permitiendo enfocar los esfuerzos de exploración a detalle a las zonas con mayor potencial. Este tipo de imágenes cubren áreas de 185x185 km por escena, lo que permite la identificación de lineamientos regionales y zonas de alteración a gran escala. Las principales aplicaciones del procesamiento de imágenes multiespectrales son la exploración geotérmica y la exploración de yacimientos minerales de origen hidrotermal.

La península de Baja California es una de las regiones con mayor potencial de desarrollos geotérmicos, debido a la intensa actividad tectónica, iniciada a mediados del Mioceno y activa hasta nuestros días. Debido a esta característica, numerosas campañas de exploración geotérmica se desarrollan ahí, siendo la Percepción Remota la principal herramienta de exploración regional de reconocimiento.

En el presente estudio se presentan diferentes metodologías de procesamiento de imágenes multiespectrales de Landsat ETM, en el marco de la identificación de lineamientos y alteraciones hidrotermales asociadas a fuentes geotérmicas en la región central de la península de Baja California, específicamente en la Sierra de San Francisco Borja y sus alrededores, con el objetivo de localizar zonas favorables para la continuación de las campañas de exploración con métodos geofísicos y geoquímicos.

ABSTRACT

The images obtained with the sensors of the Landsat satellites have the main source of spectral information about the materials that cover the surface. They are commonly used in the steps of recognizing the exploration of natural resources such as geothermal and mineral exploration, because it allows you to explore large areas at very low costs, allowing you to focus exploration efforts in detail to areas with the greatest potential. This type of images cover areas of 185x185 km per scene, which allows identification of regional areas guidelines and large scale alteration.

Baja California is one of the regions with the greatest potential for geothermal development because of the intense tectonic activity since the middle Miocene and still presently active. Because of this feature, many geothermal exploration campaigns are developed there, Remote Sensing being the main tool of regional reconnaissance exploration

In the present study we utilize different methods of processing multispectral images of Landsat ETM, in order to identify lineaments and hydrothermal alteration associated with geothermal resources. The study focus in the central region of the peninsula of Baja California, specifically in the Sierra de San Francisco Borja and surrounding areas.

CAPÍTULO 1

Introducción

En las etapas de reconocimiento de la exploración geotérmica, la principal herramienta es la Percepción Remota para la localización de zonas afectadas por alteración hidrotermal. Estas técnicas permiten identificar dichas zonas mediante el realce espectral de los minerales típicos de alteración hidrotermal y la utilización de métodos de realce espacial para identificar la presencia de estructuras geológicas que puedan estar relacionadas a estas alteraciones.

El estado de Baja California es ampliamente conocido por contar con la mayor central de energía geotérmica del país: el campo de Cerro Prieto, ubicado en el valle de Mexicali. Además de este campo geotérmico, se han reconocido varias zonas con actividad hidrotermal en el norte de la provincia extensional del Golfo de California, en éstas se han reportado salmueras asociadas a sistemas geotérmicos y se han identificado sulfuros de Fe-Zn-Cu-Pb así como óxidos de Fe precipitados a temperaturas superiores a los 100 °C (Barajas y Delgado-Argote, 1995). Este estudio se llevará a cabo en la regional central de la Península de Baja California, en la porción centro y sur del estado de Baja California, desde la Isla Ángel de la Guarda hasta el poblado El Arco.

Debido a la dificultad para acceder a la zona de estudio por la falta de vías de comunicación, no se cuenta con estudios semejantes previos de la región por lo que este proyecto será de gran apoyo a investigaciones futuras en materia de geotermia y exploración de yacimientos minerales de origen hidrotermal.

El objetivo de la presente tesis consiste en identificar zonas con potencial geotérmico en la región central de la Península de Baja California, mediante el procesamiento de imágenes multiespectrales Landsat ETM.

Para cumplir con el objetivo se aplicará la metodología propuesta por Moore y Waltz (1983) y por Honarmand y colaboradores (2013), para el realce espacial de lineamientos geológicos mediante la aplicación de filtros digitales a una imagen satelital obtenida de la plataforma Landsat 7. Además de esta metodología, se aplicarán técnicas de realce espectral tales como cocientes de bandas, composiciones en falso color y análisis de componentes principales (Crosta *et al.*, 2003), con la finalidad de resaltar la firma espectral de minerales indicadores de alteración hidrotermal.

Existen muchos trabajos publicados respecto al realce espectral de patrones de alteración hidrotermal, entre los que destacan por su importancia el trabajo de Crosta y colaboradores (2003) en el que mediante el análisis de componentes principales de una imagen ASTER se pudieron localizar alteraciones hidrotermales asociadas a depósitos epitermales en la Patagonia, y el estudio realizado por Fernández de la Vega y Prol-Ledesma (2001) en el que se aplicaron cocientes de bandas, composiciones a color, composiciones a color de cocientes de bandas, análisis estadístico multivariado y aplicación de filtros digitales con la finalidad de localizar rocas alteradas por la circulación de fluidos hidrotermales en el Campo Geotérmico La Primavera, Jalisco. Además de estos, sobresale el método propuesto por Fraser (1991) para diferenciar la respuesta espectral de los óxidos y los hidroxilos mediante la aplicación selectiva del análisis de componentes principales, llamado componentes principales dirigidas (DPCA).

En cuanto al realce espacial de lineamientos, en el trabajo realizado por Moore y Waltz (1983) se propone una secuencia de siete pasos para la aplicación de filtros digitales, la cual es útil para resaltar y extraer los lineamientos de la superficie terrestre, lo que en nuestro caso nos permitirá resaltar las fallas y fracturas por las que se puede dar el ascenso de fluidos hidrotermales.

El conocimiento de la geología regional y la evolución tectónica de la región será fundamental para la correcta interpretación de los resultados obtenidos del procesamiento de la imagen, para lo cual se cuenta con los trabajos realizados por Delgado-Argote (2000), Delgado-Argote y García-Abdeslem (1999), Barajas y Delgado-Argote (1995) sobre la evolución tectónica de Baja California y el magmatismo asociado al fallamiento regional.

CAPÍTULO 2

Geología regional y evolución tectónica

Para describir la evolución geológica de la Península de Baja California se parte de los dos eventos orogénicos de mayor relevancia en la región. El primero ocurrió durante el Jurásico Tardío-Cretácico y se caracterizó por una intensa actividad volcánica asociada al emplazamiento del que se denomina actualmente el batolito peninsular. El segundo evento corresponde a la serie de desplazamientos y magmatismo asociados a la apertura del Golfo de California, ocurrido durante el Mioceno.

2.1 Terrenos Tectono-estratigráficos

Para describir con mayor claridad la evolución geológica de Baja California es necesario presentar una breve descripción de los terrenos tectono-estratigráficos que lo conforman. Uno de los primeros trabajos sobre los terrenos tectono-estratigráficos de México fue el elaborado por Campa y Coney (1983) en el que se divide a Baja California de oeste a este en los Terrenos Vizcaíno, Alisitos y Caborca.

Actualmente estos terrenos han sido redefinidos y renombrados apareciendo en la Carta Geológico-Minera del Estado de Baja California del 2008, de occidente a oriente, como Terreno Vizcaíno, Terreno Guerrero (contiene al Terreno Alisitos), Terreno Caborca y Terreno Cortés. Dada la distribución de los mismos, sólo se describirán los Terrenos Guerrero y Cortés debido a que son los únicos que afloran en la zona de estudio.

2.1.1 Terreno Cortés

El Terreno Cortés se compone de una secuencia Paleozoica-Mesozoica conformada por el Grupo Canal de Ballenas, del Devónico, sobre el que descansa la Formación El Mármol del Carbonífero, sobreyaciendo a esta secuencia se encuentra la Formación Zamora de inicio del Pérmico sobre ésta se encuentran las Formaciones Cerro Volcán y finalmente la Formación

El Indio. Todas estas secuencias corresponden a depósitos marinos de distintas profundidades y se detallan en el apartado sobre la estratigrafía de la región (SGM, 2008).

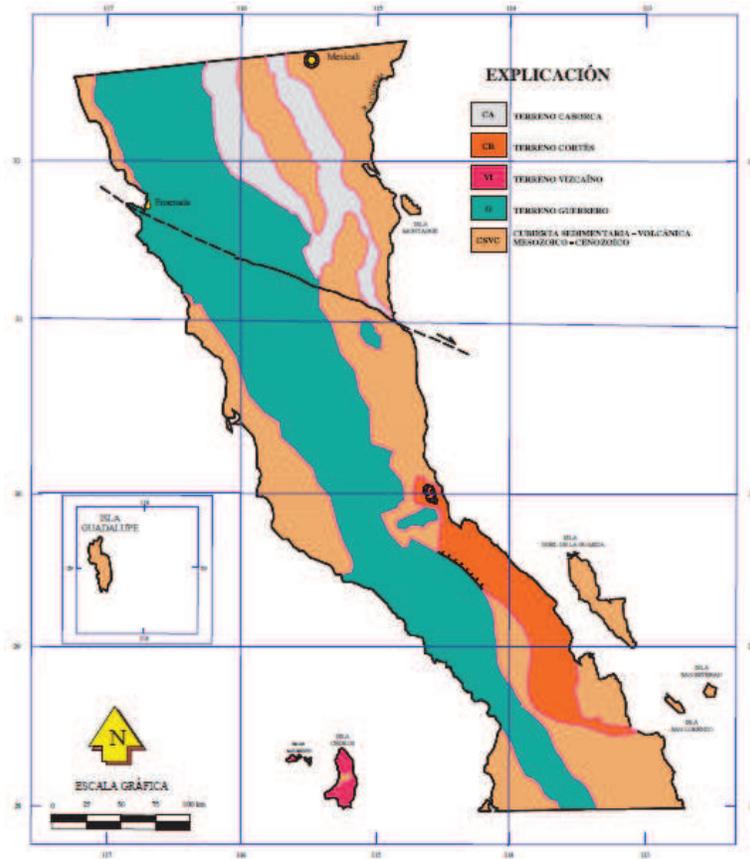


Figura 2.1. Distribución de los Terrenos Tectono-estratigráficos del estado de Baja California. Modificada de Carta Geológico-Minera del Estado de Baja California, 1: 500,000 (SGM, 2008).

2.1.2 Terreno Alisitos

Keppie (2004) describe que el Superterreno Guerrero se ha dividido al sur de la Faja Volcánica Transmexicana de oeste a este en los Terrenos Zihuatanejo, Las Ollas, Arcelia, Teloloapan y Arperos, mientras que hacia el norte se ha subdividido en los Terrenos Baja Oeste (West Baja), Choyal, Vizcaíno Norte, Vizcaíno Sur y Alisitos, de occidente a oriente.

La inclusión del Terreno Alisitos dentro del Terreno Guerrero se debe a que esta región se correlaciona con las secuencias vulcano-sedimentarias del Terreno Guerrero, desde Sinaloa hasta Guerrero.

El basamento del Terreno Alisitos se compone de rocas metamórficas del Triásico-Jurásico que fueron intrusionadas por el Batolito Peninsular. Este terreno se extiende al norte hasta Los Ángeles, California, mientras que hacia el sur no se conocen completamente sus límites debido a la cubierta vulcano sedimentaria que cubre la región.

El Terreno Alisitos, se conforma por secuencias de arco del Jurásico-Cretácico en el occidente, mientras que hacia el oriente se compone por secuencias sedimentarias de cuenca del Triásico-Jurásico. Ambos componentes se encuentran intrusionados por el Batolito Peninsular, el cual aflora ampliamente a lo largo de la península.

Aunque el Terreno Alisitos se encuentra bien expuesto en general, se encuentra parcial y discordantemente cubierto por depósitos clásticos del Cretácico Tardío-Eoceno, en la costa occidental. Estos depósitos provienen del Batolito Peninsular y de la Formación Alisitos, y fueron depositados en una cuenca estable (Barajas y Delgado-Argote, 1995; Keppie, 2004).

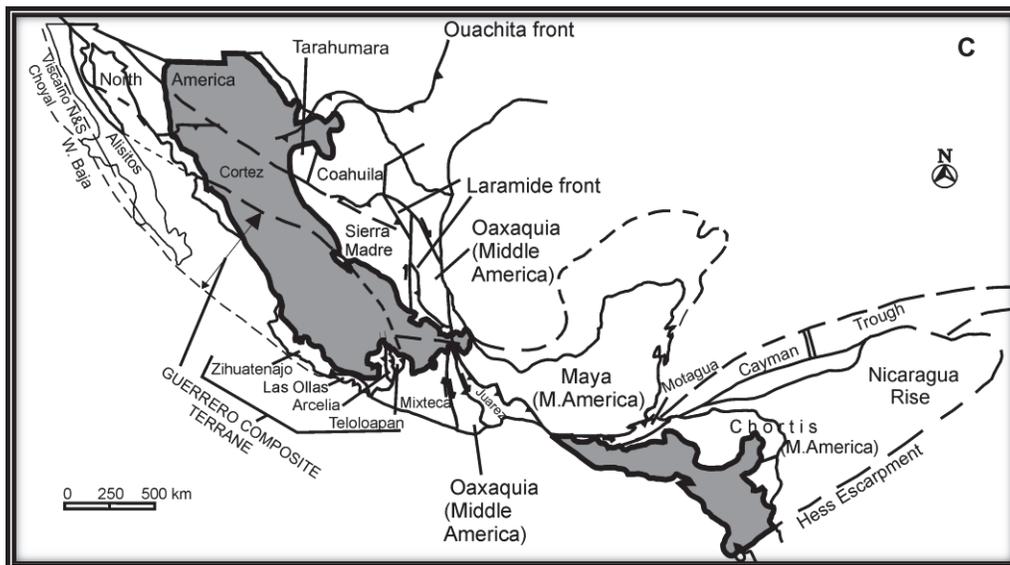


Figura 2.2 Terrenos tectono-estratigráficos de México. Tomado de Keppie, 2004.

2.2 Estratigrafía

De acuerdo con los trabajos de Fabriol y colaboradores (1999) y Delgado-Argote (2000) el basamento en la zona de estudio está conformado por rocas graníticas del Cretácico y rocas

metasedimentarias en facies de esquistos verdes del Paleozoico, las cuales han sido cubiertas por los sedimento volcánicos Mesozoico-Cenozoicos.

La estratigrafía del estado de Baja California ha sido descrita ampliamente por Barajas y Delgado-Argote en diversos trabajos, en este apartado se presenta un resumen del trabajo estratigráfico elaborado por estos autores en 1995.

2.2.1 Paleozoico

Durante el Paleozoico el límite del cratón de Norteamérica se encontraba en la actual península de Baja California. Las formaciones rocosas depositadas entonces afloran actualmente como rocas metasedimentarias, cuyos protolitos corresponden a sedimentos de dos tipos de ambientes: hacia el este los sedimentos representan a depósitos marinos someros de plataforma, mientras que hacia el oeste corresponden a depósitos marinos profundos de talud y cuenca.

Los afloramientos de rocas metasedimentarias se localizan principalmente en la porción nororiental de la Península, así como en el estado de Sonora. El miembro más antiguo de la secuencia paleozoica de la región se compone por el Grupo Playa San Felipe, del Cámbrico, conformado por depósitos marinos someros conformados por cuarcitas, mármol, areniscas de ambiente sublitoral y carbonatos de plataforma.

Sobreyaciendo a éste se encuentra el Grupo Arroyo Grande, de fines del Ordovícico. Es una secuencia que aflora al sur de Sierra Pinta, de ambiente marino. Se compone de pedernal bandeado, areniscas, lodolitas, calizas y pizarras. En algunas zonas se han identificado turbiditas. Estos depósitos se correlacionan con los depósitos que afloran en el área de Canal de Ballenas, denominados Grupo Canal de Ballenas.

Sobre este grupo se depositó una secuencia marina de lodolitas calcáreas y calizas grainstone con areniscas denominada Grupo Sierra Pinta. Este grupo incluye basaltos almohadillados, brechas y tobas hialoclásticas, pedernal bandeado y argilitas. Se ha determinado que corresponde a un ambiente de plataforma y talud; del Devónico.

Posteriormente, durante el Carbonífero, se depositó una secuencia de 2000 m de espesor de argilita finamente bandeada, con arenisca y pedernal, y algunos clastos de caliza en cuarzo-arenitas calcáreas, margas y conglomerados con clastos de pedernal, cuarzo-arenita y caliza. Estos depósitos corresponden a flujos de gravedad en un ambiente hemipelágico; esta secuencia aflora en la región de Cerro El Volcán, reconociéndose informalmente como El Mármol.

Durante el Pérmico Temprano se depositó una secuencia de argilitas con areniscas cuarcíferas y conglomerados, correspondientes a depósitos de gravedad; éstos tienen un espesor de hasta 500 m, y posiblemente fueron depositados en un ambiente de talud, pie de talud y hemipelágico. Esta unidad se denomina Formación Zamora.

El grado de metamorfismo de estas secuencias varía desde facies de esquistos verdes en la zona de costa, hasta facies de anfibolita, hacia el noroeste del estado (Barajas y Delgado-Argote, 1995). Las rocas del Ordovícico-Pérmico, en facies de talud continental y de cuenca afloran ampliamente en la porción oriental de la zona de estudio.

2.2.2 Mesozoico

Sobreyaciendo concordantemente a la Formación Zamora, descansan depósitos de cuenca y talud compuestos por argilitas con horizontes de margas, areniscas conglomeráticas y argilitas con estratificación rítmica. La edad de esta unidad es Pérmico Tardío-Triásico Tardío, y fue nombrada como Formación El Volcán. Toda la secuencia presenta metamorfismo de bajo a grado a intermedio.

La Formación El Indio, del Triásico Temprano, descansa en discordancia sobre las rocas paleozoicas. Ésta se compone de sedimentos terrígenos y calcáreos metamorfizados; se divide en dos miembros. El miembro inferior consiste en conglomerados y cuarzo-arenitas hacia la base, que gradúan a areniscas calcáreas y calizas arenosas en la parte media y calizas micríticas en la cima. El miembro superior se compone de argilitas carbonosas con micas. El ambiente de depósito de esta secuencia corresponde a una plataforma somera, con una amplia gama de condiciones de energía.

En el norte del estado aflora una secuencia de sedimentos terrígenos metamorizados a facies de esquistos verdes, denominada Formación Rancho Vallecitos, del Triásico-Jurásico. Los estratos que conforman esta unidad definen una secuencia tipo *flysch* en la que predomina la lutita sobre la arenisca. Esta secuencia es interpretada como depósitos de flujos turbidíticos en la parte externa de un abanico submarino y de cuenca; aflora a lo largo de la península de Baja California, y en la imagen se encuentra aflorando en la región central de la zona de estudio.

En la Isla Cedros, afloran sedimentos vulcanoclásticos y epiclásticos de las Formaciones Choyal y Gran Cañón, del Jurásico Temprano y Medio. Estas formaciones son secuencias lateralmente equivalentes, constituidas primordialmente por tobas, brechas tobáceas, litarenitas volcánicas y conglomerados de fragmentos volcánicos.

Durante el Jurásico Medio-Tardío se depositan concordantemente, sobre la Formación Gran Cañón, sedimentos en secuencia tipo *flysch* de 300 a 400 m de espesor que subyacen a capas de argilita. La secuencia de argilita contiene clastos y mega bloques que constituyen un depósito tipo *melange*. Esta unidad stratigráfica se denomina Formación Coloradito.

Al norte de la zona de estudio, en la Región de Calamajué, la secuencia vulcano sedimentaria del Jurásico Tardío tiene más de 2300 m de espesor y sobreyace en discordancia angular y en contacto estructural, a rocas del Paleozoico Tardío. Esta unidad fue nombrada Cañón Las Palmas; se compone de flujos basálticos y dacíticos con lentes de carbonatos hacia la base. Sus estratos superiores consisten en areniscas y conglomerados volcánicos, brechas tobáceas y derrames de andesita de hornblenda y dacita. Su cima está conformada por una alternancia de capas de areniscas cuarcíferas y areniscas de fragmentos volcánicos.

En la región oriental de El Mármol, las secuencias paleozoicas y la Formación El Indio, del Triásico Temprano, están cubiertas en discordancia angular por sedimentos clásticos del Cretácico Tardío de más de 6000 m de espesor, denominados Formación La Olvidada.

La Formación La Olvidada está dividida en tres miembros. El inferior consiste de conglomerados y areniscas cuarcíferas, areniscas volcánicas y calizas, que en conjunto definen un ambiente marino somero. El segundo y más prominente, con 5000 m, sobreyace gradualmente al inferior. Consiste en una alternancia de capas delgadas y láminas de

pedernal, arenisca de grano fino y lutita que definen un ambiente de talud y cuenca. El miembro superior sobreyace discordantemente al miembro intermedio, y se compone de conglomerados con clastos de pedernal, arenisca, lutita y derrames de andesita vesicular. Esta parte de la secuencia corresponde a depósitos fluviales que gradúan a depósitos marinos someros hacia la cima.

Una de las unidades más importantes que afloran en la zona de estudio la constituye la Formación Alisitos del Aptiano-Albiano, conformando una franja de rocas volcánicas y vulcano-clásticas a lo largo de la porción occidental de la península de Baja California. Debido a la gran variedad litológica y de facies que presenta esta secuencia se propuso elevar el rango de esta unidad estratigráfica al de grupo.

En la región a analizar, al sur de Calamajué, esta secuencia se encuentra sobreyaciendo en discordancia erosional a la Formación Cañón Las Palmas del Jurásico Tardío. En ésta, la unidad consiste de una secuencia compuesta por areniscas líticas y conglomerados, con tobas de caída libre y flujos de ceniza interestratificados; estos depósitos definen un ambiente de cuenca de tras arco.

Durante el Jurásico-Cretácico ocurrió el emplazamiento del batolito peninsular. Este evento es evidenciado en la gran cantidad de afloramientos de rocas plutónicas graníticas. En el occidente del estado los plutones son cogenéticos con las rocas volcánicas de la Formación Alisitos, mientras que al oriente los plutones intrusionan a las secuencias *flysch* del Triásico-Cretácico.

De acuerdo con su mineralogía, el 47% de los cuerpos intrusivos corresponde a tonalita-cuarzodiorita, 35% a granodiorita, 14% a diorita y el 4% a adamelita. Una de las principales características de los intrusivos es su estructura zonificada, con núcleos de granodiorita y bordes de tonalita.

El batolito peninsular tiene una discontinuidad composicional en la que los plutones de la porción occidental tienen diámetros menores a 10 km, contienen gabro y se emplazan en rocas metamórficas de bajo grado a moderado. En contraste, los plutones de la faja oriental son de mayor diámetro, llegando a medir hasta 40 km, no contienen gabro y se asocian a rocas metamórficas de moderado a alto grado. La edad de los plutones del occidente es de

140 a 105 Ma, mientras que los de la porción oriental van de 105 a 80 Ma. Los plutones de la franja occidental fueron deformados durante su emplazamiento y posteriormente intrusionados por plutones de inicios del Cretácico Tardío.

Durante el Cretácico Tardío, el eje de emplazamiento de los plutones así como de actividad volcánica migró a través del antiguo límite del cratón hacia Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Nayarit y el occidente de Jalisco. En este periodo la región de la península constituía una cadena montañosa que aportaba sedimentos gruesos derivados de la erosión de las rocas metamórficas e ígneas, incluyendo a las vulcano-sedimentarias de la Formación Alisitos. Este proceso se encuentra expuesto a lo largo de la costa del Pacífico, al sur de California y Baja California.

Los depósitos que sobreyacen al batolito peninsular aumentan de espesor hacia el occidente y se acuña hacia el oriente, cambiando lateralmente de facies continentales, al oriente, a facies marinas someras y profundas hacia el occidente. Esta secuencia se nombra Formación Rosario. Esta unidad representa el último aumento significativo del nivel del mar durante el Cretácico. En Baja California el límite Cretácico-Paleógeno está caracterizado por un *hiatus* a escala regional.

2.2.3 Cenozoico

A inicios del Cenozoico, la cadena montañosa peninsular continuó erosionándose, produciendo la acumulación de depósitos continentales en el flanco occidental de la península. El arco volcánico se desplazó hacia el oriente y, durante todo el Paleógeno la margen occidental de la península registró una sedimentación más o menos continua, esto se expresa en la sobreposición e interdigitación de secuencias marinas y de ambientes transicionales del Cretácico Tardío, Paleoceno Eoceno, Mioceno y Plio-Pleistoceno.

Se tienen depósitos del Paleoceno a lo largo de la costa sureste del estado, desde Punta San Isidro hasta el Desierto del Vizcaíno, y en la porción sur central en la que subyacen a rocas volcánicas del Mioceno.

La unidad más representativa del Paleoceno en Baja California es la Formación Sepultura, la cual sobreyace en discordancia erosional a la Formación Rosario. Esta formación representa

ambientes que varían de marino somero a plataforma profunda, y su edad abarca hasta fines del Paleoceno Tardío.

La base de esta unidad es un conglomerado con clastos volcánicos, le sobreyacen estratos de arcosa cementada con calcita, areniscas con abundantes pellets de glauconita, un conglomerado con abundantes gasterópodos y nódulos de algas rojas, hacia la cima se encuentran estratos de caliza clasificada como bioesparrudita.

Durante el Eoceno, en el norte de Baja California, se depositaron secuencias de ambiente fluvial siendo el más representativo el Conglomerado Las Palmas. Éste forma parte de un sistema de valles aluviales formados por ríos que drenaron hacia el Pacífico durante este tiempo.

Por otra parte, en la franja oriental del estado, sobre las mesas cubiertas por rocas volcánicas, se han reportado depósitos marinos y continentales cuya posible edad es Eoceno.

En la región sur y centro del estado afloran areniscas cuarzo-feldespáticas y ortoconglomerados de ambiente continental, que sobreyacen al basamento granítico y subyacen a rocas volcánicas y vulcano-clásticas del Mioceno Temprano. Estos presentan una variación composicional gradual de base a cima; en la base los depósitos corresponden a areniscas cuarzo-feldespáticas y conglomerados con clastos de rocas graníticas, mientras que hacia la cima los depósitos se componen de rocas vulcanoclásticas. Debido a esta variación los depósitos a la base fueron nombrados Formación Mesa, mientras que los que componen la cima se denominan Formación Comondú, posteriormente la secuencia fue elevada al orden de grupo, y actualmente se reconoce como Grupo Comondú (Barajas y Delgado-Argote, 1995).

2.3 Geología Estructural

De acuerdo con los trabajos de Barajas y Delgado-Argote (1995) y Fabriol y colaboradores (1999), los eventos estructurales ocurridos en la región se pueden clasificar en prebatolíticos y postbatolíticos, de acuerdo con los efectos de la intrusión de plutones durante el Cretácico.

2.3.1 Deformación prebatolítica

Barajas y Delgado-Argote (1995) describen que el patrón estructural prebatolítico es muy complejo debido al metamorfismo y a la deformación debida a las intrusiones.

Las relaciones de contacto entre las rocas del arco Alisitos y los metasedimentos cratónicos del terreno peninsular son inciertas, por lo que no se puede afirmar que el contacto representa una discontinuidad estructural importante, que generalmente es interpretado como una zona de sutura.

Los estudios realizados en la zona de sutura sugieren el acortamiento de la corteza en dirección NE-SW, producto del transporte tectónico ocurrido de oriente a poniente. La idea más aceptada acerca de la causa de esta sutura es la colisión del arco Jurásico-Cretácico contra la margen de Norteamérica (Delgado-Argote y García-Abdeslem 1999).

La orientación general de los pliegues en las rocas del basamento presenta una tendencia general al noroeste, o subparalela al borde de los plutones. Las secuencias estratigráficas que presentan pliegues sin relación con los plutones presentan una orientación preferencial al W-NW, con estructuras volcadas hacia el NE.

Al norte de la zona de estudio, en la región de Calamajué, las rocas prebatolíticas presentan hasta 3 eventos de deformación. El evento principal produjo pliegues isoclinales y una foliación con orientación al NW, similar a la de las fallas que limitan las rocas del Paleozoico y Mesozoico. La edad de este evento es de 107 Ma (Barajas y Delgado-Argote, 1995).

2.3.2 Deformación postbatolítica

Tanto en la porción continental como marina, el sistema de esfuerzos principal es de tipo transtensivo, con extensión dominante en dirección E-W. En la porción continental el fallamiento es más evidente, afectando tanto a la cubierta vulcano-sedimentaria como al basamento.

En la península se encuentra registrada la deformación asociada al *Basin and Range*, expresada como sierras con escarpes orientados al NNW-SSE, asociadas a fallas laterales y normales con rumbo NW y WNW. Asociados a las fallas se encuentran enjambres de diques

basálticos y andesíticos, indicando su contemporaneidad con la actividad volcánica del Mioceno Medio.

El análisis cinemático de las fallas, así como los trabajos de geofísica realizados en el Golfo de California indican que este patrón de fallamiento con vulcanismo asociado se extiende hasta el Golfo de California, manteniendo un patrón de extensión E-W y un rumbo preferencial hacia el NW (Delgado-Argote y García-Abdeslem 1999; Delgado-Argote, 2000; Fabriol, *et al.*, 1999).

2.4 Evolución tectónica

La evolución de la península de Baja California está estrechamente relacionada a la apertura del Golfo de California y los procesos de formación del mismo. Dicha evolución se puede resumir en tres periodos de deformación.

Previo al comienzo de la apertura del Golfo ocurrió la acreción de un arco, durante el Jurásico-Cretácico, cuyos principales efectos son el acortamiento de la corteza en dirección NE-SW, y la intrusión de un gran complejo de plutones graníticos alineados al NW-SE durante el Cretácico.

2.4.1 Apertura del Golfo de California

La apertura comenzó con el final de la subducción en el sur de la Península de Baja California, ocurrido aproximadamente hace 12 millones de años. El cese de la subducción de la placa Farallón-Guadalupe produjo un cambio la configuración del límite entre las placas Pacífico y Norteamérica, así como la migración hacia el sur de la junta triple, a medida que la subducción cesaba.

Estos cambios involucraron diversos procesos tectono-magmáticos, así como un cambio en el estilo de deformación. Durante el Mioceno Medio y Tardío, la junta triple se desplaza hacia el extremo sur de la península, de modo que el movimiento entre las placas Pacífico y Norteamérica se da a través del sistema de falla trasforme diestra Tosco-Abreojos, situado cerca de la antigua zona de subducción y paralelo a ésta (Barajas y Delgado-Argote, 1995; Escalona-Alcázar y Delgado-Argote, 2000).

Paralelamente, el Mioceno Medio-Tardío, al oriente de la península se desarrolló un régimen de deformación extensional, el cual sustituyó el vulcanismo de arco. Este sistema ha sido considerado por algunos autores como una extensión del *Basin and Range*.

Este nuevo sistema dio lugar a la aparición de fallas normales a lo largo de toda la margen oriental de la península de Baja California, así como a la formación de cuencas marinas someras. Este evento se considera el inicio de la apertura del Golfo de California.

Asociados a este periodo de extensión ocurrieron eventos volcánicos explosivos que hoy en día son observables en la Bahía Los Ángeles; estas evidencias permitieron estimar la existencia de un arco magmático, cuya edad se ha calculado que se encuentra entre 7 y 15 Ma (Gastil *et al.*, 1979; Aragón-Arreola, *et al.*, 2005; Escalona-Alcázar y Delgado Argote, 2000).

A finales del Mioceno, la península de Baja California constituyó una micro placa cuyo movimiento relativo a la placa Pacífico ocurrió a lo largo de la Falla Tosco-Abreojos. Por otra parte, el movimiento respecto a la placa de Norteamérica ocurrió a lo largo de un sistema de fallas normales, orientadas al NNW, de la provincia extensional del Golfo de California.

A partir de los 5 Ma, la dorsal del Pacífico oriental se desplaza hacia el norte, en la depresión del Golfo, formando centros de dispersión conectados mediante fallas transformes, este es el sistema San Andrés-Golfo de California.

Este sistema actualmente se encuentra activo y es responsable del desplazamiento relativo de la Península de Baja California hacia el NW a una tasa de 5 a 6 cm/año (Fabriol *et al.*, 1999; Escalona-Alcázar y Delgado-Argote, 2000).

CAPÍTULO 3

Sistemas y Alteraciones Hidrotermales

Introducción.

La geotermia se define como el calor almacenado y generado en el interior de la Tierra, cuyas fuentes son el decaimiento radiactivo de minerales en la corteza y el calor remanente de la formación del planeta. Se estima que el calor almacenado es de 12.6 billones de exajoules, y se disipa en la superficie terrestre a una tasa de 5,400 millones de exajoules [EJ] por año. De todo este potencial geotérmico sólo se utilizan entre 174 y 421 EJ anuales en producción de energía eléctrica y alrededor de 300 EJ para uso directo del calor.

La extracción de la energía geotérmica es posible gracias a la interacción agua-roca; para su aprovechamiento se construyen pozos en zonas de circulación de aguas subterráneas calentadas por las rocas a profundidad, el fluido caliente asciende por los pozos a altas temperaturas y es utilizado para mover los generadores eléctricos.

Para poder aprovechar este recurso es necesario aplicar las técnicas de prospección adecuadas. La prospección de sistemas geotérmicos se basa en los productos de la interacción entre los fluidos hidrotermales y las rocas por las que circula, así como en la detección de anomalías térmicas y su relación con sistemas hidrológicos (AGM, 2007; Diamond, 2006).

3.1 Sistemas geotérmicos

Generalmente, los sistemas geotérmicos están constituidos por una fuente de calor, un fluido en circulación y una capa de roca sello que facilite la presurización del sistema e impida fugas excesivas de energía.

En la mayoría de los campos geotérmicos, las altas temperaturas son causadas por la presencia de cuerpos intrusivos en altos niveles de la corteza y/o a actividad volcánica reciente. Otras fuentes son el ascenso de aguas subterráneas que han circulado a profundidades mayores a 2 o 5 km, calentamiento anómalo por decaimiento radiactivo local y transferencia de calor por movimiento de placas tectónicas (común en fallas transformes).

La principal manifestación superficial de la presencia de estas fuentes es la alteración hidrotermal, comúnmente acompañada de la pérdida de vegetación en la zona o modificaciones visibles de la misma (especies, coloración, etcétera), y sólo en algunas ocasiones de emanaciones naturales de fluidos calientes (manantiales, fumarolas, pozas o géiseres).

3.1.1 Clasificación de sistemas geotérmicos

Un modo común de clasificar a los sistemas geotérmicos es tomando como parámetros el ambiente geológico y el régimen de transferencia de calor. De esta clasificación podemos mencionar los sistemas geotérmicos convectivos, los sistemas geotérmicos conductivos y los sistemas acuíferos profundos.

3.1.1.1 Sistemas geotérmicos convectivos

Se describen como sistemas hidrotermales en ambientes de alta porosidad y permeabilidad, relacionados con intrusiones magmáticas recientes. Se componen por la circulación de fluidos naturales en ambientes continentales y marinos.

Los ambientes típicos de esta categoría son zonas de expansión oceánicas, zonas de subducción, *rifts* continentales y zonas anómalas intraplaca. Estos sistemas se caracterizan porque el transporte de calor ocurre mediante la circulación de un fluido.

Las temperaturas de estos sistemas son muy variadas, pueden ser bajas (<100 °C), intermedias (100-180 °C) o altas (>180 °C), según el ambiente en el que se desarrolle el sistema.

3.1.1.2 Sistemas geotérmicos no convectivos

La principal característica de estos sistemas es un régimen térmico en que se hacen circular fluidos inyectados artificialmente al terreno. Dentro de esta categoría se pueden encontrar los sistemas de roca seca caliente, los sistemas conductivos someros y los cuerpos de magma (AGM, 2007).

3.1.1.3 Sistemas acuíferos profundos

Como su nombre lo indica, se trata de sistemas acuíferos calientes debido a la profundidad a la que se encuentran, al igual que los sistemas convectivos o hidrotermales se componen de fluidos calientes naturales. Dentro de esta categoría podemos encontrar dos sub tipologías: acuíferos hidrostáticos y acuíferos profundos geoprezurizados (AGM, 2007).

3.2 Alteraciones hidrotermales

La alteración hidrotermal es un proceso complejo que involucra cambios mineralógicos, químicos y texturales en las rocas afectadas. Ocurre debido al desequilibrio físico-químico de las asociaciones mineralógicas producto de su interacción con fluidos calientes, resultando en la formación de nuevas asociaciones minerales, estables a las nuevas condiciones. La alteración hidrotermal refleja la interacción del fluido, típicamente dominado por agua, con las rocas a temperaturas desde 100 °C hasta >300 °C.

Los principales factores que controlan el proceso de alteración son: la naturaleza de la roca encajonante, la composición del fluido, la concentración, actividad y potencial químico de los componentes en solución (Thompson y Thompson, 1996; Pirajno, 2009).

El estudio de las asociaciones mineralógicas de la alteración hidrotermal, como producto de actividad geotérmica, es de gran utilidad en la exploración, ya que proporciona información sobre las rocas almacenadoras de la energía y las características del fluido, así como del rango de temperatura y la evolución del sistema geotérmico (Thompson y Thompson, 1996).

3.2.1 Tipos de alteración hidrotermal

Existe un gran número de clasificaciones de alteraciones hidrotermales, basadas en el ambiente de formación, los depósitos minerales a los que se asocian, etcétera. Sin embargo,

existen dos grandes categorías de clasificación: por asociaciones mineralógicas y por cambios químicos. La primera consiste en una descripción de las asociaciones mineralógicas dominantes, mientras que la segunda categoría hace referencia a la química del fluido involucrado en el proceso de alteración. Dados los objetivos del presente estudio, sólo se describirán las paragénesis de alteración más comunes, descritas ampliamente por Franco Pirajno (2009).

3.2.1.1 Alteración Propilítica

Propilita es un término viejo utilizado para describir la alteración de rocas volcánicas. La alteración propilítica se caracteriza por la adición de agua y dióxido de carbono a la estructura de los minerales. Los minerales típicos de este tipo de alteración son la epidota, la clorita, algunos carbonatos, albita, feldespato potásico y pirita. También es común encontrar sericita, óxidos de hierro, montmorillonita y zeolitas.

Se identifica porque produce una coloración verdosa en las rocas. Tiende a ser más pervasiva en las zonas interiores del sistema hidrotermal, es decir, aumenta con la cercanía a la fuente de calor.

3.2.1.2 Alteración Fílica

La alteración filica o sericítica se caracteriza por la asociación mineral cuarzo-sericita-pirita. Otras fases minerales asociadas usuales son el feldespato potásico, la caolinita, la calcita, la biotita, la anhidrita y la apatita.

3.2.1.3 Alteración argílica y argílica avanzada

La alteración argílica está caracterizada por la formación de minerales arcillosos debido al intenso proceso de hidrólisis, producto de la gran acidez de los fluidos. Ocurre a temperaturas entre 100 °C y 300 °C. Los minerales arcillosos son producto de la alteración de plagioclasas, feldespatos y silicatos máficos.

La alteración argílica se divide a su vez en argílica y avanzada. La alteración argílica se define por la presencia de montmorillonita y arcillas del grupo de la caolinita. Es común encontrar algunos sulfatos asociados.

Por su parte, la alteración argílica avanzada se produce cuando el ataque de fluidos ácidos es muy intenso y es acompañado por la lixiviación de cationes alcalinos, produciendo la destrucción total de los feldespatos y silicatos máficos. Los minerales típicos de este tipo de alteración a diferentes temperaturas son la caolinita, dickita, pirofilita, barita, alunita y diásporo. Asociados a ella se pueden encontrar algunos sulfuros como la covelita, la digenita y la enargita (Pirajno, 2009).

CAPÍTULO 4

Fundamentos Teóricos

Introducción.

La Percepción Remota es la rama de la Geofísica que tiene como objetivo obtener información acerca de un objeto, área o fenómeno, a través del análisis de mediciones de la energía electromagnética proveniente de dicho objeto o área y que son adquiridos mediante sensores que no tienen contacto físico con el objeto estudiado (Lillesand y Kiefer, 1994). Sabins (1999) la define como la ciencia de adquirir, procesar e interpretar imágenes y datos relacionados, adquiridos por sensores aéreos o satelitales, los cuales graban la energía que reciben como resultado de la interacción entre la materia y la energía electromagnética.

El proceso de adquisición de información por medio de la detección de energía electromagnética con sensores remotos es muy similar al que realizan nuestros ojos, en donde la fuente de la energía electromagnética es el Sol, esta energía viaja en el espacio se propaga en la atmósfera, interactúa con la materia. Como resultado de esa interacción, una parte de la energía puede ser transmitida, otra absorbida o dispersada y otra parte es reflejada. La energía reflejada es retransmitida a través de la atmósfera para finalmente ser captada por un sensor. Después de la adquisición de los datos hay una etapa de pre-procesamiento, en la que los datos son digitalizados, grabados en un orden matricial y corregidos por efectos geométricos y radiométricos, debidos a las variaciones del ángulo al que se obtiene la imagen y a su paso por la atmósfera y la calibración del sensor (Sabins, 1999).

4. 1 Fuentes de energía y principios de radiación

La propagación de la energía electromagnética sigue ciertas leyes físicas (Khorram, et al; 2012). Planck descubrió que la cantidad de energía electromagnética (fotón) es directamente proporcional a la frecuencia de la radiación de la energía, además definió una constante (h), la cual permite relacionar la frecuencia (f) con la energía radiante (Q).

$$Q = hf \quad \dots (1)$$

4.1.1 Fuente de radiación

La energía electromagnética es generada por varios mecanismos, incluyendo cambios en los niveles energéticos de los átomos, aceleración de cargas eléctricas, decaimiento de materiales radiactivos, y el movimiento de los átomos y partículas que generan calor. Las reacciones nucleares dentro del Sol producen radiación electromagnética, la cual se transmite hacia el exterior, esta radiación atraviesa la atmósfera antes de llegar a la superficie de la Tierra, y llegando a ésta una parte de la energía es reflejada y la otra es transmitida.

La radiación electromagnética se compone de un campo eléctrico (E) que varía de magnitud en dirección perpendicular a su dirección de propagación, y un campo magnético (H) el cual es perpendicular al campo eléctrico y se propaga en fase respecto a éste (Campbell, 2002).

La energía electromagnética se puede caracterizar a partir de su longitud de onda, frecuencia, amplitud y fase. Se tiene la siguiente relación entre la frecuencia y la longitud de onda.

$$C = \lambda * f \quad \dots (2)$$

Donde C es la velocidad de propagación, λ es la longitud de onda y f la frecuencia. Por lo que se puede caracterizar a la energía electromagnética utilizando su frecuencia o su longitud de onda. La radiación electromagnética es descrita en función de uno u otro parámetro y las divisiones del espectro electromagnético son esencialmente arbitrarias (Campbell, 2002).

4.2 El espectro electromagnético

La forma más familiar de la radiación electromagnética es la luz visible, ésta es una de las regiones más importantes del espectro electromagnético, el cual incluye los diferentes intervalos de longitudes de onda de la energía electromagnética.

A partir de las longitudes de onda o frecuencias de la energía electromagnética se construyó el espectro electromagnético, el cual está dividido en regiones que abarcan un rango de longitudes de onda o frecuencias. Estas regiones son: rayos gamma, rayos X, ultravioleta,

visible, infrarrojo, microondas y ondas de radio, enunciadas de menor a mayor longitud de onda (figura 4.2.1). Los límites de estas regiones se enlistan en la tabla 4.1.

Región	Límites
Rayos Gamma	<0.03nm
Rayos X	0.03-300 nm
Ultravioleta	0.3-0.38 μm
Luz visible	0.38-0.72 μm
Infrarrojo	
Cercano	0.72-1.3 μm
Medio	1.3-3.0 μm
Lejano	7.0-1000 μm
Microondas	1mm-30cm
Radio	>30cm

Tabla 4.1 Regiones del espectro electromagnético. Campbell (2002).

Aunque el espectro electromagnético es muy amplio, en Percepción Remota sólo se utiliza una parte del mismo. Comúnmente sólo se utiliza la radiación cuya longitud de onda se encuentra entre la región de ultravioleta hasta la región de las microondas, aunque esto varía según los objetivos del estudio. En este caso se utilizarán imágenes tomadas únicamente en la región del visible y hasta el infrarrojo medio (Campbell, 2002).

4.2.1 El espectro ultravioleta

La región ultravioleta fue descubierta en 1801 por J. W. Ritter, un científico alemán. La región ultravioleta se puede dividir a su vez en ultravioleta cercano (0.32-0.4 micrómetros), ultravioleta lejano (0.32-0.28 micrómetros) y ultravioleta extremo (debajo de 0.28 micrómetros).

La radiación en el rango del ultravioleta cercano es ampliamente conocida porque induce la fluorescencia, que es la emisión de radiación visible de algunos materiales, debido a esto es de gran utilidad en la Percepción Remota, sin embargo no se utiliza comúnmente debido a que la radiación ultravioleta es absorbida por el ozono en la atmósfera.

4.2.2 El espectro visible

El espectro visible constituye una pequeña porción del espectro electromagnético, sin embargo es una región de gran importancia en Percepción Remota. Los límites de esta región están definidos de acuerdo con la sensibilidad del sistema visual de los humanos, y abarca el intervalo que va de 0.4 hasta 0.7 μm de longitud de onda.

Las propiedades ópticas de la radiación visible fueron estudiadas por Isaac Newton, quien descubrió que la luz visible se puede separar en 3 segmentos utilizando un prisma transparente; estos tres segmentos son los que hoy en día conocemos como colores aditivos primarios y son azul (0.4-0.5 μm), verde (0.5-0.6 μm) y rojo (0.6-0.7 μm); estos tres colores en misma proporción forman el color blanco, se les denomina aditivos.

El color de un objeto se puede definir de acuerdo con la longitud de onda de la luz que refleja, es decir, un objeto es azul cuando refleja luz con longitudes de onda cercanas a 0.4 μm , es verde si refleja luz verde, etcétera.

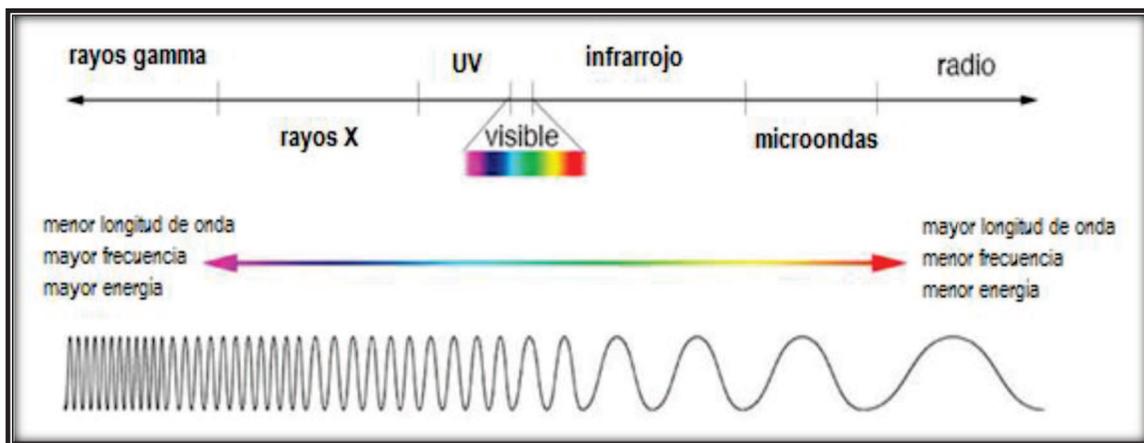


Figura 4.1. Espectro electromagnético (NASA, 2015).

Siguiendo esta misma lógica, los colores intermedios se forman a partir de una combinación de diferentes proporciones de azul, verde y rojo, en los materiales los colores intermedios indican que el objeto que se está observando refleja dos o más colores aditivos en diferentes proporciones (Campbell, 2002).

Además de los colores aditivos también existen los colores sustractivos. Los colores sustractivos se caracterizan porque absorben un tercio del espectro visible. El amarillo absorbe luz azul y refleja el rojo y verde, el cian absorbe luz roja mientras refleja luz verde y azul, el magenta absorbe luz verde y refleja en rojo y azul. La mezcla de estos colores en mismas proporciones forma el color negro (figura 4.2).

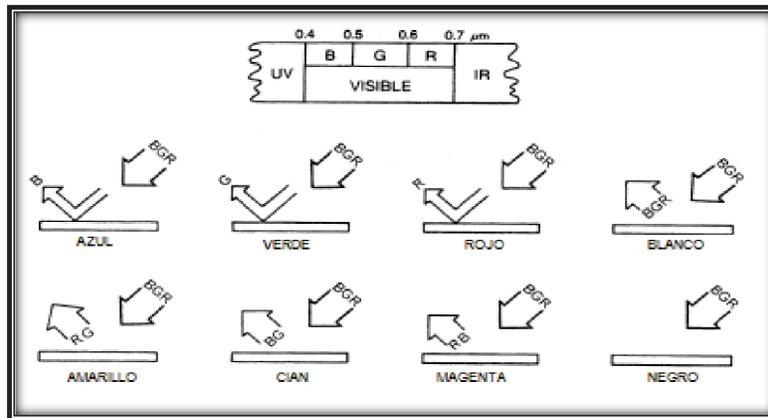


Figura 4.2 Colores aditivos (arriba) y sustractivos (abajo), Campbell (2002).

4.2.3 El espectro infrarrojo

La región que abarca el espectro infrarrojo es muy amplia en comparación con la del espectro visible, va de los 0.72 hasta los 15 micrómetros. Fue descubierta en 1800 por el astrónomo británico William Herschel.

Debido a su amplio rango, dentro de esta región se encuentra radiación con propiedades muy variadas. Esta región se ha subdividido a su vez en dos categorías, la primera se compone de la radiación del infrarrojo cercano y del infrarrojo medio; el nombre de cercano hace referencia a que es la región más próxima al espectro visible. Esta región del espectro electromagnético es de gran importancia en la Percepción Remota, ya que en ella se pueden observar diferencias espectrales importantes entre los materiales.

La segunda categoría del infrarrojo se conoce como infrarrojo lejano o térmico, consiste en longitudes de onda mucho mayores que las del espectro visible, y se extiende hasta el límite con la región de microondas (Lillesand y Kiefer, 1994).

4.2.4 Región de microondas

Es la región de mayores longitudes de onda que se utilizan comúnmente en Percepción Remota. Esta región abarca longitudes de onda de 1 micrómetro hasta 1 milímetro. Las longitudes de onda más pequeñas de esta región tienen un comportamiento muy similar a la radiación del infrarrojo térmico (Campbell, 2002).

4. 3 Interacción entre la materia y la energía

Cuando la radiación electromagnética entra en contacto con la materia pueden ocurrir las siguientes interacciones: absorción, reflexión o dispersión, además de estos fenómenos también ocurre la emisión de la energía por parte de la materia y la transmisión a través de la misma. La Percepción Remota trabaja con la radiación reflejada, absorbida, dispersada y la emitida.

4.3.1 Interacción con la Atmósfera

Toda la radiación que se utiliza en los sensores remotos atraviesa la atmósfera, de modo que durante su trayectoria es afectada por varios procesos físicos, que incluyen la dispersión, la absorción y la refracción.

Si el sensor es transportado en un avión de bajo vuelo, los efectos de la atmósfera sobre la calidad de la imagen pueden ser menores. En los sensores satelitales la energía debe atravesar toda la atmósfera y en este caso si existe un impacto importante sobre la calidad de las imágenes y los datos generados. Esta es la razón por la que el conocimiento de la interacción entre la atmósfera y la energía es fundamental en la Percepción Remota.

4.3.1.1 Dispersión atmosférica

La dispersión es el fenómeno de re direccionar la energía electromagnética cuando esta choca con una partícula o molécula durante su trayecto, y ocurre debido a la presencia de particular o moléculas suspendidas en la atmósfera. La intensidad de la dispersión atmosférica depende del tamaño de las partículas, su abundancia, la longitud de onda de la radiación y el espesor de atmósfera que atraviese la energía. La dispersión produce que una parte de la energía incidente regrese hacia el espacio y otra continúe en dirección hacia la superficie terrestre.

Una forma de dispersión muy común es la dispersión de Rayleigh, y es debida a la presencia de algunas moléculas en la atmósfera, esta se produce cuando las partículas en la atmósfera tienen diámetros. Este tipo de dispersión es el proceso dominante a alturas entre los 9 y 10 km. La dispersión Rayleigh en la región de la luz azul es al menos 4 veces mayor que la dispersión en la luz roja (Campbell, 2002).

Además de la dispersión Rayleigh existe otro tipo de dispersión que involucra la presencia de partículas grandes en la atmósfera, como polen, polvo o aerosoles. Esta dispersión se conoce como *dispersión Mie*. A diferencia de la dispersión Rayleigh, la dispersión Mie tiene influencia en un gran rango de longitudes de onda, dentro y cerca del espectro visible. La dispersión Mie también es dependiente de la longitud de onda; tiende a ser mayor en la parte más baja de la atmósfera (0 a 5 km), en donde la abundancia de partículas es mayor.

Se dice que hay dispersión no selectiva cuando la dispersión es causada por partículas que son mucho más grandes que la longitud de onda, recibe este nombre debido a que es un tipo de dispersión independiente de la longitud de onda, por lo que la radiación en todas las longitudes de onda del espectro visible son igualmente dispersadas (Campbell, 2002; Khorram, *et al.*, 2012).

4.3.1.2 Efectos de la dispersión atmosférica

El principal efecto de la dispersión atmosférica es que la atmósfera tenga un brillo propio. Esto provoca que en el espectro visible, los objetos oscuros se vean más brillantes de lo que realmente son.

En Percepción Remota esto tiene graves consecuencias, ya que la radiación grabada en la región del azul presenta valores incrementados por los efectos de la dispersión atmosférica (Khorram, *et al.*, 2012).

4.3.1.3 Refracción

La refracción es el cambio en la dirección de un rayo cuando este viaja de un medio a otro. Este fenómeno también ocurre en la atmósfera, cuando la luz atraviesa las distintas capas de la misma. El índice de refracción (n) se define como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío (c) y la velocidad de la luz en el medio (c_m).

$$n = \frac{c}{c_m} \quad \dots (3)$$

El ángulo que define la trayectoria del rayo refractado está dado por la Ley de Snell:

$$n \operatorname{sen}(\theta) = n' \operatorname{sen}(\theta') \quad \dots (4)$$

Donde n y n' son los índices de refracción del primer y segundo medio, respectivamente, y θ y θ' son los ángulos medidos respecto a la superficie normal (Campbell, 2002).

4.3.1.4 Absorción

La absorción de radiación ocurre cuando la atmósfera atenúa fuertemente la transmisión de la radiación. Tres gases son los responsables de la absorción de radiación en la atmósfera: el ozono, el dióxido de carbono y el vapor de agua. El vapor de agua es mucho más eficiente absorbiendo la radiación que cualquier otro gas o combinación de gases atmosféricos (Khorram, *et al.*, 2012).

4.3.1.5 Ventanas atmosféricas

Debido a las barreras que se forman en la atmósfera por la presencia de gases y moléculas, la transmisión de la radiación electromagnética ocurre de forma selectiva y sólo se transmiten ciertas longitudes de onda. Los intervalos de longitudes de onda que se transmiten de un modo relativamente fácil a través de la atmósfera se conocen como ventanas atmosféricas. Su posición, extensión y eficacia están determinadas por los espectros de absorción de los gases atmosféricos. La importancia de las ventanas atmosféricas en la Percepción Remota reside en que a partir de ellas se definen las longitudes de onda que pueden utilizarse para registrar una imagen (Campbell, 2002; Khorram, *et al.*, 2012).

4.3.2 Interacciones con la superficie

Al igual que en la atmósfera, la energía electromagnética es reflejada, absorbida o transmitida cuando alcanza la superficie terrestre. La proporción en que ocurren estos procesos depende de la naturaleza de la cobertura, la longitud de onda de la energía y el ángulo de iluminación (Campbell, 2002).

4.3.2.1 Reflexión

La reflexión ocurre cuando un rayo de luz es redirigido al impactar una superficie no transparente. La naturaleza de la reflexión depende de la cantidad de las irregularidades de la superficie (rugosidad o suavidad) en relación con la longitud de onda de la radiación.

Si la superficie es plana en relación con la longitud de onda, se produce la reflexión especular. La reflexión especular re-direcciona toda, o casi toda, la radiación incidente en una sola dirección, para tales superficies el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. En la radiación visible, la reflexión especular puede ocurrir en superficies como un espejo, cuerpos de agua o metales de superficie plana.

Cuando la superficie es rugosa respecto a la longitud de onda, esta actúa como un reflector difuso. En la reflexión difusa la energía se dispersa aproximadamente igual en todas las direcciones (Campbell, 2002; Khorram, *et al.*, 2012).

4.3.2.2 Transmisión

La transmisión de la radiación ocurre cuando esta atraviesa una sustancia sin sufrir una atenuación significativa. La *transmitancia* (t) mide la capacidad de un medio para transmitir energía.

$$t = \frac{\text{radiación transmitida}}{\text{radiación incidente}} \quad \dots (5)$$

La transmitancia de los materiales varía grandemente con la longitud de onda (Campbell, 2002).

4.3.2.3 Reflectancia

En muchas aplicaciones de la Percepción Remota, la brillantez de una superficie es mejor representada como reflectancia. La *reflectancia* (R) se expresa como la brillantez relativa de una superficie medida para un intervalo de longitudes de onda específico:

$$R = \frac{\text{Brillantez observada}}{\text{Irradiancia}} \quad \dots (6)$$

La reflectancia es un número adimensional (entre 0 y 1), pero generalmente se expresa como porcentaje (Campbell, 2002).

4. 4 Adquisición de la información

4.4.1 Sensores y plataformas

Un sistema de teledetección requiere al menos tres componentes: una fuente energética, una superficie de reflexión y un sensor. La fuente de energía, en el caso del presente trabajo, es la luz solar, la superficie de reflexión es la superficie del terreno sobre el que grabará la imagen y el sensor dependerá del tipo de imagen y plataforma que se utilice.

La función principal de un sensor remoto es detectar y grabar la información de una escena. Un sensor puede grabar esta información de modo analógico o digital, siendo este último el formato más usual.

Una manera de clasificar a los sensores es en función del tipo de energía que utilizan, de este modo un sensor puede ser pasivo o activo. Un sensor es pasivo si los datos que graba son adquiridos a partir de una fuente de energía natural o exterior al mismo, mientras que los sensores activos emiten radiación artificial la cual es reflejada y después grabada, como en los sistemas de radar.

La resolución espectral de los sensores describe el rango de longitud de onda de la sensibilidad de los sensores. En este contexto, se pueden clasificar a los sensores remotos en función de su sensibilidad espectral como pancromáticos (una banda espectral que abarca todo el espectro visible), multiespectral (varias bandas) e hiperespectrales (decenas y hasta cientos de bandas espectrales).

Por su parte, una plataforma es el vehículo que transporta al sensor. Las plataformas utilizadas actualmente se pueden dividir en dos categorías principales: aéreas y espaciales. Las plataformas espaciales pueden ser de tipo estacionarias o de órbita ecuatorial, polar, o semipolar, según se acoplen en órbita respecto al ecuador, el eje de la Tierra u oblicuamente al eje de la Tierra, respectivamente (Campbell, 2002; Khorram, *et al.*, 2012).

4.4.2 Resolución de los sistemas de adquisición

Para comprender lo que la Percepción Remota puede hacer o no, es importante analizar las implicaciones de la resolución de las imágenes ya que en esta ciencia la resolución abarca una serie de características específicas de los datos obtenidos por lo que se pueden distinguir cuatro tipos de resolución: espacial, espectral, temporal y radiométrica (Khorram *et al.*, 2012).

La capacidad de mapear distintos minerales o grupos de minerales depende de la resolución de los sensores remotos, por lo que es de vital importancia reconocer los alcances de este parámetro, de acuerdo con los objetivos que se persigan (Bedell, 1994).

4.4.2.1 Resolución espacial

La habilidad de identificar la forma y geometría de un objeto es un elemento fundamental en cualquier estudio de Percepción Remota, el concepto de resolución espacial designa al objeto más pequeño que puede ser distinguido en una imagen.

La resolución espacial es la medida de la precisión del detalle en una imagen, esto se refiere al área de superficie captura por pixel en una imagen, como los pixeles son cuadrados esta resolución se expresa como longitud por lado de un pixel. La resolución espacial tiene un papel protagónico en la interpretación de la imagen debido a que condiciona el nivel de detalle que esta ofrece, en consecuencia la resolución espacial está en estrecha relación con la escala de detalle (Khorram, *et al.*, 2012).

4.4.2.2 Resolución espectral

La resolución espectral es representada por el ancho de bandas espectrales y por el número de bandas de un sensor; se define como la capacidad de detectar diferencias de longitud de onda entre diferentes objetos o áreas.

Este concepto implica que un sensor será más útil cuanto mayor número de bandas posea, ya que facilitará la caracterización espectral de las diferentes cubiertas, al mismo tiempo conviene trabajar con bandas más estrechas, ya que bandas muy amplias suponen registrar un valor promedio de la energía grabada (Campbell, 2002; Khorram, *et al.*, 2012).

4.4.2.3 Resolución temporal

La resolución temporal es el tiempo que tarda un sensor en volver a una misma ubicación geográfica, esta depende de su órbita y trayectoria. Se refiere a la periodicidad con la que este adquiere imágenes de la misma porción de la superficie de la Tierra.

La resolución temporal es una consideración importante que se debe tener en muchas aplicaciones, ya que determina la capacidad de grabar los cambios en la superficie a través del tiempo (Campbell, 2002; Khorram, *et al.*, 2012).

4.4.2.4 Resolución radiométrica

La sensibilidad de un sensor a los valores de brillantez, es decir la diferencia de intensidad mínima que el sensor puede detectar es la resolución radiométrica.

Se mide usualmente en términos de bits, y se refiere al número de niveles en la escala de grises que un sensor puede grabar, algunos valores típicos son 8 bit (0-255), 10 bit (0-1023), 11-bit (0-2,047), 12-bit (0-4,095) y 16-bit (0-65,535) (Khorram, *et al.*, 2012).

4.4.2.5 Relaciones entre los diferentes tipos de resolución

En general, cuanto mayor sea la resolución espacial, menor será la resolución temporal, espectral y radiométrica. El aumento en cualquiera de las resoluciones implica un incremento del volumen de información, que a su vez implica una mayor capacidad de almacenamiento y mayor tiempo de procesamiento. En consecuencia, al diseñar un sensor remoto es necesario definir el tipo de resolución de mayor importancia según los objetivos a cumplir (Khorram, *et al.*, 2012).

4.4.3 Imágenes digitales

Las imágenes digitales son adquiridas sistemáticamente utilizando una gran familia de instrumentos que pueden adquirir información de la superficie terrestre, esto lo hacen grabando la radiación reflejada o emitida en porciones de la superficie observada (píxeles), estas porciones en conjunto componen una imagen. Por tanto, una imagen digital se compone de una matriz de centenas de píxeles, y cada píxel representa el brillo de una porción de la superficie, grabada digitalmente como un valor numérico (numero digital)

proporcional a la brillantez de dicha superficie. Generalmente esta información se graba como valores separados para varias regiones del espectro electromagnético.

Para grabar una imagen digital es necesario colocar un material sensible a la luz en el plano focal; los detectores remotos son sustancias sensibles a la luz que generan corrientes eléctricas cuando la luz choca con el lente de la cámara, creando así una imagen cuyos valores de pixel son proporcionales a las cargas eléctricas provocadas por el impacto de los fotones (Khorram, *et al.*, 2012; Campbell, 2002).

4.4.4 Firma espectral

Fundamentalmente, lo que permite que se pueda identificar un material en la superficie terrestre mediante la Percepción Remota es el hecho de que todos los materiales tienen propiedades particulares de emisión, absorción y reflectancia, el conjunto de estas características se conoce como firma espectral o perfil, y la razón por la que se le llama firma es debido a que los patrones espectrales de cada material son característicos únicos y absolutos, sin embargo es importante tener en mente que existen rangos de variación de la firma espectral por ejemplo, la firma espectral de la vegetación varía en gran medida con el contenido de agua, la salud y la forma de las hojas de la planta en cuestión (Khorram, *et al.*, 2012; Lillesand y Kiefer, 1994).

4.4.5 Bandas espectrales

Así como las cámaras usan películas de color para capturar una escena, los detectores se pueden configurar para grabar regiones del espectro electromagnético en bandas separadas o canales. Los arreglos de los dispositivos utilizados tienen sensibilidades determinadas por las propiedades físicas de los materiales utilizados en su construcción. Los sensores digitales utilizados comúnmente en Percepción Remota tienen sensibilidades que abarcan el espectro visible y se extienden hasta el infrarrojo.

Los sensores digitales están diseñados para tener sensibilidades espectrales enfocadas en un estrecho intervalo del espectro y proveer datos con una alta precisión en la medición de brillantez, a cada intervalo del espectro que es grabado individualmente se le conoce como banda espectral (Khorram, *et al.*, 2012).

4. 5 Programa Landsat

El programa Landsat, creado por la NASA, ha grabado la mayor cantidad de información de observaciones de la tierra desde el espacio. Este programa tiene más de 40 años en operación y ha permitido, entre otras cosas, observar cómo se ha transformado la superficie terrestre a lo largo del tiempo. Este programa fue inspirado en las fotografías de la Tierra tomadas por los astronautas desde el espacio.

La primera generación, formada por los Landsat 1, 2 y 3, operó de 1972 hasta 1985, cuando fue remplazada por la segunda generación. La segunda generación de Landsat se formó con los satélites Landsat 4, 5 y 7, los cuales continúan en órbita hasta el día de hoy. El Landsat 6 fue lanzado en 1993, pero falló por lo que no pudo alcanzar su órbita. El último lanzamiento de la NASA fue el del Landsat 8, el cual comenzó oficialmente sus operaciones en el espacio el 30 de mayo de 2013 (Sabins, 1999; NASA, 2013).

4.5.1 Landsat MSS

En 1965 el director del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) propuso la idea de crear un programa en el que se obtuviera información de los recursos naturales de la Tierra a partir de sensores remotos transportados en un satélite. Sin embargo, este proyecto dio inicio hasta 1970 después de varias disputas políticas, civiles y ambientales (NASA, 2013).

El primer satélite de este programa fue el Earth Resource Technology Satellite (ETRS-1), posteriormente llamado Landsat 1, fue lanzado el 23 de julio de 1972 y operó durante 6 años. Este satélite contaba con dos instrumentos: un sistema de cámara integrado por la *Radio Corporation of America* (RCA) llamado *Return Beam Vidicon* (RBV), y un sistema de escáner multiespectral (MSS). En este primer satélite el instrumento principal era el RBV, sin embargo este fue el causante de que el satélite perdiera altura.

El Landsat 1 funcionó hasta enero de 1978, durante este tiempo el MSS grabó información en cuatro bandas espectrales: verde, rojo y dos bandas infrarrojas, adquiriendo más de 300,000 imágenes de la superficie de la Tierra.

El 22 de enero de 1975 la NASA lanzó el Landsat 2, que seguía siendo un proyecto experimental. Este nuevo satélite operaba con los mismos sensores que su antecesor, el RBV

y el MSS. Landsat 2 operó durante 7 años y fue removido en 1982 debido a problemas de control. El Landsat 3 fue lanzado en marzo de 1978 y funcionó hasta el 31 de marzo de 1983.

Landsat 1, 2 y 3 tenían las mismas dimensiones, 3 m de alto por 1.5 m de diámetro, y contaban con paneles solares de 4 m de longitud. Cada uno de ellos pesaba aproximadamente 815 kg y orbitaban en una trayectoria circular, polar y helio sincrónica a una altura nominal de 900 km y un periodo de 14 órbitas/día.

4.5.2 Landsat TM

En la segunda generación de Landsat, las imágenes son adquiridas con el sensor TM, que es un escáner óptico-mecánico de barrido perpendicular a la trayectoria del satélite. Después un espectrómetro separa la energía que ha sido reflejada en la superficie terrestre en intervalos de longitudes de onda estrechos (bandas espectrales). Finalmente la información de cada banda se graba como una imagen, por separado (Sabins, 1999).

El 16 de julio de 1982 se lanzó la misión Landsat 4, la nave espacial de este fue significativamente diferente a la de los Landsat anteriores, ya no contaba con el sensor RBV.

Este nuevo satélite contaba con el sistema MSS, además de un sensor con mejoras en la resolución espacial y espectral, es decir, podían ver una parte más del espectro electromagnético y grabar imágenes con mayor detalle del relieve, este nuevo sistema se llamó Thematic Mapper (TM).

El Landsat 4 contaba con 7 bandas espectrales: 2 en el espectro infrarrojo medio, una en el infrarrojo cercano y una en el térmico, además de las bandas en azul, verde y rojo. Al igual que sus predecesores, fue lanzado en una órbita helio sincrónica y polar. Sin embargo, la altura de la órbita disminuyó de 900 a 705 km. Con la mejora de estos satélites y del procesamiento digital de las imágenes, el sensor Thematic Mapper (TM) se convirtió en el estándar en la exploración mineral (Bedell, 1994).

A un año de su lanzamiento, el Landsat 4 perdió el uso de dos de sus paneles solares y dos de sus transmisores de enlace directos, de modo que no fue posible retransmitir los datos hasta que se corrigieran estos problemas. Este sistema fue dado de baja en 2003.

El Landsat 5 se lanzó el 1 de marzo de 1984, diseñado y construido al mismo tiempo que el Landsat 4, llevando la misma carga útil que su antecesor. En 1987, el transmisor de Landsat 5 falló provocando que los datos no pudieran ser adquiridos, y para 1995 se apagó el instrumento MSS.

En noviembre de 2011, el instrumento TM se detuvo debido a que falló un componente electrónico, y después de varios intentos de restaurarlo el Landsat 5 fue dado de baja oficialmente el 21 de diciembre de 2012, después de 28 años y 10 meses (NASA, 2013).

4.5.3 Landsat ETM

El 5 de octubre de 1993 se lanzó el primer satélite equipado con el sensor Enhanced Thematic Mapper (ETM): el Landsat 6. Sin embargo, este lanzamiento fracasó debido a que no se obtuvo la velocidad necesaria para alcanzar la órbita.

Fue hasta el 15 de abril de 1999 que se puso en órbita el primer satélite Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), con el programa Landsat 7. Este satélite contiene las mismas bandas espectrales de los sensores TM, además de una banda pancromática de 15 m de resolución espacial y una banda en el infrarrojo térmico de 60 m de resolución espacial, las características principales de este se enlistan en la tabla 4.5.1 (Sabins, 1999; Crosta y De Souza-Filho, 2009).

Esta misión fue impecable hasta mayo de 2003 cuando falló parte del hardware, dejando espacios en forma de cuña en cada borde de las imágenes adquiridas con Landsat 7. Aun con estos problemas el Landsat 7 sigue funcionando con precisión y exactitud (NASA, 2013).

4.5.4 Landsat OLI-TIRS

El Landsat 8 es la última plataforma que se ha lanzado desde el comienzo del Programa Landsat; fue lanzado el 11 de febrero de 2013.

Tabla 4.2. Características de los satélites Landsat (NASA, 2013).

Satélite (sensor)	Número de bandas	Banda	Resolución espectral	Resolución espacial	Resolución temporal	Resolución radiométrica		
Landsat (MSS)	4	1	0.5-0.6 μm	80m , 185 km	18 días	6 bits		
		2	0.6-0.7 μm					
		3	0.7-0.8 μm					
		4	0.8-1.1 μm					
Landsat TM	7	1	0.45-0.52 μm	30 m, 185 km	16 días	8 bits		
		2	0.52-0.60 μm					
		3	0.63-0.69 μm					
		4	0.76-0.90 μm	80 m, 185 km				
		5	1.55-1.75 μm					
		6	10.4-12.5 μm					
		7	2.08-2.35 μm				30 m, 185 km	
Landsat ETM+	8	1	0.45-0.515 μm	30 m, 185 km	16 días	8 bits		
		2	0.525-0.605 μm					
		3	0.63-0.69 μm	60 m, 185 km				
		4	0.77-0.90 μm					
		5	1.55-1.75 μm					
		6	10.4-12.5 μm					
		Landsat ETM+	8	7			2.09-2.35 μm	30m, 185 km
				8			0.52-0.90 μm	15m, 185 km
Landsat OLI-TIRS	11			1	0.43-0.45 μm	30 m, 185 km	16 días	12 bits
				2	0.45-0.51 μm			
				3	0.53-0.59 μm	15 m, 185 km		
		4	0.64-0.67 μm					
		5	0.85-0.88 μm					
		6	1.56-1.65 μm					
		Landsat OLI-TIRS	11	7	2.11-2.29 μm	30 m, 185 km		
8	0.5-0.67 μm							
9	1.36-1.38 μm							
Landsat OLI-TIRS	11	10	10.6-11.2 μm	100 m, 185 km				
		11	11.5-12.5 μm	100 m, 185 km				

La carga útil de este satélite consta de dos instrumentos el Operational Land Imager (OLI) y el Thermal Infrared Sensor (TIRS). Estos sensores proveen una cobertura global de la superficie terrestre, con una resolución espacial de 30 m en el espectro visible, infrarrojo cercano y medio, y de 100 m en el espectro infrarrojo térmico. Al igual que Landsat ETM, éste contiene una banda pancromática de 15 m de resolución espacial.

Los principales avances de este satélite respecto a sus antecesores son la adición de 3 bandas espectrales: una banda especial para detectar aerosoles y realizar estudios costeros (banda 1), una banda extra en el infrarrojo de onda corta útil en la detección de nubes cirrus y la separación de la banda 6 ETM en dos bandas en el infrarrojo (bandas 10 y 11) (NASA, 2013).

CAPÍTULO 5

Técnicas de procesamiento

Introducción.

Los sistemas de Percepción Remota actuales graban la información como un arreglo regular de filas y columnas llamado *ráster*, en dicho arreglo la posición de cualquier elemento de la imagen (pixel) es determinado en un sistema coordenado X,Y. A su vez, cada pixel tiene asignado un valor numérico denominado número digital (DN), cuyo valor es proporcional a la intensidad de energía electromagnética medida (Sabins, 1997).

Sabins (1997) divide a los métodos de procesamiento de imágenes en tres categorías de acuerdo a la función principal que realizan sobre la imagen; estas categorías se enlistan a continuación.

1. *Restauración de la imagen.* Este proceso realiza una compensación a la imagen por errores de la misma: ruido, distorsión geométrica, defectos de grabación y operaciones de reproducción.

El objetivo de este proceso es lograr que la imagen restaurada se asemeje a la escena en el terreno.

Algunos métodos contenidos en este grupo incluyen:

- Restauración de líneas.
- Filtrado de ruido aleatorio
- Corrección por dispersión atmosférica.
- Corrección por distorsión geométrica.

2. *Mejoramiento de la imagen (Image Enhancement).* Los métodos encargados del mejoramiento de la imagen tienen como objetivo mejorar la visualización del

contenido de la información en la imagen, es decir, aumentar el impacto visual que tiene la imagen sobre el intérprete.

Algunas rutinas típicas de procesamiento incluyen:

- Realce de contrastes.
- Realce de bordes.
- Construcción de mosaicos digitales.
- Transformación a intensidad, tono y saturación.
- Fusión de conjuntos de datos.

3. *Extracción de la información.* Estos métodos utilizan algoritmos computacionales para combinar y hacer interactuar los diferentes aspectos de un conjunto de datos. El objetivo de este proceso es mostrar las características espectrales que no son evidentes en las imágenes espectrales restauradas y mejoradas. Algunos métodos comunes de esta clase son:

- Análisis de Componentes Principales.
- Cocientes de bandas.
- Clasificación multiespectral.
- Imágenes de detección de cambios.

Por su parte, Khorram y colaboradores (2012) proponen una secuencia de procesamiento similar aplicada a imágenes multiespectrales, en la que todo el proceso se desarrolla en tres etapas: pre-procesamiento, procesamiento y post procesamiento. Cada una de estas etapas tiene sus propias herramientas y técnicas, sin embargo todas son igualmente importantes para obtener una buena interpretación.

5.1 Pre procesamiento

Según los métodos de procesamiento descritos por Sabins (1997), el primer paso del procesamiento consiste en restaurar la imagen, es decir, aplicar las compensaciones y correcciones necesarias para atenuar los errores de la misma. Esta etapa también es conocida como pre-procesamiento, ya que incluye operaciones que se aplican inmediatamente después de la adquisición; esta etapa tiene la finalidad de preparar la imagen para el procesamiento que permita extraer a información.

Las operaciones aplicadas durante el pre procesamiento se emplean para preparar de la mejor manera posible los datos de entrada para la etapa de procesamiento. Básicamente estas operaciones tienen dos propósitos: minimizar la distorsión y atenuar o eliminar los errores de la imagen. Estas operaciones incluyen la corrección radiométrica, corrección por dispersión atmosférica y la corrección por distorsión geométrica (Campbell, 2002; Khorram et al, 2012).

5.1.1 Corrección radiométrica

Las distorsiones radiométricas varían dependiendo del sensor. Comúnmente, se aplican correcciones por elevación solar y por la distancia Tierra-Sol a los datos para eliminar los efectos de la posición estacional del Sol respecto a la Tierra y para normalizar las variaciones estacionales de la distancia Tierra-Sol.

5.1.2 Corrección geométrica

Las imágenes adquiridas mediante sensores remotos pueden contener dos tipos de distorsión: sistemática y no sistemática. La distorsión sistemática es causada por el movimiento de la imagen debido al avance de la plataforma, ya sea espacial o aérea, también puede ser causada por variaciones en la velocidad de barrido del espejo, distorsiones panorámicas, variaciones en la velocidad de la plataforma o debido a la curvatura de la Tierra. Por su parte, las distorsiones no sistemáticas son aquellas que ocurren debido a un mal funcionamiento del sensor o a variaciones en la altitud de los satélites.

La mayoría de los errores sistemáticos se encuentran corregidos o eliminados en las imágenes disponibles en el mercado. Sin embargo, cuando se requiere realizar esta operación, la técnica más común consiste en realizar una rectificación de la imagen utilizando un mapa, de modo que la información geográfica coincida con la información en la imagen. Este proceso involucra la selección de un gran número de puntos de control sobre el terreno bien definidos y compartidos en la imagen a restaurar y el mapa o imagen de referencia (Khorram et al., 2012).

5.1.3 Corrección por dispersión atmosférica

Las partículas y algunas moléculas en la atmósfera provocan la dispersión de la radiación electromagnética modificando la información que es grabada por los sensores remotos.

En la mayoría de las aplicaciones terrestres de la Percepción Remota se utilizan imágenes libres de nubes. Sin embargo, en zonas costeras los efectos atmosféricos son más intensos. En el caso de las imágenes Landsat, la banda azul (1 en ETM y 2 en OLI/TIRS) contiene la mayor componente de dispersión, mientras que las bandas en el infrarrojo son las menos afectadas (Sabins, 1997).

Debido al gran impacto de los efectos atmosféricos sobre la información espectral se han desarrollado varios métodos para remover o minimizar estos efectos, estos se pueden dividir en dos categorías:

- Corrección atmosférica relativa.

Esta corrección atenúa los efectos atmosféricos mediante la normalización de las intensidades entre las diferentes bandas de una misma escena para remover los problemas asociados al detector y después corrige las intensidades a partir de la comparación con una superficie de referencia de la misma fecha y misma escena.

- Corrección atmosférica absoluta.

Esta corrección toma en cuenta el ángulo cenital solar al momento del paso del satélite, la transmitancia atmosférica para un ángulo de incidencia dado, la irradiancia espectral en la atmósfera superior y las leyes de dispersión de Rayleigh y Mie (Khorram et al, 2012).

5.1.3.1 *Sustracción del pixel más oscuro*

El método denominado *sustracción del pixel más oscuro*, es un proceso de corrección atmosférica relativa, ampliamente utilizado cuando no se cuenta con la información necesaria para realizar una corrección atmosférica absoluta.

El método se basa en el hecho de que los datos de la región infrarroja están prácticamente libres de los efectos de la dispersión atmosférica en comparación con el espectro visible, por lo que se pueden utilizar la información de los histogramas y realizar un ajuste a los mismos para atenuar los efectos atmosféricos.

Para aplicar este método se debe examinar la imagen con la finalidad de ubicar cuerpos de mayor absorbancia como cuerpos de agua; el método asume que el valor mínimo del pixel para estos cuerpos debe ser igual a cero al eliminar el efecto de la dispersión atmosférica, de modo que al analizar el histograma de cada banda se sustrae el valor más bajo del pixel, el cual se considera enteramente como efecto de la atmósfera. Este método es uno de los más sencillos e implica sustraer el sesgo del histograma en cada banda, cotidianamente se le conoce como "corrimiento del histograma" a esta operación.

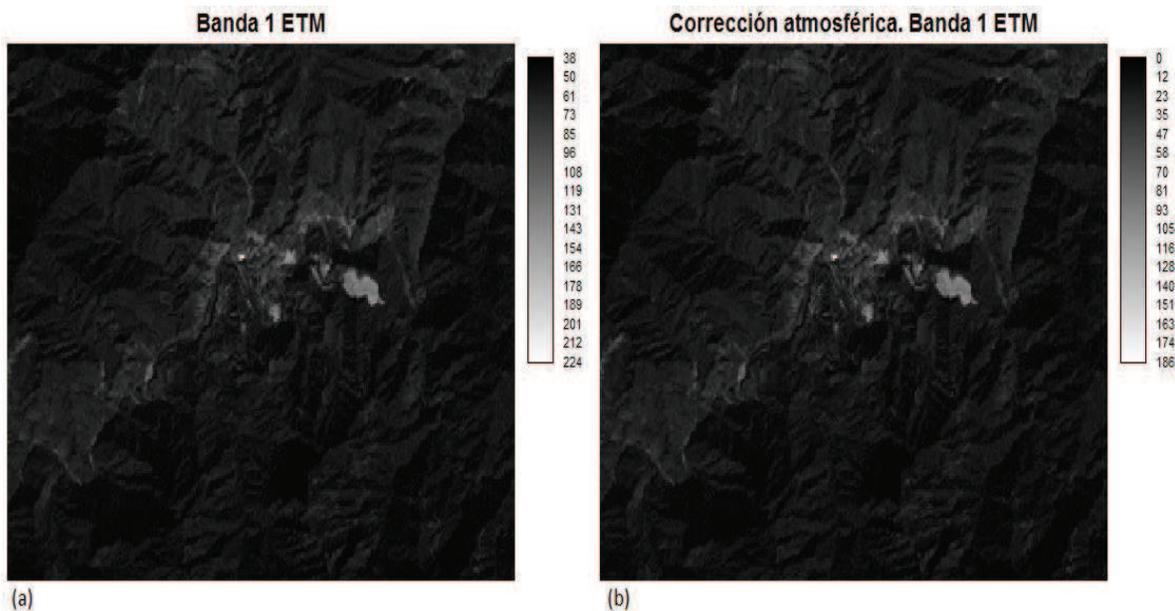


Figura 5.1 (a) Banda 1 de ETM original. (b) Banda con sustracción del pixel más oscuro. Se observa la disminución de los valores en la escala de grises (a la derecha de cada imagen). Imagen procesada de Tayoltita, Dgo.

5.2 Mejoramiento de la imagen

Se le llama mejoramiento de la imagen a todos los procesos que permiten facilitar la visualización de la información en la imagen. Dentro de estos procesos se encuentran los realces digitales, tanto espaciales como espectrales (Ruiz-Armenta y Prol-Ledesma, 1995). Las técnicas empleadas dentro de esta categoría sólo son aplicables a la visualización de la información, por lo que los valores de DN que adquieren los pixeles durante la misma no representan la realidad y no pueden ser utilizados en procesos de extracción de la información.

5.2.1 Realce de contraste

El realce de contraste o mejoramiento de contraste modifica la escala de grises para producir una imagen "más interpretable"; es una técnica utilizada para incrementar la diferencia entre el valor de un pixel y sus vecinos.

Todas las imágenes de datos crudos necesitan este proceso, ya que por lo general son muy oscuras y carentes de contraste. La causa principal de este defecto es el rango de sensibilidad de los detectores del sensor, diseñados para grabar una amplia gama de valores de brillantez (Sabins, 1997).

Debido a que es un proceso que altera los valores digitales representativos de la reflectancia de los materiales sólo se utiliza para mejorar la visualización de la información, y los productos de los procesos de realce no pueden ser utilizados para análisis cuantitativos posteriores.

Para aplicar esta técnica es necesario analizar el histograma de cada imagen, los métodos más comunes para obtener un realce de contraste son el *stretch* lineal, el *stretch* lineal con saturación y el *stretch* con ecualización.

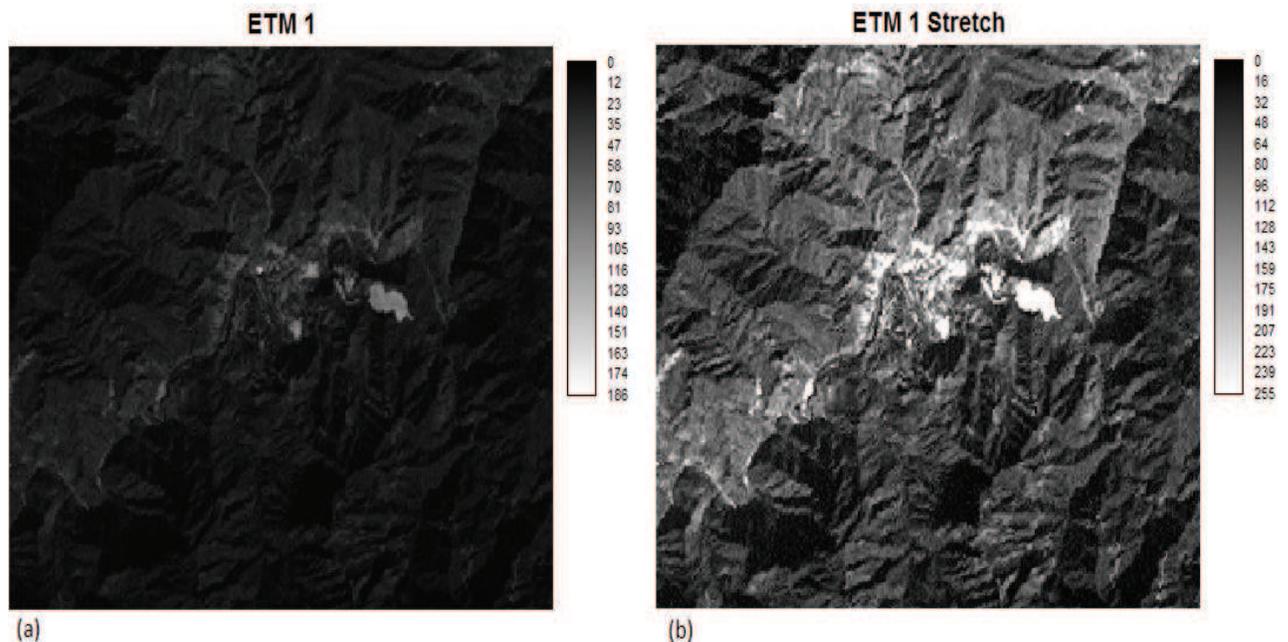


Figura 5.2. Banda 1 ETM corregida por dispersión atmosférica (a), banda 1 ETM con stretch lineal con saturación del 1%. Imagen procesada de Tayoltita, Dgo.

5.2.1.1 Stretch lineal

Todos los ajustes que se realizan para obtener un contraste se hacen mediante tablas de comparación o búsqueda, que consisten de un arreglo de los valores originales de los pixeles (entrada) y su correspondiente arreglo de valores mejorados (salida), ambos son necesarios para producir la imagen expandida (*stretched*).

En el stretch lineal simple o no saturado, al valor de DN más bajo es asignado un nuevo valor que corresponde a cero, mientras que al valor máximo original se le asigna el valor de 255 (el valor máximo en la escala de grises para sistemas de 8 bits). El resto de los valores originales de DN son linealmente reasignados a valores entre 1 y 254. La principal desventaja de utilizar el método de *stretch* lineal es que un porcentaje de los pixeles al inicio y al final del histograma ocupan una proporción excesiva del nuevo rango.

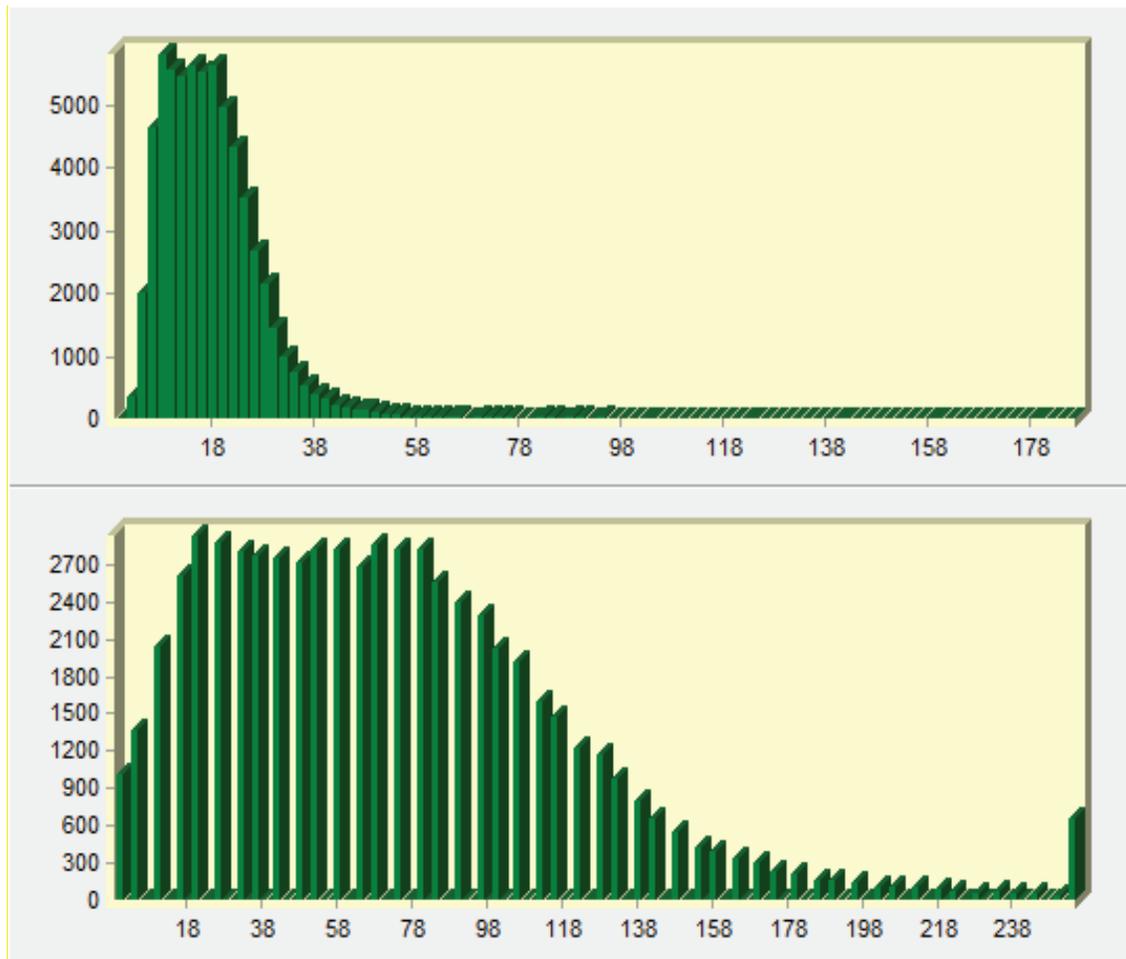


Figura 5.3 Histograma de banda ETM1 original (arriba). Histograma de banda 1 ETM después del stretch lineal con saturación de la figura 5.2 (abajo). Imagen procesada de Tayoltita, Dgo.

Esta desventaja es eliminada utilizando una variante del método, denominada *stretch lineal con saturación*. Éste consiste en saturar un porcentaje (generalmente el 2%) de los píxeles más oscuros y los más claros, reasignándoles los valores de 255 y 0, respectivamente, a los píxeles cuyos valores de número digital se encuentren incluidos en el rango de valores establecido según el porcentaje de saturación elegido. El porcentaje restante es reasignado linealmente en el rango normal de 1 a 254.

Por ejemplo, para un stretch lineal con saturación del 2%, se satura el 2% de los píxeles más oscuros y el 2% de los píxeles más claros, esto significa que se les asigna el valor de 255 a los píxeles cuyo número digital (DN) se encuentre entre 0 y 15, y se asigna el valor de 0 a aquellos que se encuentren entre 50 y 65 de valores de DN. El 96% de los píxeles restantes se reasignan linealmente en el rango de 1 a 254 (Sabins, 1997).

5.2.2 Realce de bordes

Una de las principales aplicaciones de la Percepción Remota es el mapeo de fallas, juntas y lineamientos. Sea cual sea el origen de éstos, todos se presentan como bordes, que en las imágenes satelitales se expresan como variaciones abruptas de la brillantez. Estas variaciones no siempre son evidentes en las imágenes, por lo que se vuelve necesario aplicar algún método de realce de bordes. Esto se puede realizar de dos maneras:

- a) Expandir el ancho del lineamiento.
- b) Incrementar la diferencia en los valores de DN a través del lineamiento.

Para lograr esto se utilizan filtros digitales espaciales. Este tipo de filtros se definen como operadores locales, en los que los valores de los píxeles de una imagen son modificados con base en los valores de sus píxeles vecinos. Los filtros digitales espaciales se clasifican según la dirección en la que actúan en direccionales y no direccionales.

El filtrado espacial de una imagen comúnmente involucra una operación denominada convolución. El convolucionar una imagen implica dos procesos: crear una ventana móvil que contiene un arreglo de los coeficientes de ponderación (kernel u operador) y el desplazamiento del kernel en la imagen original y su interacción con la misma para producir una imagen resultante filtrada (Sabins, 1997; Knepper, 1989).

5.2.2.1 Filtros direccionales

Los 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 se componen de un kernel de nueve pixeles, en un arreglo de 3 filas y 3 columnas (3x3).

Para aplicar el filtro se coloca el kernel sobre un arreglo 3x3 de la imagen original, comúnmente se comienza en el borde superior izquierdo de la imagen, de modo que cada valor de DN del pixel original es multiplicado por el correspondiente valor del kernel, y el resultado de las 9 multiplicaciones es sumado. Este valor se combina con el valor de DN del pixel central del arreglo en la imagen original (Sabins, 1997; Knepper, 1989).

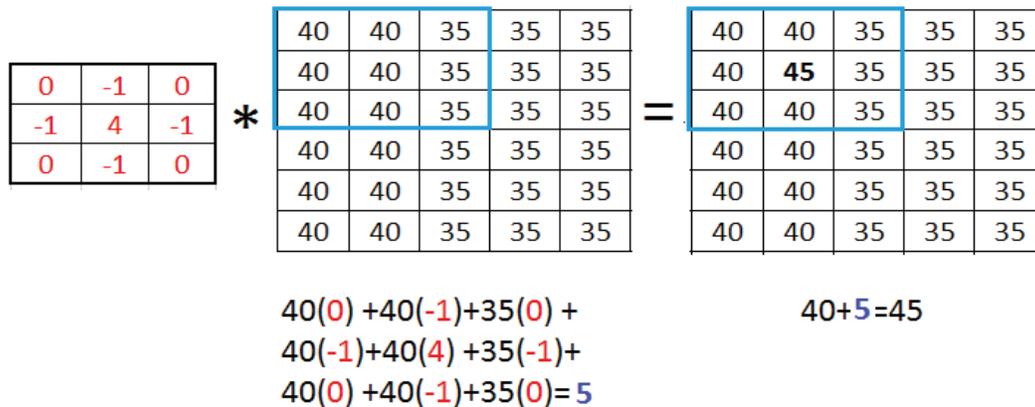


Figura 5.4 Esquema del proceso de filtrado, aplicando filtro Laplaciano. Se observa cómo cambia el valor de DN para el pixel central.

NORTE		
1	1	1
1	-2	1
-1	-1	-1

SUR		
-1	-1	-1
1	-2	1
1	1	1

ESTE		
-1	1	1
-1	-2	1
-1	1	1

OESTE		
1	1	-1
1	-2	-1
1	1	-1

Figura 5.5 Kernel 3x3 en dirección norte, sur, este y oeste.

El proceso descrito se repite para cada pixel 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.

El proceso de filtrado direccional realza los lineamientos en la dirección para la que fue diseñado el filtro, se generan dos bandas de pixeles más oscuros, del ancho de un pixel y

paralelos al lineamiento principal promoviendo aún más el realce del lineamiento. Los filtros direccionales también realzan la expresión geométrica de los lineamientos, de manera que hacen más evidente su presencia (Sabins, 1997).

5.2.2.2 Filtros no direccionales

También conocidos como filtros Laplacianos, deben su nombre a que no siguen una tendencia particular al enfatizar los lineamientos, éstos son igualmente enfatizados en todas las direcciones. La única excepción ocurre cuando los lineamientos se encuentran orientados paralelamente a la dirección de desplazamiento del filtro.

Este tipo de filtros consisten de un kernel de 3x3, conformado por un arreglo de 3 filas y 3 columnas de pixeles; como se observa en la figura 5.6, éstos adquieren los valores 0 en las esquinas, -1 en los pixeles entre esquinas y 4 el pixel central.

Laplaciano		
0	-1	0
-1	4	-1
0	-1	0

Figura 5.6 Kernel para el filtro Laplaciano.

El kernel Laplaciano se aplica sobre arreglos de 3x3 de la imagen original, comenzando por la esquina superior izquierda, de modo que cada pixel es multiplicado por el valor correspondiente del kernel sobrepuesto, los nueve valores resultantes son sumados obteniéndose un nuevo valor de DN, éste se combinará con el valor original del pixel central del arreglo generando el valor de DN que tendrá el pixel central en la imagen resultante (figura 5.5).

El kernel se mueve una columna hacia la derecha y se repite el proceso para el nuevo pixel central, esto se repite hasta que se llega al borde de la imagen. En este punto el kernel vuelve al extremo izquierdo en donde comenzó y avanza una fila hacia abajo, repitiéndose hasta llegar al final de la imagen (Sabins, 1997; Lillesand y Kiefer, 1994).

5.3 Extracción de la información

Esta es la última etapa del procesamiento. Consiste en aplicar una serie de rutinas con el objetivo de mostrar y resaltar la información espectral contenida en la imagen que no es perceptible a simple vista.

5.3.1 Cocientes de bandas

Las principales operaciones algebraicas utilizadas para mejorar la información espectral son los cocientes entre diferentes bandas de una imagen y se utilizan principalmente para detectar y mejorar la visualización de los cambios y contrastes espectrales. Las imágenes que se obtienen de los cocientes de bandas son el resultado de dividir el valor del DN de una banda entre el valor de DN de otra, para cada pixel de la imagen.

En una imagen de cocientes de bandas, los extremos blanco y negro de la escala de grises representan pixeles que tienen la mayor diferencia en reflectancia entre las dos bandas espectrales utilizadas, de modo que las áreas más oscuras son aquellas en las que el denominador es mayor que el numerador.

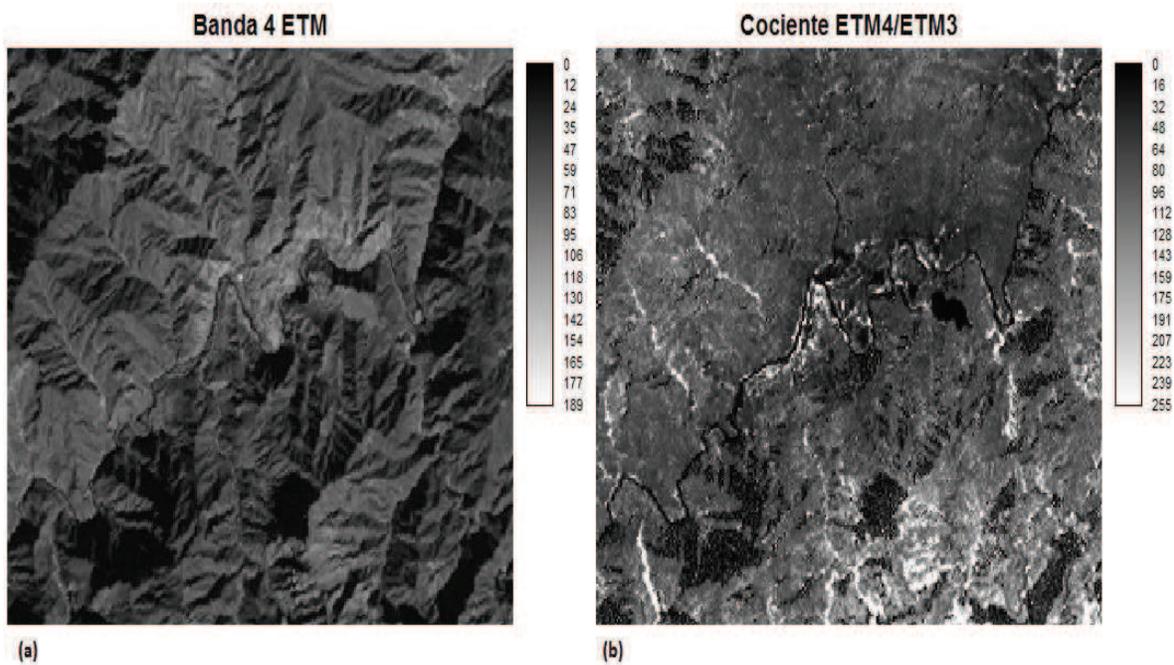


Figura 5.7 (a) Banda 4 ETM en la que se registra la mayor reflectancia de la vegetación, (b) Cociente ETM4/ETM3 útil para resaltar las zonas cubiertas por vegetación. La vegetación se observa en tonos más claros. Imagen procesada de Tayoltita, Dgo.

Para elegir las bandas espectrales que se deben utilizar en un cociente es necesario conocer la firma espectral de los materiales que se desean resaltar. De este modo se seleccionan la banda que contenga el máximo valor de reflectancia y la de mayor absorbancia para el cociente.

Una ventaja de esta técnica es que permite extraer o enfatizar las diferencias de la reflectancia espectral de los materiales, sin embargo su principal desventaja es que también enfatiza el ruido contenido en las bandas, y suprime la expresión de la topografía dificultando la interpretación estructural.

Además de los cocientes entre dos bandas, es común realizar el cociente entre la resta de dos bandas sobre la suma de las mismas (Khorram, *et al.*, 2012; Sabins, 1999).

5.3.2 Composiciones a color

Las composiciones en color son el resultado del método básico del procesamiento de imágenes espectrales. Consisten de una imagen compuesta, en las que se despliegue la información de 3 bandas espectrales simultáneamente. Existen dos modos de hacer composiciones a color: composiciones en color real y composiciones en falso color.

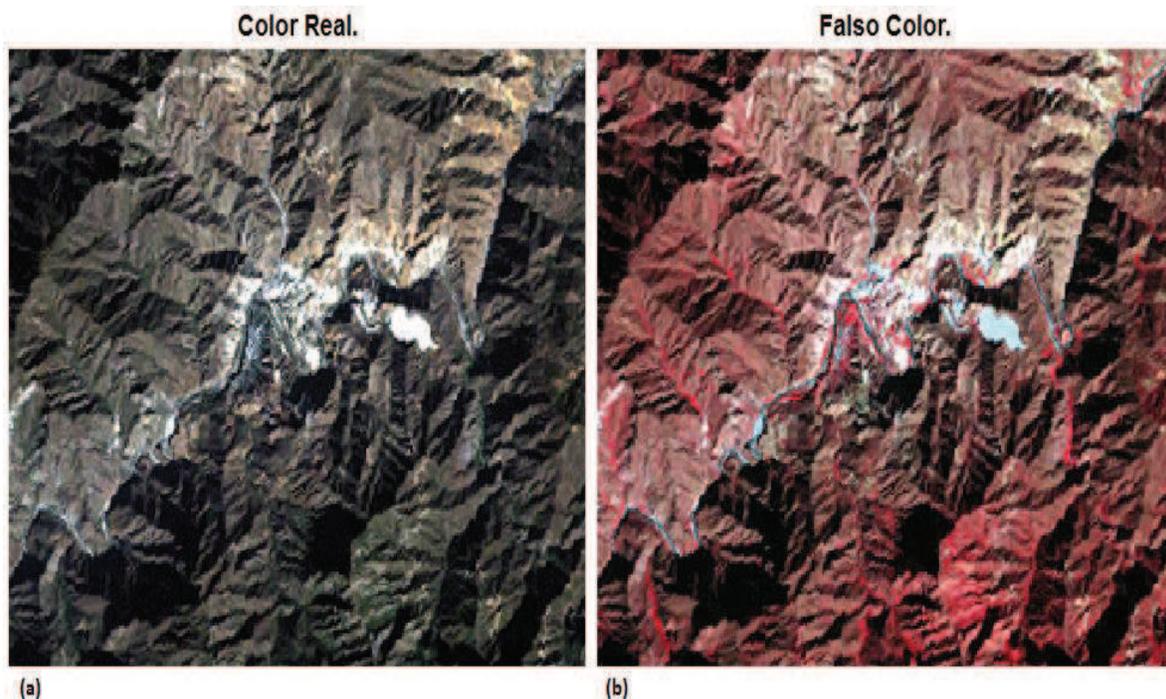


Figura 5.8 (a) Composición ETM 321 en la que se observa el terreno tal como lo percibe el ojo humano, (b) composición en falso color ETM 432 en la que la vegetación se ve en tonos rojos y jales mineros en cian. Imagen procesada de Tayoltita, Dgo.

Una composición en color real muestra la información de tres bandas espectrales desplegadas en su color natural, es decir, la banda que abarca el espectro del color azul se despliega en color azul, la correspondiente a la región del verde se despliega en verde y la de la región del color rojo se despliega en color rojo. Este tipo de composiciones despliegan la información espectral tal como las vería el ojo humano (Khorram, *et al.*, 2012).

En contraste, las composiciones en falso color son aquellas imágenes compuestas que despliegan la información de tres bandas de una imagen multispectral en cualquier combinación diferente a la de su color natural.

Por ejemplo, la información espectral de la región del verde se despliega en color azul, la banda de la región del rojo en verde y la primera banda del infrarrojo cercano en color rojo (en Landsat ETM Y TM corresponde a una composición 432 en rojo, verde y azul, respectivamente). Esta combinación es muy utilizada debido a su gran utilidad para resaltar la vegetación sana y verde, la cual se observará en la imagen resultante de un color rojo intenso que variará de tono hacia el marrón con el aumento del estrés de la vegetación (Rencz, 1999; Khorram, *et al.*, 2012).

5.3.4 *Análisis de Componentes Principales (PCA)*

El análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés) consiste en procesar las bandas mediante estadística multivariante y realizar un cambio de sistema coordinado para obtener matrices que relacionan las bandas con las componentes obtenidas del cambio de sistema, las cuales contienen información que de otro modo no es visible.

La transformación a componentes principales, originalmente nombrada Transformación de Karhunen-Loève, es utilizada para sintetizar la información contenida en las imágenes multispectrales, permitiendo reducir la redundancia de la información repetida en las distintas bandas que conforman una imagen multispectral, maximizando la varianza de la información contenida en las distintas bandas espectrales (Sabins, 1997).

La operación matemática de esta transformación consiste en crear una combinación lineal de valores de píxeles en el sistema coordinado original cuyo resultado en el nuevo sistema coordinado sea tal que:

$$y_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 \quad (7)$$

$$y_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2$$

donde x_1, x_2 son las coordenadas de pixel en el sistema original, y_1, y_2 son las coordenadas de pixel en el nuevo sistema coordenado y $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ son constantes.

En el nuevo sistema coordenado el primer eje nuevo se orienta en la dirección de la distribución de los pixeles, y cada nuevo eje coordenado se orienta perpendicular a la dirección definida del eje previo y en dirección de la máxima densidad de pixeles remanente.

Para cada pixel, la transformación produce que se originen nuevos valores de DN, relativos a los nuevos ejes coordenados. Un nuevo paquete de valores de DN es creado respecto al primer nuevo eje, conformando la primera componente principal. Estos valores se utilizan para crear una imagen de la primera componente principal. Del mismo modo ocurre para cada nuevo eje creado, creándose tantas componentes principales como ejes se tengan (Sabins, 1997; Khorram, *et al.*, 2012).

Las principales ventajas de trabajar con las componentes principales para una imagen son:

- a) La mayor parte de la varianza en un paquete multiespectral se comprime en las primeras dos imágenes componentes principales.
- b) El ruido es relegado a la componente menos correlacionada.
- c) Las diferencias espectrales entre los materiales se hacen más evidentes en las imágenes de las componentes principales que en las bandas individuales.

El análisis de componentes principales se basa en la matriz de correlación entre las bandas espectrales, esta es el resultado de la transformación. La matriz de correlación se descompone en *eigen*-valores y *eigen*-vectores, que conceptualmente son los que definen la magnitud y dirección del nuevo sistema coordenado.

En el nuevo sistema, la primera componente contiene la mayor cantidad de varianza y la ultima la menor. La proporción de variabilidad espectral contenida en cada componente

está dada por el *eigen*-valor, y la contribución de cada banda a la componente es definida por el eigen vector (Sabins, 1997; Rencz, 1999).

5.4 Metodología

En este apartado se describirá la secuencia de procesamiento empleada a la imagen utilizada, los materiales utilizados y las consideraciones tomadas en cuenta en la aplicación de cada técnica.

5.4.1 Materiales

El uso de imágenes satelitales en las primeras etapas de la exploración de se ha convertido en un procedimiento fundamental y cotidiano en la detección de zonas que presentan minerales de alteración hidrotermal y rasgos estructurales que se pueden asociar a la circulación de fluidos hidrotermales (Ruíz-Armenta y Prol-Ledesma, 1995).

5.4.1.1 Imagen multiespectral

Las imágenes multiespectrales, como las que se obtienen con las plataformas Landsat, permiten discriminar entre las diferentes litologías que afloran en una región, además de mapear la distribución superficial de las paragénesis de minerales característicos de alteración hidrotermal con base en las características espectrales de los mismos en las regiones visible e infrarroja del espectro electromagnético. Así mismo, facilitan el reconocimiento e identificación de estructuras y lineamientos geológicos a escala regional.

Una de las grandes ventajas de las imágenes de Landsat es el costo de las mismas, ya que muchas de estas imágenes se encuentran disponibles gratuitamente y abarcan grandes extensiones de la superficie terrestre (185x185 km por imagen).

Para el presente estudio se utilizó una imagen adquirida por el Landsat 7 (ETM) en formato GeoTIFF, cuya resolución espacial es de 30x30 m por pixel y 185 km por lado. Esta imagen cubre toda la porción centro y sur del estado de Baja California, y corresponde al path 37 y row 40 de la trayectoria de Landsat 7. Sólo se trabajó con las bandas ETM 1, 2, 3, 4, 5 y 7 cuyas características se describieron previamente en el capítulo 4.

La imagen fue tomada el día 9 de abril de 2002; esta imagen se eligió porque tiene una cobertura de nubes del 0% sobre el área de estudio y fue obtenida en temporada de sequía, lo que permite reducir el efecto espectral de la vegetación en el procesamiento de la imagen.

5.4.1.2 Software y hardware

El software utilizado para procesar la imagen fue IDRISI Andes, desarrollado por la Universidad de Clark. IDRISI es un software especializado en la funcionalidad analítica, abarcando todo el espectro de los SIG y el análisis de Percepción Remota a partir del uso de bases de datos, el modelado espacial, el mejoramiento de imágenes y la clasificación. Está orientado principalmente hacia el uso de datos ráster y datos vectoriales. IDRISI, en cualquiera de sus versiones, cuenta una gran variedad de herramientas para la restauración, mejoramiento y transformación de la información espectral (Warner y Campagna, 2009).

La imagen fue procesada en una computadora personal con procesador Intel Core de 5 núcleos de 2.5 GHz, 6.0 Gb de memoria RAM, sistema operativo Windows 8 de 64 bits y con 665 Gb de memoria en disco duro utilizable.

5.4.2 Pre procesamiento

El primer proceso aplicado a la imagen consistió en recortar la imagen con el fin de procesar sólo la zona a estudiar. Este proceso permite reducir tiempo de procesamiento computacional, las coordenadas extremas de la sub imagen a procesar se describen en la tabla 5.1 y se observa en figura 5.9

Recorte	
Coordenada mínima X:	181430
Coordenada máxima X:	297910
Coordenada mínima Y:	3165900
Coordenada máxima Y:	3277590

Tabla 5.1 Coordenadas extremas para el recorte de imagen.

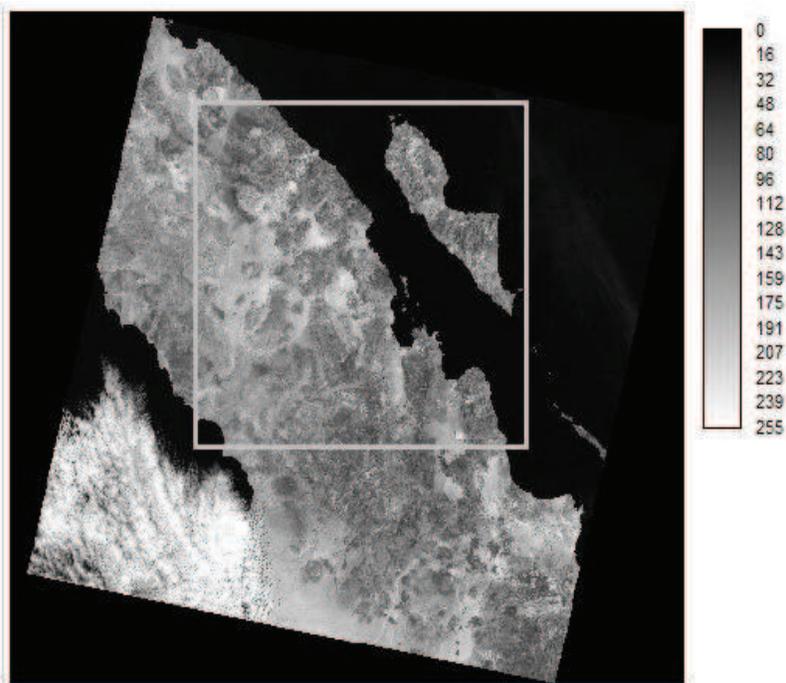


Figura 5.9 Imagen multiespectral original con ventana de recorte en contorno blanco.

Sobre la sub-imagen o recorte, se aplicó la corrección atmosférica relativa, utilizando el método de sustracción del pixel más oscuro. Para aplicar esta corrección se analizaron los histogramas de las bandas ETM 1, 2, 3, 4, 5 y 7, con la finalidad de determinar los valores mínimos (más oscuros) de pixel en cada una, éstos se enlistan en la tabla 5.2

Banda	Valor de DN mínimo
ETM 1	58
ETM 2	32
ETM 3	19
ETM 4	7
ETM 5	2
ETM 7	2

Tabla 5.2 Valores de pixel más oscuro por banda espectral.

5.4.3 Procesamiento

Una vez corregida la imagen por dispersión atmosférica se analizaron las firmas espectrales de los minerales típicos de alteración hidrotermal, así como de materiales abundantes en el terreno, tales como la vegetación y el agua. Para ello se elaboraron las gráficas de las firmas espectrales a partir los datos publicados por el Spectral Library del USGS.

De acuerdo con la figura 5.10 a), los óxidos tienen la máxima absorbancia en la banda ETM 1, y un segundo pico de absorbancia en la banda ETM 4, pero su mayor reflectancia se encuentra en la banda ETM 5 y el segundo mayor pico se encuentra en la región cubierta por la banda ETM 3.

Para el caso de los minerales arcillosos (hidroxilos), se observa claramente un pico de máxima absorbancia en la banda ETM 7, y la máxima reflectancia en la banda ETM 4, como se observa en la figura 5.10 b). Sin embargo, se puede ver en la figura 5.10 c) que la vegetación tiene la máxima reflectancia en la banda ETM 4, por encima de los hidroxilos, esto provoca que se tenga que utilizar otra banda para los procesos de realce de hidroxilos. La banda espectral que permitirá lograr este objetivo es la banda ETM 5 en la que los hidroxilos tienen máxima reflectancia, mientras que la vegetación tiene reflectancia mínima.

En el gráfico (d) de la misma figura se observa que el agua tiene una gran absorbancia a lo largo de todo el rango visible e infrarrojo, pudiendo afirmarse que se comporta como un cuerpo negro. Inversamente, mientras que el cuarzo mantiene una alta reflectancia a lo largo de todo el rango analizado.

El análisis de las firmas espectrales permitió seleccionar las bandas espectrales a utilizar para resaltar cada grupo de minerales evitando, en la medida de lo posible, los efectos de la cubierta vegetal del terreno.

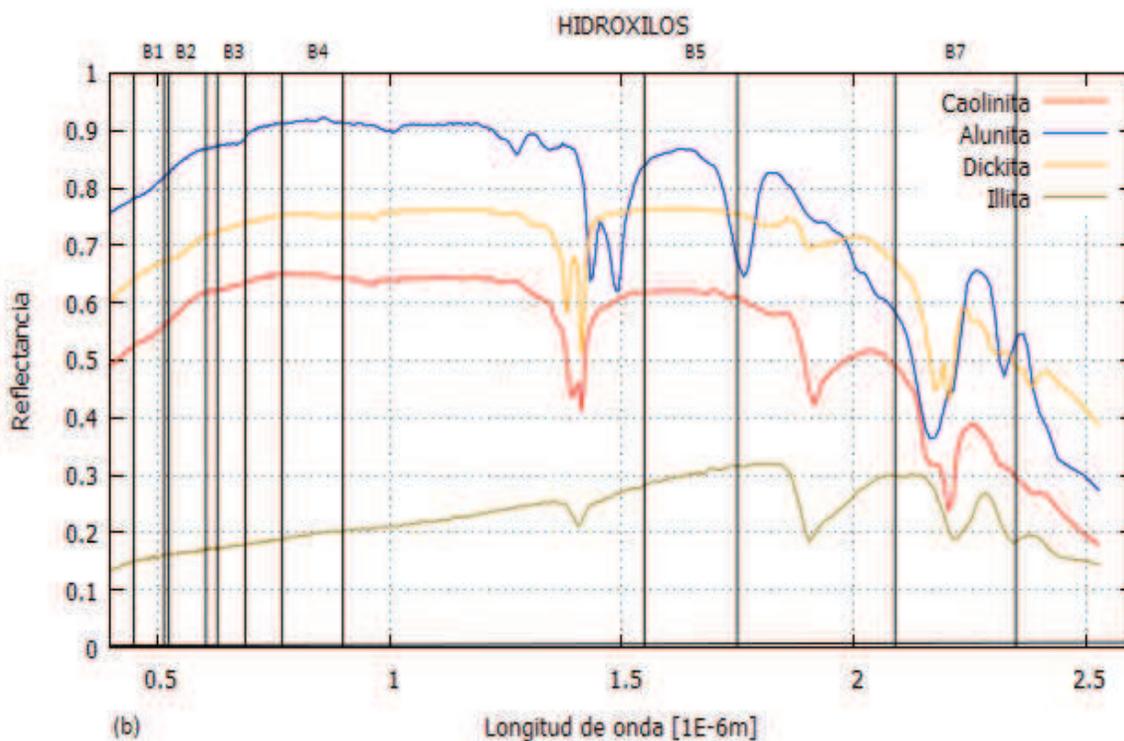
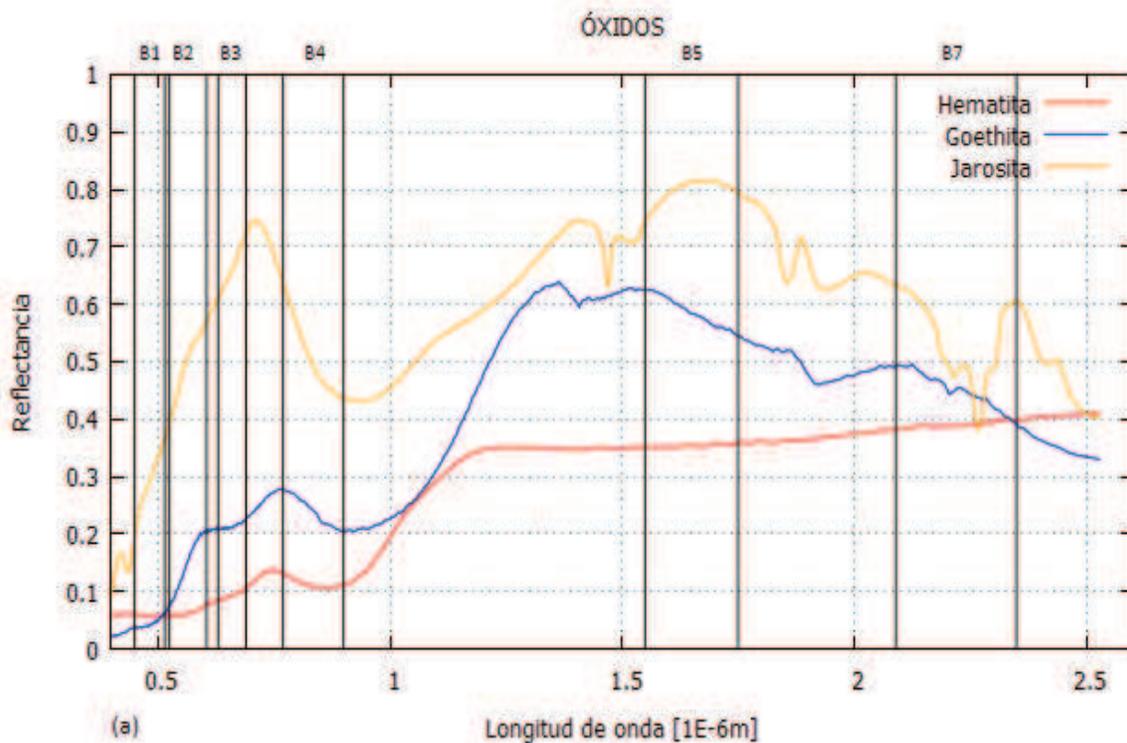


Figura 5.10 a) Firmas espectrais de minerais del grupo de los óxidos asociados a alteración, b) firmas espectrais de minerais del grupo de los hidroxilos asociados a alteración hidrotermal. En líneas negras las bandas de Landsat 7 ETM. Datos tomados de Digital Spectral Library 06, USGS (2007).

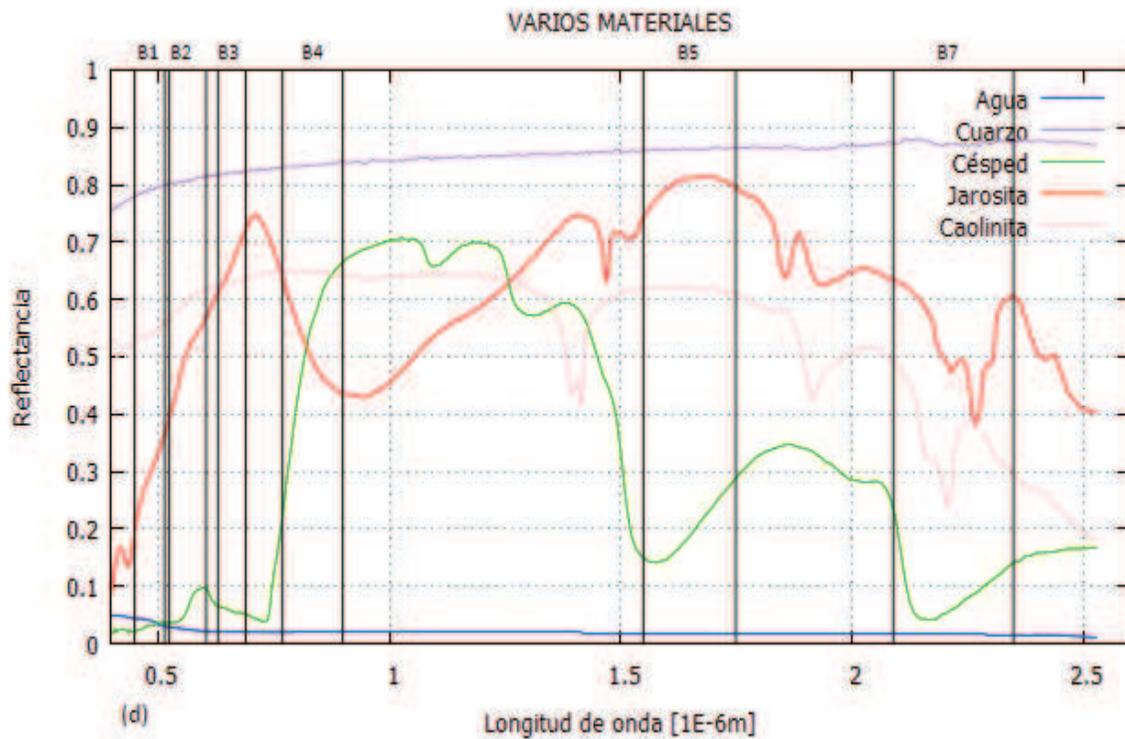
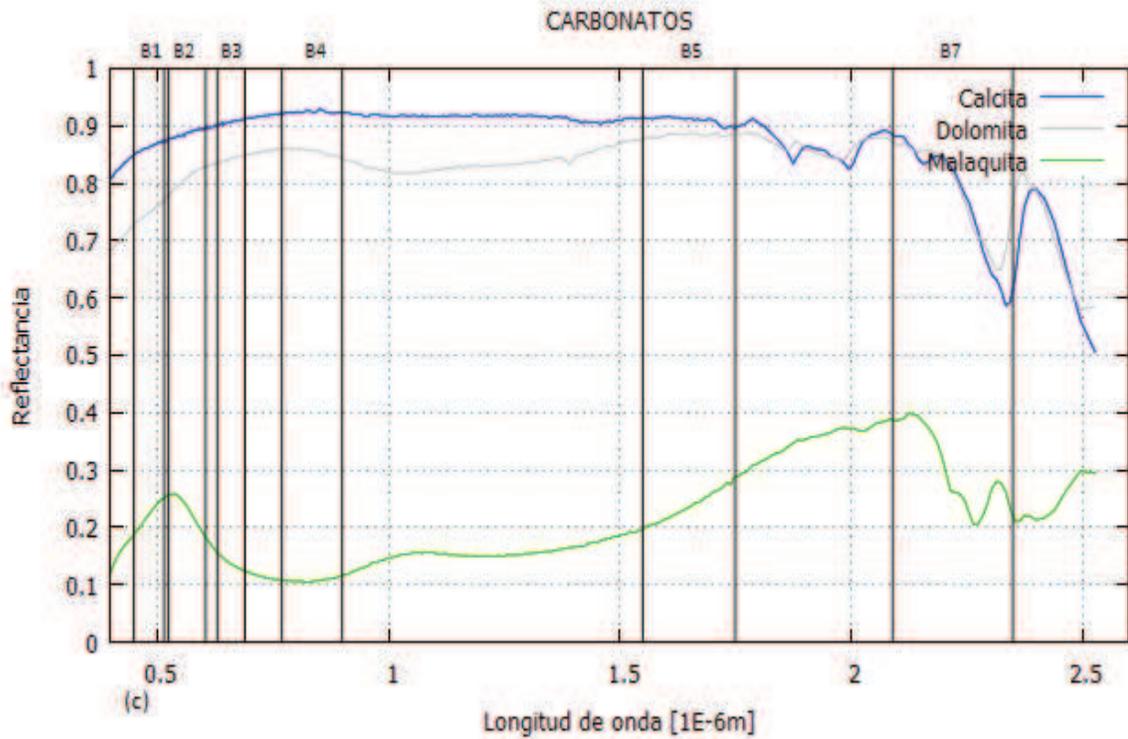


Figura 5.10 c) Firmas espectrales de minerales del grupo de los carbonatos, d) firmas espectrales de cuarzo, coníferas césped, caolinita (hidroxilo), hematita (óxido) y agua de mar abierto. En líneas negras las bandas de Landsat 7 ETM. Datos tomados de Digital Spectral Library 06, USGS (2007).

5.4.3.1 Cocientes de bandas

Se elaboraron tres imágenes de cocientes de bandas, cada una resaltando un material o grupo de materiales predominantes en algunas zonas del terreno, indicadores de alteración hidrotermal. Todas las imágenes resultantes de este proceso fueron mejoradas utilizando un *stretch* lineal con saturación del 1% para facilitar su visualización e interpretación.

5.4.3.1.1 Cociente ETM 5/7

La figura 5.10 (b) muestra el espectro de reflectancia de algunos minerales arcillosos indicadores de alteración hidrotermal. Como se puede observar, estos minerales tienen una reflectancia mínima para las longitudes de onda dentro del intervalo que abarca la banda ETM 7, mientras que mantienen valores altos de reflectancia en el intervalo que abarca la banda ETM 5. Este cociente permite separar los minerales arcillosos (hidroxilos), los sulfatos hidratados, los carbonatos y la vegetación de otros materiales.

5.4.3.1.2 Cociente ETM 3/1

El cociente ETM3/1 es ampliamente utilizado para resaltar la presencia de los óxidos de hierro sobre la superficie. Los óxidos y sulfatos constituyen el segundo grupo de minerales indicadores de alteración hidrotermal (Sabins, 1999).

La figura 5.10 a) muestra la firma espectral de algunos minerales de este grupo como son la jarosita, la hematita y la goethita. En la misma se puede distinguir que estos minerales tienen baja reflectancia en la región del azul (banda 1 ETM) y alta reflectancia en la región del color rojo (banda 3 ETM). De acuerdo con este comportamiento espectral, las rocas que presentaran alteración hidrotermal tendrían valores altos en una imagen resultante del cociente de bandas ETM3/1.

5.4.3.1.2 Cociente ETM 4/3

Generalmente, la vegetación sana tiene máxima reflectancia para el visible en la región del verde, su mayor absorbancia en el rojo (banda 4 OLI y banda 3 ETM) y presenta su máxima reflectancia en la región del infrarrojo cercano (banda 4 ETM), en longitudes de onda mayores la reflectancia decrece debido al contenido de agua (figura 5.10 (d)).

Para aislar la respuesta espectral de la vegetación se utiliza comúnmente el cociente de bandas ETM 3/4 para minimizar sus valores de reflectancia o el cociente inverso si se desea resaltar la presencia de la misma.

5.4.3.2 Composiciones a color

Se crearon composiciones a color de acuerdo con la firma espectral de la vegetación, la de los óxidos y la de los hidroxilos, analizada previamente en este capítulo.

Aunque no existen reglas para asignar un color a cada banda espectral, por lo general se le asigna el rojo a la información que se desea resaltar y el azul a la que contiene la información menos importante (Knepper, 1989).

5.4.3.2.1 Imagen en color real

La primera composición a color que se creó fue la de la imagen en color real, la cual se construyó con la finalidad de observar la distribución de los materiales en la región de estudio y analizar los colores que presentan en el rango visible, para esta composición se utilizaron las bandas ETM 3,2 y 1 a las que se les asignaron los colores rojo (R), verde (G) y azul (B), respectivamente.

5.4.3.2.2 Composición ETM 432

Para resaltar la vegetación en color rojo y los óxidos en verde se obtuvo la composición ETM 432, que corresponde al despliegue de la información de la banda espectral en el rango del infrarrojo cercano en tonos rojos, la de la región del color rojo desplegada en color verde y la del verde en azul. Esta composición se realizó para determinar la distribución y estrés de la vegetación en la región y diferenciarla de las zonas de alteración hidrotermal.

5.4.3.2.3 Composición ETM 742

Debido a que el objetivo de este trabajo es determinar regiones con alteración hidrotermal se elaboró una composición en la que se resaltaron los grupos minerales representativos de este tipo de alteraciones (óxidos e hidróxidos).

De acuerdo con las firmas espectrales de los óxidos e hidroxilos, y tomando en cuenta la influencia de la vegetación y su relación con la presencia de hidroxilos se elaboró la composición ETM 742, propuesta por Vandenberg (2003), en la que la alteración hidrotermal se expresará en tonos rojos a magenta y la vegetación en tonos verdes.

5.4.3.2.4 Composición de cocientes de bandas

Las composiciones en falso color de cocientes de bandas se obtienen al combinar 3 cocientes de bandas y desplegarlas en los correspondientes colores rojo, verde y azul. Estas composiciones se utilizan comúnmente en el mapeo de alteraciones hidrotermales debido a que la combinación de estos 3 cocientes permite minimizar el efecto de la iluminación desigual del terreno y mejora los contrastes espectrales.

Una ventaja de este método sobre los cocientes de bandas es que se pueden observar simultáneamente los patrones de distribución de los minerales arcillosos y de los óxidos de hierro (Knepper, 1989).

Se elaboraron las composiciones de cocientes de bandas ETM 5/4,4/3,5/7, aplicada por Fernández de la Vega-Márquez y Prol-Ledesma (2001) en ETM y la composición ETM 3/5,3/1,5/7, utilizada por Sabins (1997) desplegadas en rojo, verde y azul (RGB), respectivamente.

5.4.3.3 Análisis de Componentes Principales (PCA)

Con la finalidad de obtener mejores resultados y separar la respuesta espectral de los hidroxilos y los óxidos del efecto de la vegetación se utilizó el Análisis de Componentes Principales (PCA).

5.4.3.3.1 Composición de componentes principales

Con los resultados presentados por la matriz de carga se elaboró una composición en falso color, utilizando las componentes elegidas a partir de la matriz de carga obtenida.

Para esta composición se desplegó la componente principal C3 en rojo, la componente principal C5 en verde y la componente principal C4 en azul, lo que permite observar los óxidos en rojo, la vegetación en verde y los hidroxilos en azul.

5.4.3.3.2 Análisis de Componentes Principales Dirigidas

Para tratar de resaltar aún más la diferencia espectral entre las zonas alteradas y el resto del terreno, en la porción occidental de la zona de estudio, se aplicó el método de Fraser (1991) denominado Análisis de Componentes Principales Dirigidas (DPCA).

Este método es una variación del análisis PCA ordinario, y consiste en ingresar al proceso estadístico cocientes de bandas con objetivos específicos, en lugar de la *suite* completa de bandas espectrales, con la finalidad de obtener componentes con la mayor cantidad de información espectral de un material en específico.

De acuerdo con el objetivo de este trabajo, se desea resaltar la presencia de óxidos e hidroxilos en la zona de estudio por lo que se utilizaron los cocientes de bandas ETM 3/1 y ETM 5/7, respectivamente.

Para obtener una componente principal que fuera representativa de los óxidos se utilizaron los cocientes de bandas ETM3/ETM1 y ETM4/ETM3, de este análisis estadístico se obtuvo una componente de óxidos y una de vegetación. Para obtener la componente de hidroxilos se utilizaron los cocientes de bandas ETM4/ETM5 y ETM5/ETM7.

5.4.3.4 Realce espacial de lineamientos

Para obtener el realce espacial de lineamientos de la imagen procesada se siguió la metodología propuesta por Moore y Waltz (1983). La secuencia de filtrado se aplicó a la primera componente principal (C1) del análisis de componentes principales (PCA) descrito previamente, esta componente se caracteriza porque contiene la mayor carga de información del relieve, por lo que resulta la mejor opción para visualizar los lineamientos naturales y antropogénicos del terreno (figura 5.11).

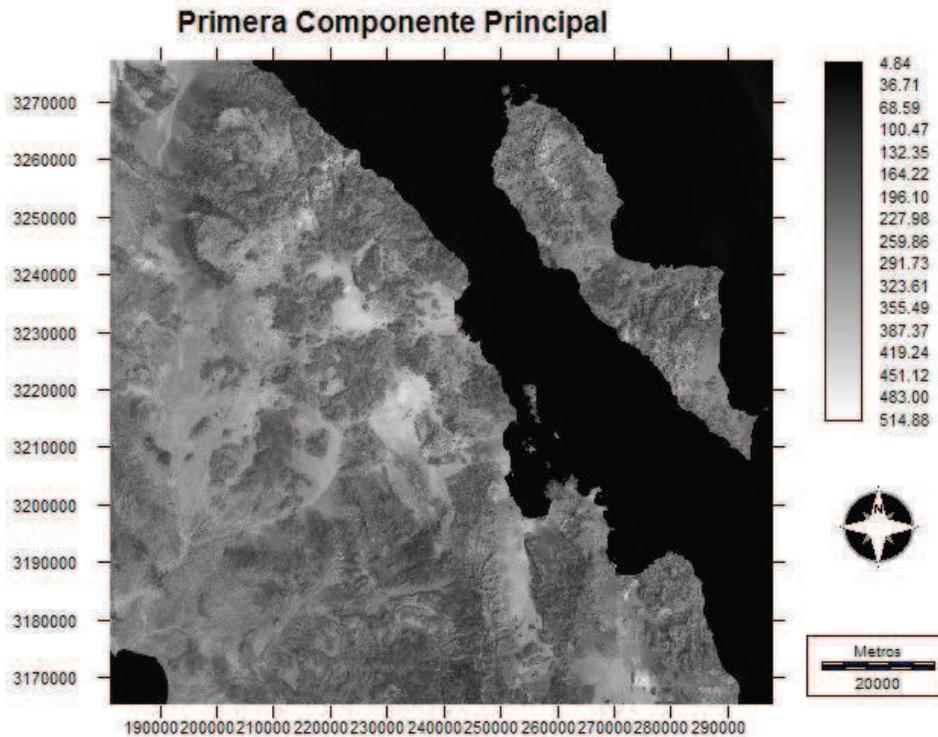


Figura 5.11 Primera componente principal. Se observa con alta nitidez el relieve del terreno.

Esta secuencia de procesamiento consiste en aplicar un filtro pasa bajas a la imagen de entrada (C1), este filtro fue un kernel 3x3, el cual se define en la figura 5.12.

Sobre el resultado de este filtrado se aplicaron filtros direccionales N, S, E, W, NW, NE, SW y SE, con la finalidad de resaltar los lineamientos en las direcciones principales. Cada filtro direccional se aplicó por separado y al finalizar se sumaron para obtener un filtro direccional total. Posteriormente se aplicó nuevamente el mismo filtro pasa bajas.

1	1	1
1	2	1
1	1	1

Figura 5.12 Filtro pasa-bajas (kernel 3x3).

A finalizar la secuencia de filtrado se aplicó un stretch lineal con saturación del 1% para visualizar con mayor detalle los lineamientos y crear una capa a partir de los mismos. Finalmente se sumó el resultado a la imagen de entrada (C1) y sobre esta se trazaron los lineamientos principales y secundarios sobresalientes, estos lineamientos fueron resaltados y guardados como una capa.

CAPÍTULO 6

Resultados

Introducción.

En este capítulo se describirán los resultados de la aplicación de estas técnicas, así como la interpretación de los mismos.

6.1 Cocientes de bandas

Como se describió en el capítulo anterior, se elaboraron cuatro cocientes de bandas para resaltar los hidroxilos, óxidos y las zonas con mayor cobertura de vegetación en la zona de estudio.

6.1.1 Cociente ETM 5/7

Como se puede observar en la imagen resultante (figura 6.1) el cociente de bandas permitió resaltar en tonos claros las zonas con mayor cantidad de hidroxilos sobre la superficie del terreno.

Este cociente aumenta la relación entre la alta reflectancia de los hidroxilos en la banda ETM 5 respecto al pico de absorbancia de los mismos en la banda ETM 7. Debido a la poca expresión superficial de la vegetación hidratada en la región se pudo obtener una buena imagen resultante de este proceso, observándose claramente al menos dos anomalías espectrales de alta reflectancia en la porción oriental de la imagen. Las anomalías detectadas se encuentran ubicadas en el norte de la Isla Ángel de la Guarda y en la sierra del sur de la Bahía Las Ánimas.

Al observar con detalle es apreciable una anomalía con tendencia lineal de rumbo NW-SE en la zona noroeste de la región (a un lado de la coordenada 3260000 en la figura 6.1), así como anomalías circulares menores asociadas a estructuras volcánicas activas en la región.

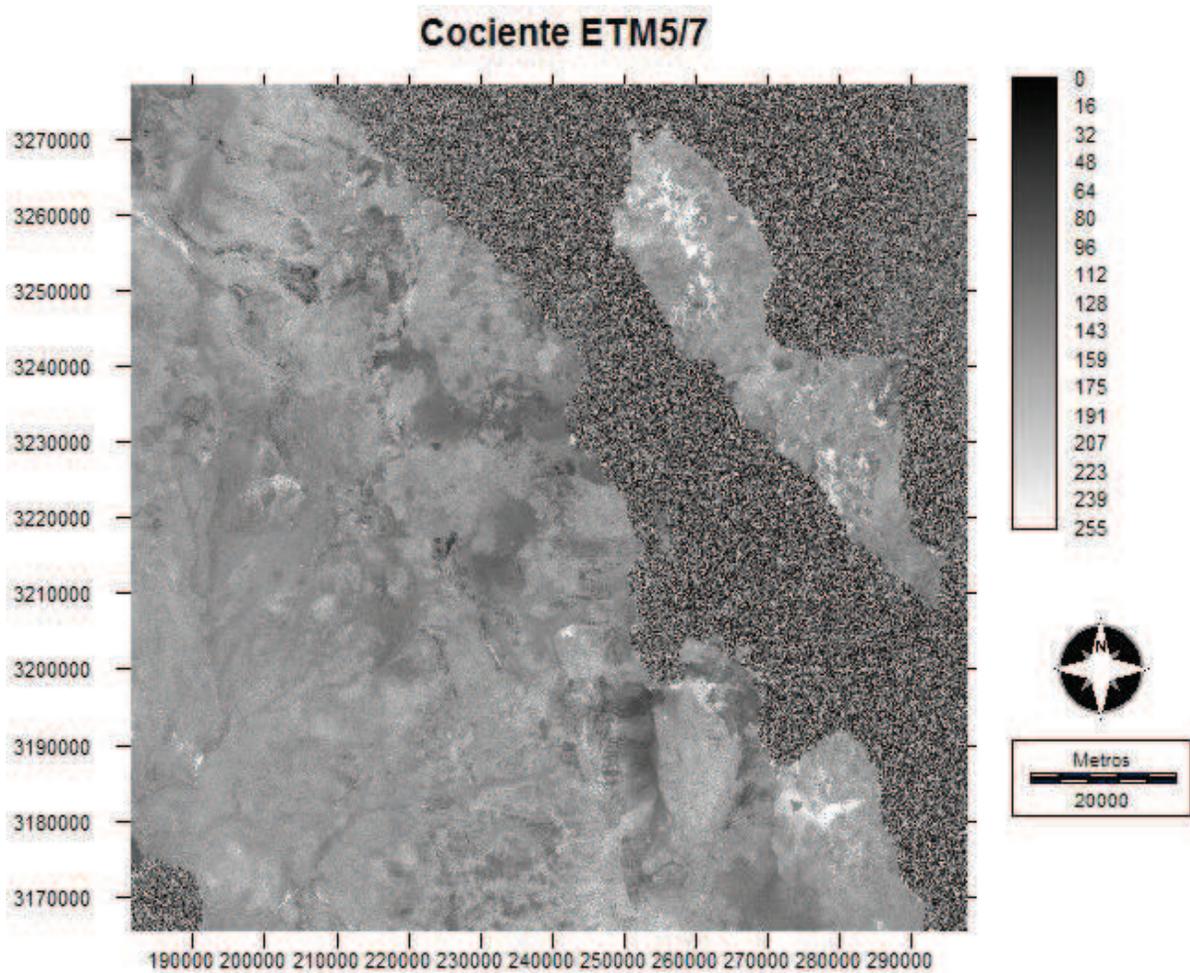


Figura 6.1 Cociente de bandas ETM 5/7 con saturación del 1%.

6.1.2 Cociente ETM 3/1

Como se observa en la imagen resultante de este cociente (figura 6.2), las zonas con mayor abundancia de óxidos se encuentran en la porción occidental de la región.

Las anomalías espectrales para óxidos no son tan evidentes en la imagen, cuyo resultado puede deberse al gran intemperismo químico de las rocas que cubren la región así como a la composición de las mismas, sin embargo aún son distinguibles algunas zonas de mayor concentración de óxidos.

Aun con el contraste pobre obtenido en esta región, se puede observar que las zonas más claras (mayor contenido de óxidos) se encuentran asociadas a abanicos aluviales, en su mayoría, por lo que su expresión en la superficie se encuentra ampliamente extendida.

Con la finalidad de apoyar la interpretación se resaltaron las zonas con los valores más altos de reflectancia en polígonos.

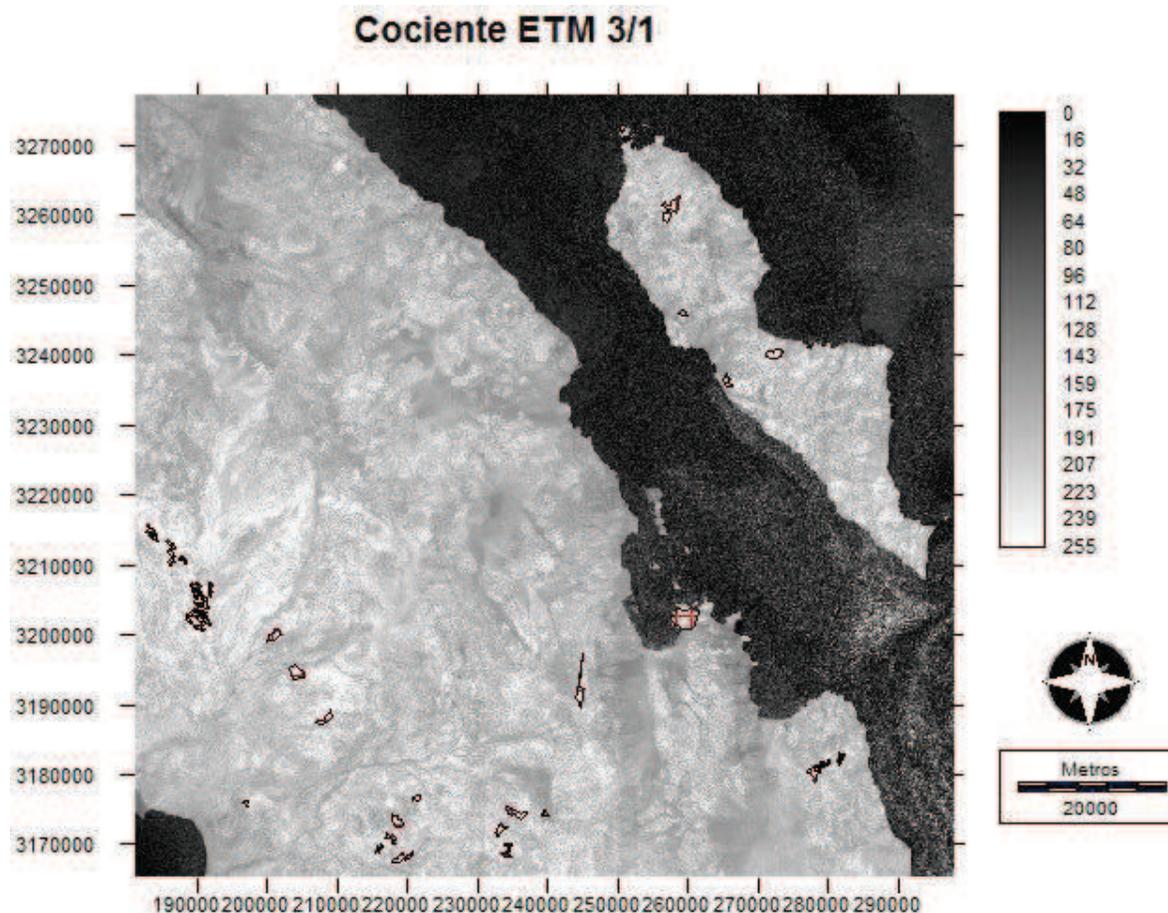


Figura 6.2 Cociente de bandas ETM 3/1 con saturación del 1%, con las zonas con abundancia de óxidos en polígonos.

Al observar las zonas resaltadas es posible notar una relación entre la distribución de anomalías de óxidos y de hidroxilos; se observa que algunas de las anomalías encontradas para hidroxilos se encuentran en los mismos sitios que las anomalías de óxidos encontradas con este cociente.

6.1.3 Cociente ETM 4/3

El cociente para resaltar vegetación se utilizó para identificar las zonas cuya respuesta espectral tuviera un aporte mayoritario de este material.

En la imagen resultante de este proceso se puede observar una anomalía de reflectancia lineal, orientada prácticamente de norte a sur, situada a las faldas de la Sierra La Libertad (figura 6.3). Adicionalmente se observa una anomalía similar a los 3250000 m, ésta se encuentra asociada a un rasgo morfológico circular (probablemente una caldera).

Se observa que la expresión de la vegetación es escasa en la imagen, así como en las zonas en donde se han detectado las anomalías de óxidos e hidroxilos (figuras 6.1 y 6.2) permitiendo identificar anomalías asociadas a actividad hidrotermal con mayor certeza.

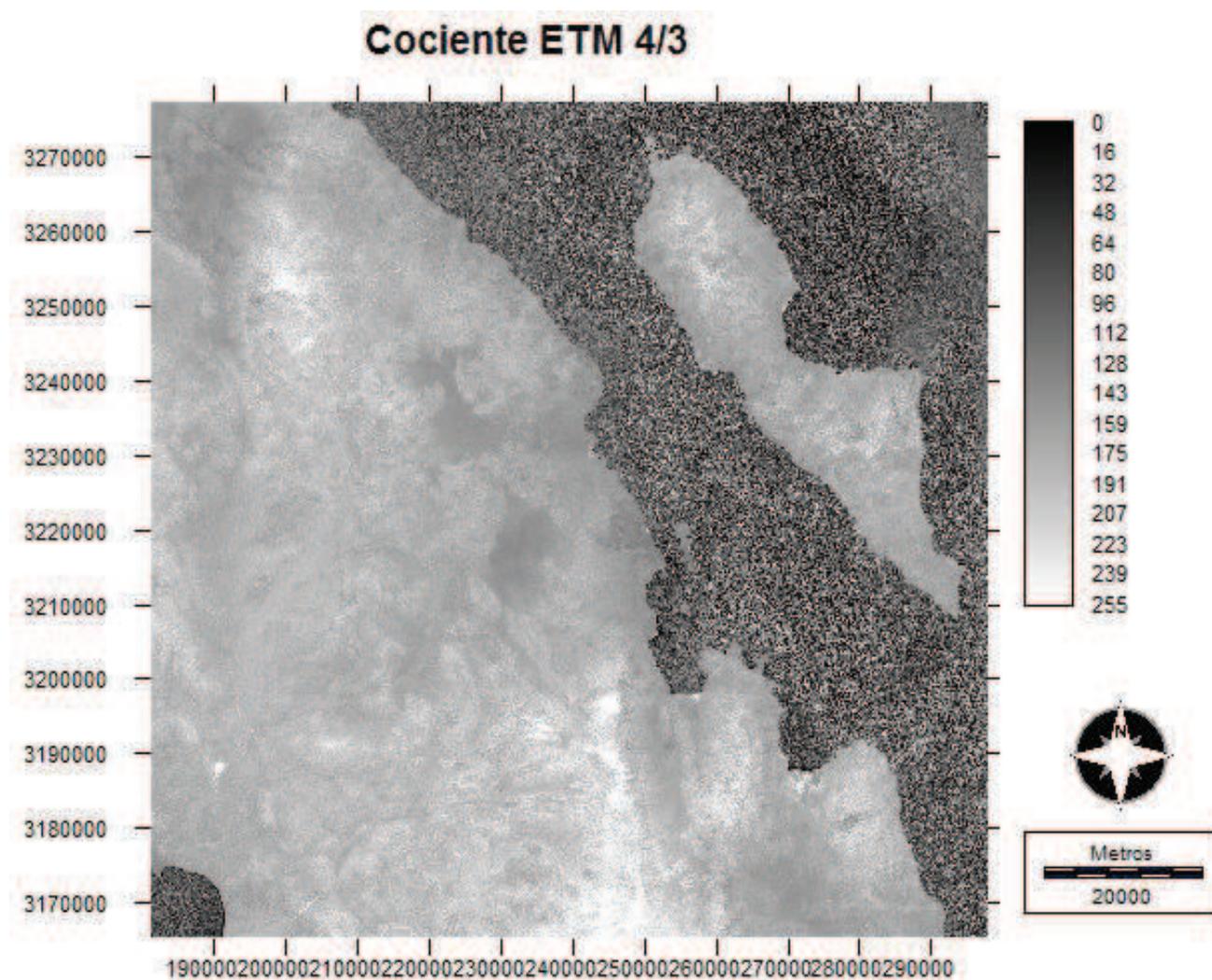


Figura 6.3 Cociente de bandas ETM 4/3 con saturación del 1%.

6.2 Composiciones en falso color y en color real

6.2.1 Composición ETM 321

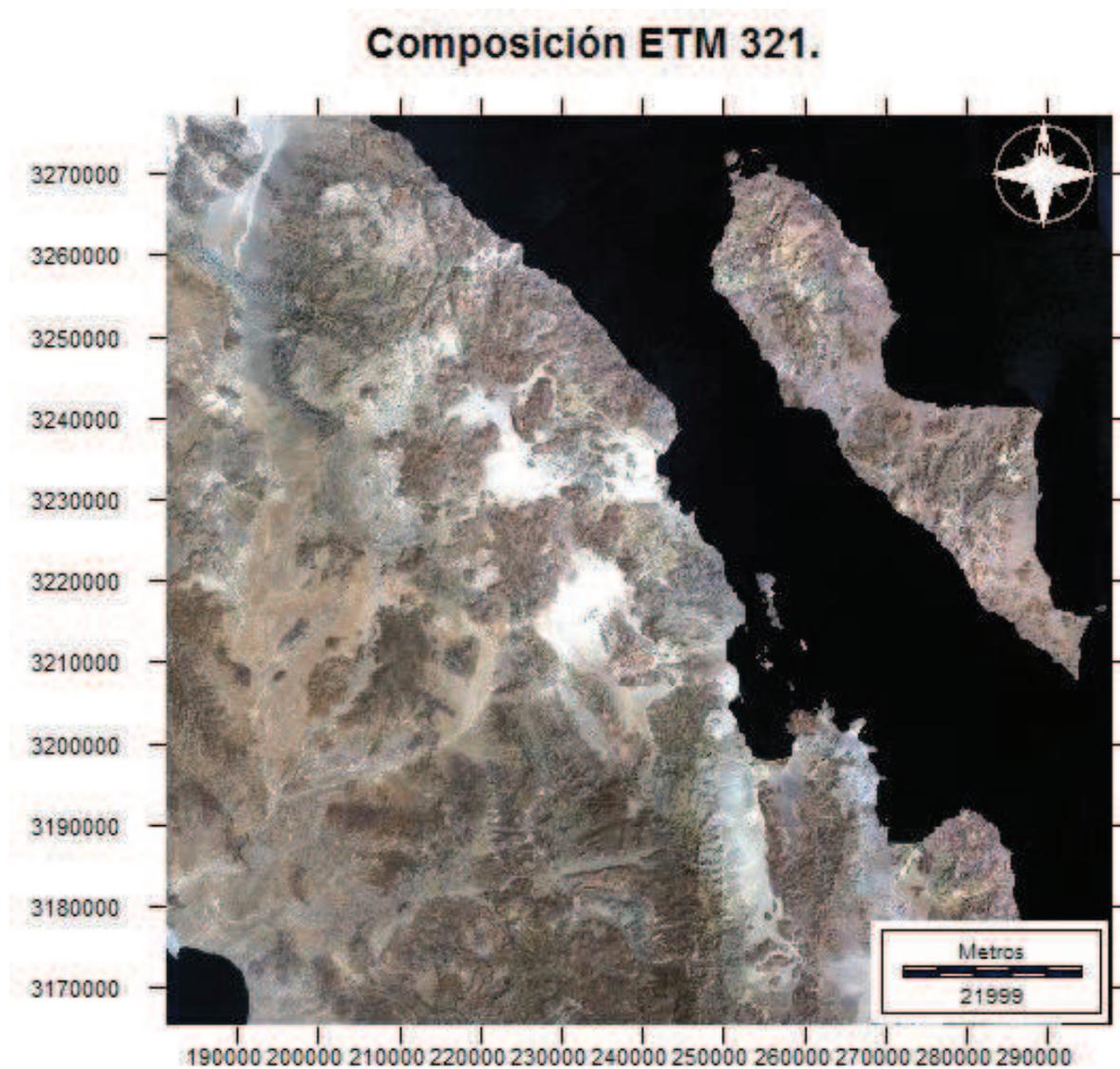


Figura 6.4 Composición en color real de la zona de estudio.

Esta primera composición a color permite observar la zona de estudio tal y como se ve en el espectro visible. Esta composición se elaboró con la finalidad de analizar los patrones de reflectancia de los materiales en el espectro visible, identificar las zonas con gran cobertura de vegetación, las zonas de abanicos aluviales y las diferentes litologías que afloran en la región.

Se puede observar que, en general, la zona es árida y contiene poca cobertura de vegetación, son apreciables algunos patrones estructurales muy marcados, así como la expresión de colores poco usuales en las rocas que afloran en la Isla Ángel de la Guarda y en todo el oriente de la península.

6.2.2 Composición ETM 432

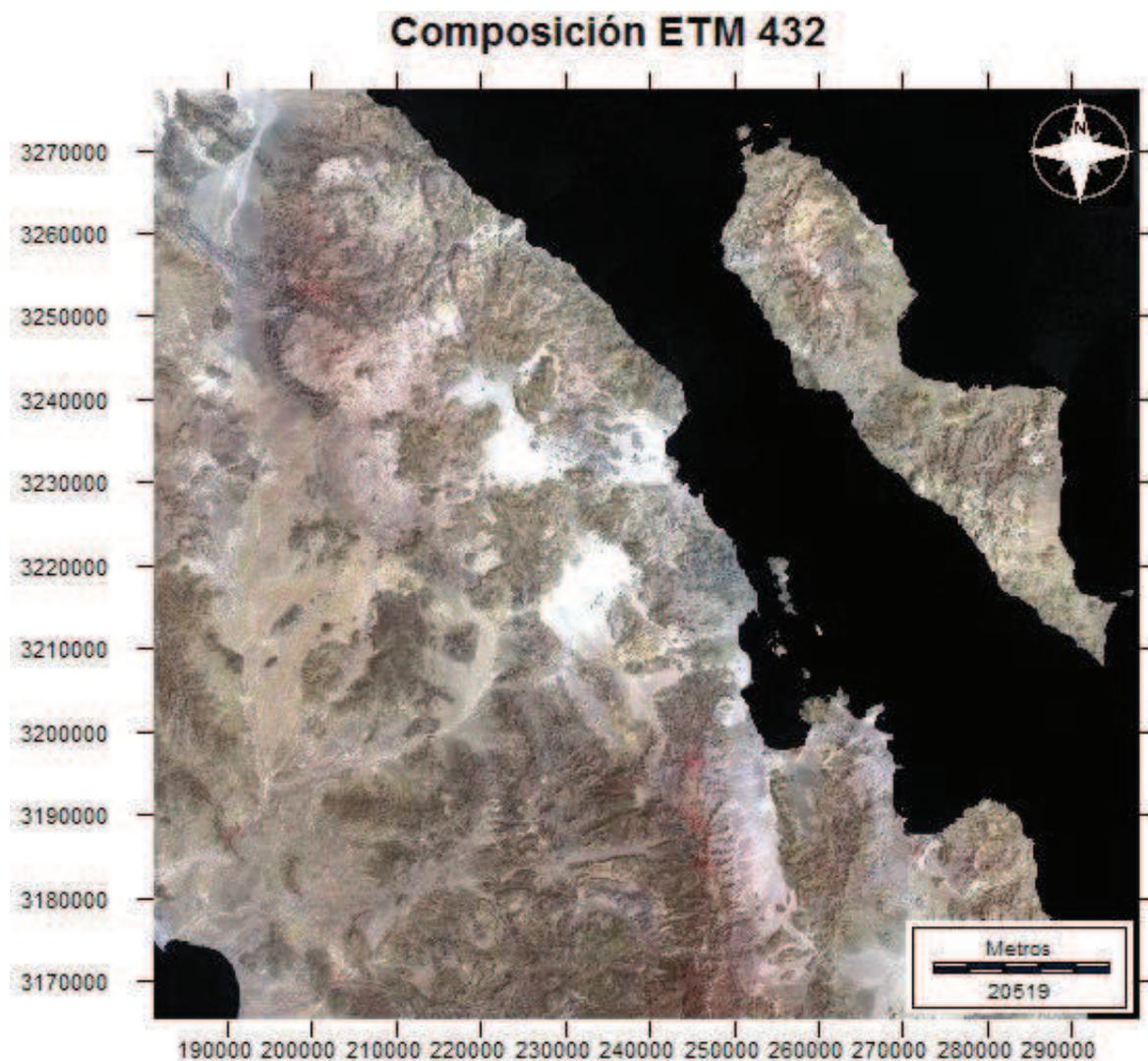


Figura 6.5. Composición ETM 432. Se observa la vegetación en tonos rojos.

La composición ETM 432 se elaboró con la finalidad de resaltar las zonas con mayor cobertura de vegetación en tonos rojos. Como se aprecia en la figura 6.5, la vegetación no

tiene una gran expresión en la superficie, por lo que permite identificar los materiales de interés con mayor certidumbre.

Esta composición en falso color confirma las anomalías debidas a la vegetación observadas en el cociente de bandas ETM 4/3; una vez más se observa un patrón lineal en color rojo brillante a lo largo de la Sierra La Libertad, y rodeando un cuerpo semicircular de gran diámetro en la zona de Calamajué.

6.2.3 Composición ETM 742

La composición ETM 742 es ampliamente utilizada para realizar mapeos litológicos; esta composición permite identificar las zonas de alteración en tonos rojos, anaranjados, azul y magenta.

Como se puede observar en la figura 6.6, esta composición muestra las anomalías previamente detectadas en tonos cian, mientras que los cuerpos volcánicos se observan como círculos rojizos o anaranjados. En la porción centro-sur de la imagen se puede observar una anomalía en color rojo de tendencia N-S, que cruza justo por el centro de la Sierra San Francisco Borja, esta nueva anomalía se observa alineada con los cuerpos volcánicos de la región.

La porción sur occidental de la imagen se ve de color rojizo claro en general, corroborando la expresión de los óxidos obtenida con el cociente de bandas ETM 3/1. Por otra parte, los cuerpos rocosos que afloran en la región se observan en distintos tonos de verde: los verdes más claros están asociados a la cubierta vulcano-sedimentaria mientras que los de tonos más oscuros se han identificado como rocas metamórficas, según lo descrito en la carta geológico-minera del estado (INEGI; 2008). Esta composición permitió resaltar una nueva anomalía: la tendencia central de Sierra San Francisco Borja.

Un resultado no esperado pero notable es la separación de la zona de estudio en dos tonos principales: verde y naranja. Se puede ver que la porción oriental de la península presenta principalmente una tonalidad verde, mientras que la región occidental presenta colores que tienden hacia el rojo, al comparar esta imagen con la carta geológico minera estatal salta a

la vista una correlación entre la respuesta espectral obtenida con esta composición y la distribución de los terrenos tectono-estratigráficos (figuras 2.1 y 6.6).

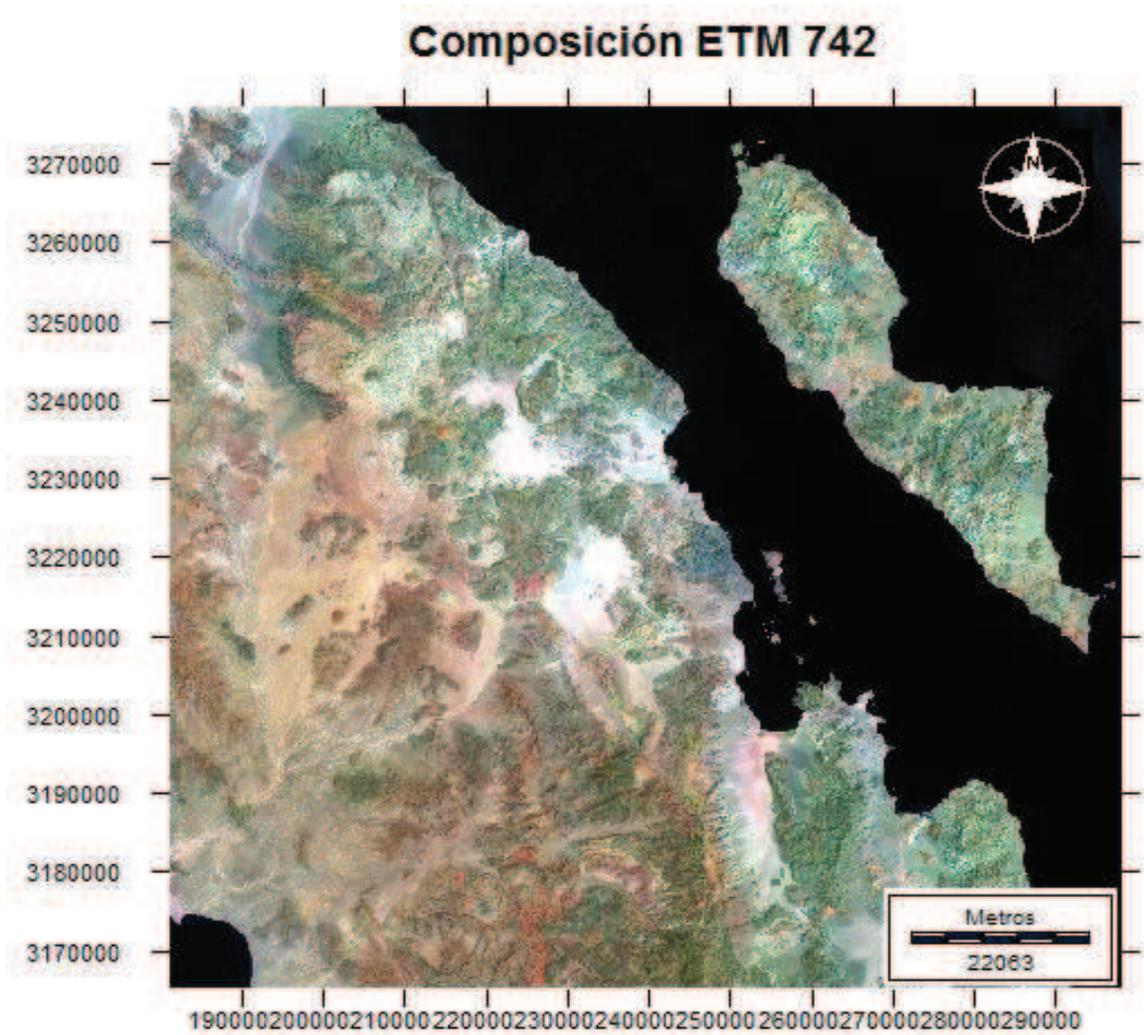


Figura 6.6 Composición en falso color ETM 742, se observan en tonos rojos, anaranjados y magenta las zonas con alto contenido de óxidos e hidroxilos.

6.2.4 Composición de cocientes de bandas

En la composición ETM 5/4,4/3,5/7 se resaltan los minerales de alteración hidrotermal en tonos rojos, magenta y azul, mientras que la vegetación se observa en tonos verdes y cian debido al efecto de los hidroxilos asociados a la misma.

En la figura 6.7 se puede observar que en esta composición se obtuvo principalmente el realce de los hidroxilos, por lo que la imagen se observa casi por completo en un tono cian

a verde. Aun así, son detectables la anomalía identificada previamente en la Isla Ángel de la Guarda, la anomalía de del sur de Bahía Las Ánimas, en color azul, y la anomalía del Sierra San Francisco Borja en un rojo anaranjado.

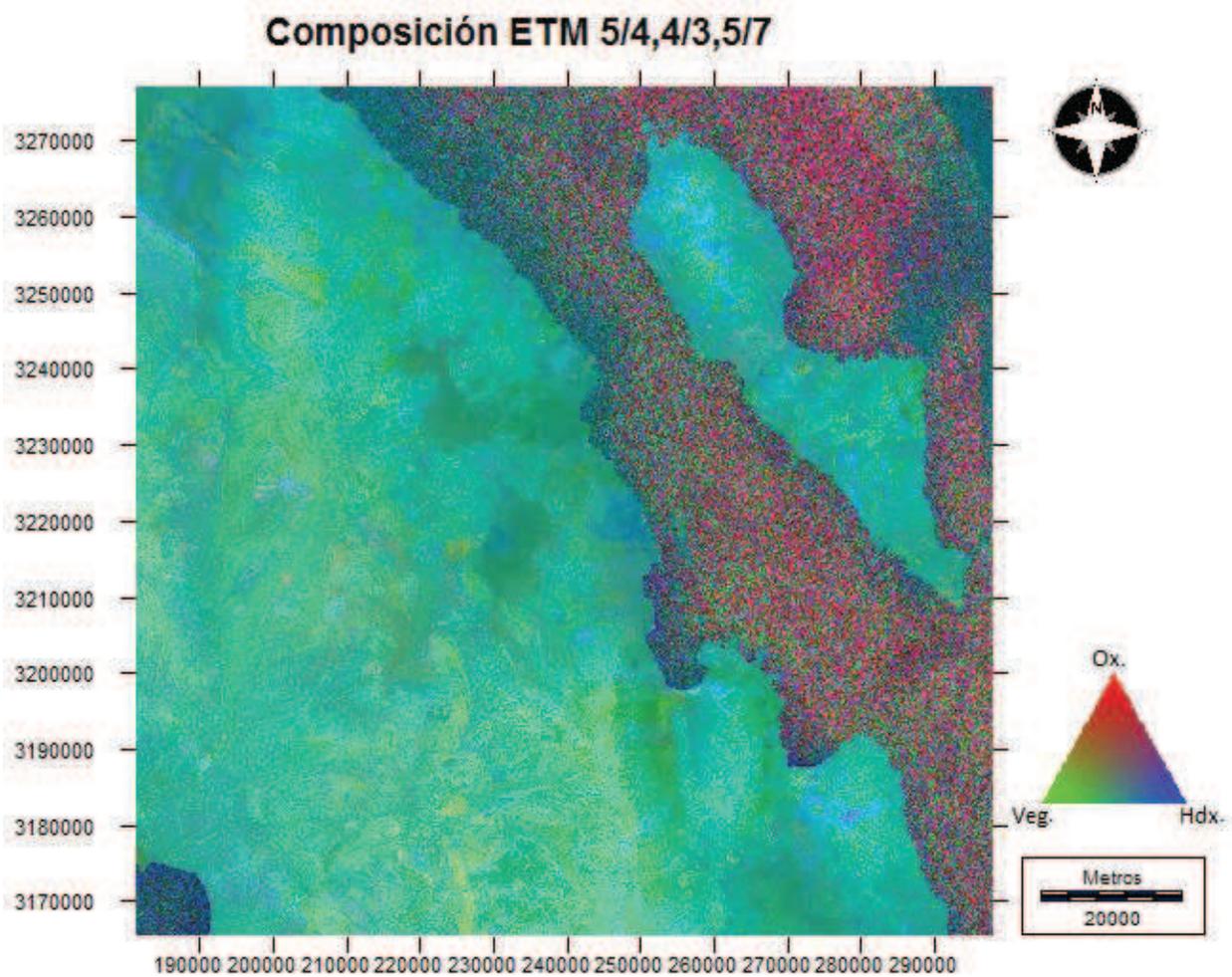


Figura 6.7 Composición de cocientes de bandas. En tonos azul y magenta las zonas con alteración hidrotermal, en verde las zonas cubiertas por vegetación.

Por su parte, en la composición ETM 3/5,3/1,5/7 se pueden observar en tonos anaranjado y amarillo las regiones exterior e interior de la anomalía de alteración hidrotermal, respectivamente.

En la figura 6.8, resultado de esta composición, se pueden ver los óxidos en color verde, los hidroxilos en azul y las zonas más secas en rojo. Así mismo, se pueden identificar las mismas anomalías descritas previamente: las anomalías de Isla Ángel de la Guarda, zona de

Calamajué y la de Bahía Las Ánimas en azul, expresando la predominancia de los hidroxilos en esas zonas. Mientras que en tonos anaranjados y amarillos se puede identificar la anomalía de Sierra San Francisco Borja, que confirma la anomalía identificada con la composición simple ETM 742.

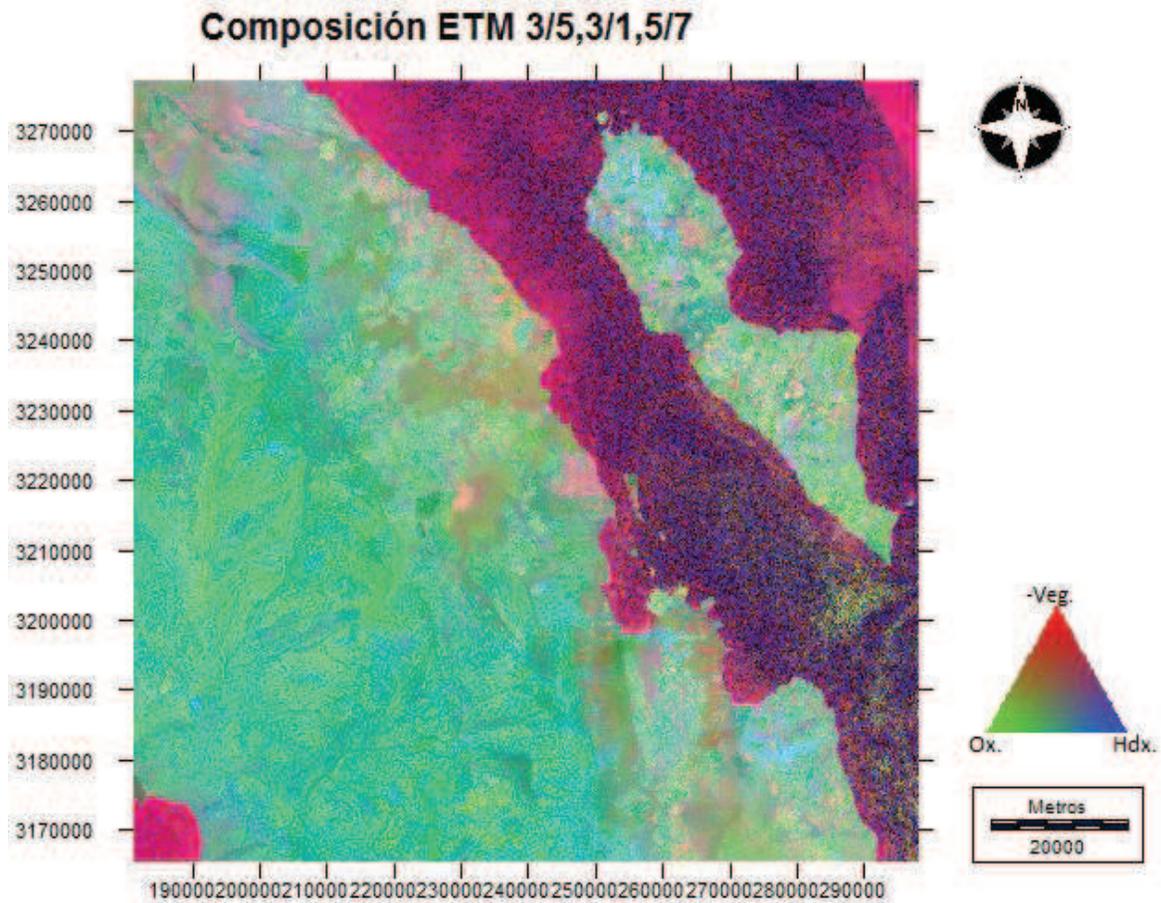


Figura 6.8 Composición de cocientes de bandas. En tonos amarillo y anaranjado las zonas con alteración hidrotermal.

6.3 Análisis de Componentes Principales (PCA)

Con la finalidad de obtener mejores resultados y separar la respuesta espectral de los hidroxilos y los óxidos del efecto de la vegetación se utilizó el Análisis de Componentes Principales (PCA). Éste se realizó para las seis bandas cuya información es más relevante para el objetivo del presente estudio (bandas ETM 1 2, 3, 4, 5 y 7). Los resultados se muestran en las tablas 6.1 a 6.4.

VAR/COVAR	B1	B2	B3	B4	B5	B7
B1	665.29	904.37	1373.41	756.18	1576.32	1368.51
B2	904.37	1247.25	1907.12	1055.83	2229.96	1932.38
B3	1373.41	1907.12	2949.46	1638.80	3480.47	3008.09
B4	756.18	1055.83	1638.80	919.55	1968.55	1695.98
B5	1576.32	2229.96	3480.47	1968.55	4457.80	3844.22
B7	1368.51	1932.38	3008.09	1695.98	3844.22	3341.84

Tabla 6.1 Matriz de varianza/covarianza. Análisis de Componentes Principales para 6 bandas.

COR.	B1	B2	B3	B4	B5	B7
B1	1.000	0.993	0.980	0.967	0.915	0.918
B2	0.993	1.000	0.994	0.986	0.946	0.947
B3	0.980	0.994	1.000	0.995	0.960	0.958
B4	0.967	0.986	0.995	1.000	0.972	0.967
B5	0.915	0.946	0.960	0.972	1.000	0.996
B7	0.918	0.947	0.958	0.967	0.996	1.000

Tabla 6.2 Matriz de correlación. Análisis de Componentes Principales para 6 bandas.

Componentes	C1	C2	C3	C4	C5	C6
% VAR.	97.526	2.160	0.190	0.083	0.025	0.016
EIGENVAL	13245.211	293.290	25.755	11.329	3.386	2.222
EIGENVEC.1	0.214	-0.401	0.511	-0.420	0.149	0.578
EIGENVEC.2	0.300	-0.409	0.296	-0.187	-0.025	-0.787
EIGENVEC.3	0.466	-0.491	-0.363	0.399	-0.452	0.215
EIGENVEC.4	0.261	-0.172	-0.441	0.042	0.840	-0.014
EIGENVEC.5	0.575	0.479	-0.281	-0.566	-0.200	0.006
EIGENVEC.6	0.498	0.415	0.496	0.553	0.164	0.024

Tabla 6.3 Matrices de eigen valores y eigen vectores. Análisis de Componentes Principales para 6 bandas.

CARGA	C1	C2	C3	C4	C5	C6
B1	0.95651	-0.26598	0.10050	-0.05486	0.01066	0.03338
B2	0.97851	-0.19819	0.04259	-0.01785	-0.00130	-0.03321
B3	0.98691	-0.15487	-0.03393	0.02476	-0.01531	0.00591
B4	0.99122	-0.09706	-0.07375	0.00461	0.05100	-0.00067
B5	0.99177	0.12286	-0.02133	-0.02855	-0.00551	0.00014
B7	0.99092	0.12298	0.04359	0.03221	0.00521	0.00063

Tabla 6.4 Matriz de carga. En color rojo se resaltan la componente útil para identificar óxidos, en azul la componente útil para resaltar hidroxilos y en verde la componente con mayor aporte de información para identificar la vegetación. Análisis de Componentes Principales para 6 bandas.

Como se puede observar en la tabla 6.4, la componente C3 presenta una alta proporción de información espectral producida por los óxidos. Esto se interpreta a partir de la gran cantidad de información que tiene de las bandas ETM 1 y ETM 3, representando en tonos oscuros los valores más altos, por lo que el negativo de esta componente es lo mejor para identificar óxidos.

La principal carga de información de hidroxilos está contenida en la componente C3, sin embargo, esta contiene la mayor proporción de información de óxidos por lo que ya no se puede reelegir. La componente C4 presenta la segunda mayor proporción de información de las bandas ETM 5 y 7, y al igual que la componente C3, la contribución de estas bandas presenta signos opuestos a los rasgos de espectrales de los hidroxilos, por lo que es necesario obtener el negativo de esta componente para resaltar los hidroxilos.

Finalmente la componente C5 es la de mayor utilidad para identificar vegetación, ya que presenta la mayor diferencia de información entre las bandas ETM 3 y 4, de acuerdo con la información obtenida de la matriz de carga. Nótese que esta componente aunque presenta la mayor carga de información sobre vegetación, presenta valores muy bajos, lo que indica la escasa información espectral que aporta.

6.3.1 Composición de componentes principales

La composición de PCA se elaboró utilizando las componentes C3, para óxidos, C5, para vegetación, y C4 para hidroxilos. El resultado de esta composición se observa en la figura 6.9.

En ésta se pueden observar que las anomalías de Bahía de Las Ánimas, Isla Ángel de la Guarda se expresan en tonos magenta, similarmente la mayor parte del occidente de la zona de estudio presenta colores azulados a violeta enmascarando la presencia de más anomalías en esa región. En esta última zona no es posible identificar claramente la anomalía descrita en Sierra San Francisco Borja, por lo que se utilizó el método de análisis de componentes principales dirigidas (DPCA) para resaltar aún más las anomalías y discriminar falsas anomalías.

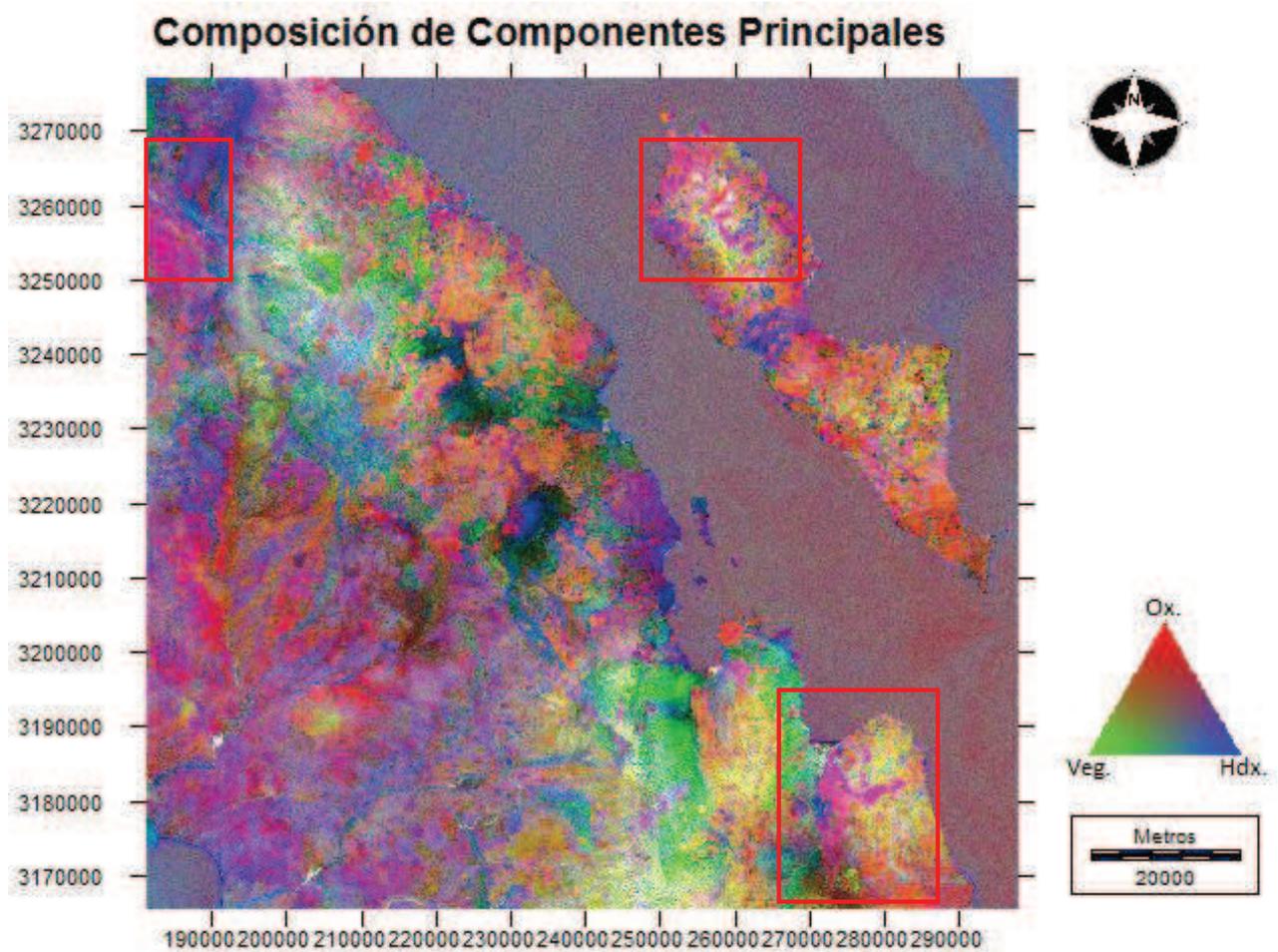


Figura 6.9 Composición de componentes principales C3, C5, C4 (Óxidos., Vegetación, Hidroxilos)

6.3.2 Análisis de Componentes Principales Dirigidas

Como resultado del análisis de componentes principales dirigidas se obtuvieron las matrices de carga descritas en la figura 6.10 para obtener una componente representativa de óxidos,

una de hidroxilos y una de vegetación, esta última para discriminar las regiones cubiertas por este material.

Carga Hdx	C1	C2	Carga Ox.	C1	C2
C5n7	-0.152242	0.988343	C3n1	0.999939	-0.011062
C5n4	0.999974	0.007225	C4n3	0.631163	0.77565

Figura 6.10 Matrices de carga del Análisis de Componentes Principales Dirigidas.

En la figura 6.10, se observa que la componente C2 de la matriz de carga de hidroxilos es la que contiene la mayor proporción de información sobre éstos. Por otra parte, de la matriz de carga elaborada para los óxidos, se observa que la mayor carga de información sobre los óxidos está contenida en la componente C1, mientras que la componente C2 de la misma matriz contiene una buena proporción de información espectral de la vegetación.

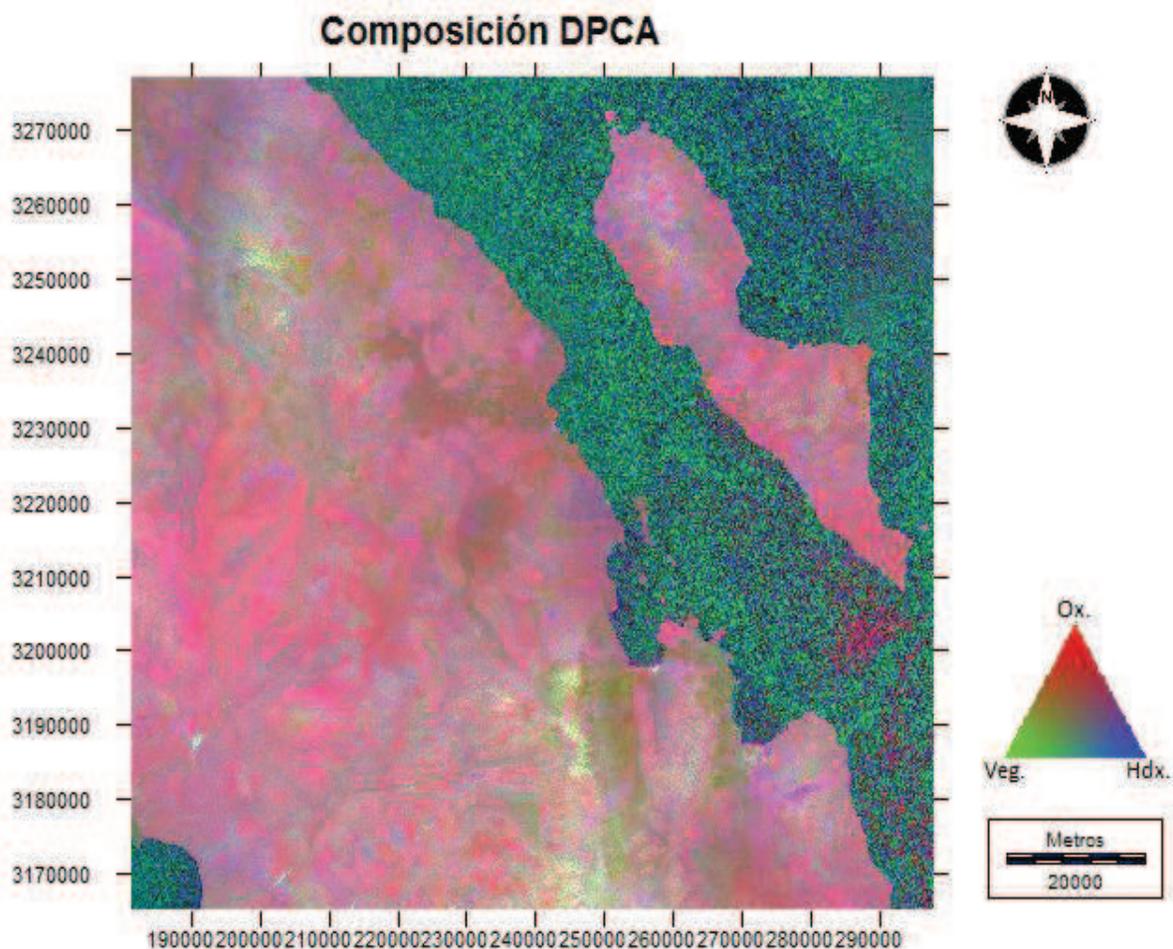


Figura 6.11. Composición de DPCA. En tonos rojos los óxidos, en verde la vegetación, en azul los hidroxilos, y en magenta las zonas de alteración hidrotermal.

Con los resultados de los análisis de componentes principales dirigidas, se construyó una composición a color de las componentes resultantes para vegetación, óxidos e hidroxilos. En esta composición se resaltan los óxidos en rojo (componente C1 de óxidos), la vegetación en verde (componente C2 de óxidos) y los hidroxilos en azul (componente C2 de hidroxilos), de modo que la alteración se presenta en tonos magenta.

En la imagen obtenida de este proceso se puede observar que las zonas en tonos magenta se definieron con mayor claridad en la zona occidental de la región, respecto a la composición de PCA convencional, mientras que las anomalías de la porción oriental se conservaron. Adicionalmente se pueden observar claramente las áreas cubiertas por vegetación en tonos amarillos, que siguen un patrón lineal a lo largo de la Sierra La Libertad (figura 6.11).

El tono rojizo a rosado que predomina en la escena se asocia a la gran expresión superficial de los óxidos, cuya distribución es correlacionable con la presencia de grandes abanicos aluviales.

6.4 Realce espacial de lineamientos

Para obtener el realce espacial de lineamientos de la imagen procesada se siguió la metodología propuesta por Moore y Waltz (1983), el resultado de la secuencia de filtrado se muestra en la figura 6.12.

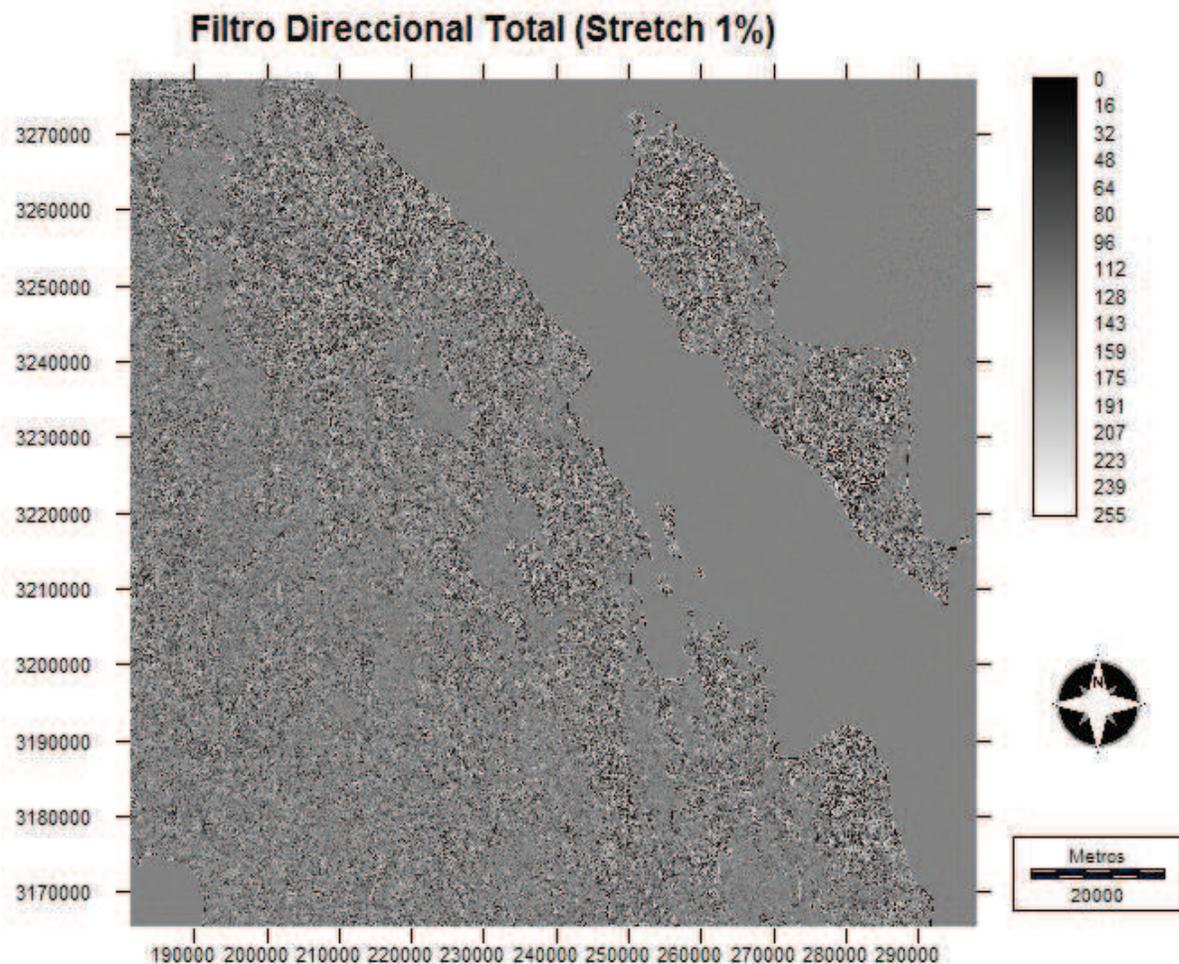


Figura 6.12 Filtro direccional total filtrado a su vez con un pasa bajas y mejorado con stretch lineal con saturación del 1%.

Los lineamientos identificados en la imagen resultante del realce espacial se desplegaron sobre la componente C1 del PCA para su análisis e interpretación (figura 6.13). Como resultado se obtuvo una imagen con 57 lineamientos identificados como sistemas de fallas o fracturas, y tres lineamientos de rasgos morfológicos como el cauce de un río y el contorno de una caldera en la zona norte de la zona de estudio.

Se midió el rumbo de los lineamientos identificados y se construyó la roseta de rumbos ilustrada en la imagen 6.13, en ésta se puede observar que el 21% de los datos tienen una tendencia preferencial de 20° NW-SE, mientras que el 10% de los lineamientos presenta un rumbo de 20-30° NE-SW, esta distribución puede expresar los pares conjugados de los principales sistemas de fallas que afectan a la región.

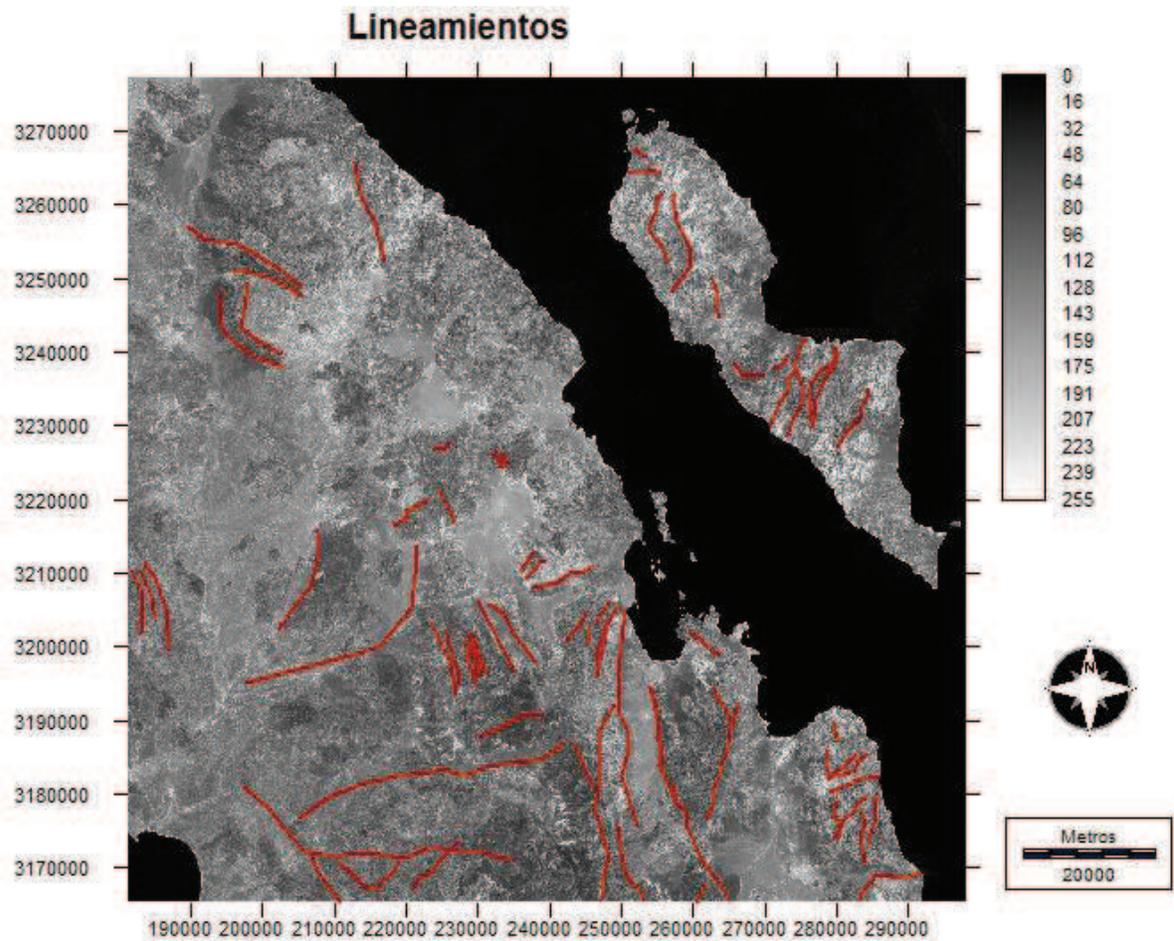


Figura 6.13 Imagen resultante del proceso de filtrado. Lineamientos indicados con líneas rojas.

La distribución de las frecuencias de los lineamientos identificados permite inferir el efecto del *Basin and Range* sobre la península de Baja California. Así mismo, el conocimiento del comportamiento estructural de la región permitirá inferir los caminos de ascenso de los fluidos hidrotermales y, por tanto, las zonas con potencial geotérmico, o en su defecto, minero.

Como resultado adicional del realce espacial se identificaron lineamientos no reportados hasta ahora en documentos publicados, en la porción noroeste de la Isla Ángel de la Guarda. Estos lineamientos se encuentran localizados en la misma zona en la que se ubica una de las anomalías espectrales, por lo que su identificación eleva las probabilidades de encontrar un sistema hidrotermal en esa zona.

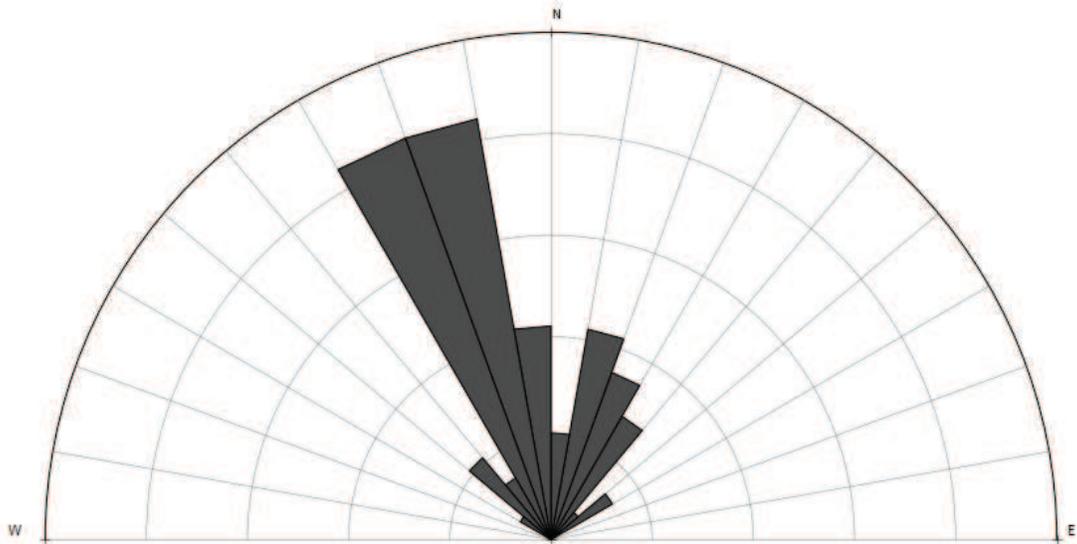


Figura 6.14 Roseta de rumbos para los lineamientos identificados con teledetección.

En la figura 6.13 se puede observar la distribución espacial de los principales lineamientos en la región; se observa que en las zonas que se han detectado las tres principales anomalías se encuentran sistemas de lineamientos que, de acuerdo con la Carta Geológico-Minera del estado de Baja California, corresponden a sistemas de fallas normales, principalmente.

CAPÍTULO 7

Discusión y Conclusiones

7.1 Discusión de Resultados

Con el fin de determinar las zonas potenciales se agregó la capa de lineamientos identificados en el realce espacial a las imágenes de composiciones ETM 742, composiciones de cocientes de bandas y a las composiciones de PCA y DPCA. Sobre cada una de éstas se delimitaron las zonas potenciales que arrojó cada imagen y se guardaron como capas.

Finalmente se desplegaron todas las capas de zonas de alteración creadas sobre una misma imagen con el objetivo de visualizar las zonas que resaltaban en la mayoría de las imágenes y eliminar falsas anomalías (figura 7.1).

Como resultado del despliegue simultáneo de la información se identificaron 4 zonas potenciales: suroeste del Valle Calamajué (1), norte de Isla Ángel de la Guarda (2), centro y norte de Sierra San Francisco Borja (3) y sureste de Bahía Las Ánimas (4).

Las anomalías espectrales identificadas fueron comparadas con la información publicada en la carta Geológico Minera del Estado de Baja California (SGM, 2008). A partir del análisis conjunto de la información espectral y la carta geológico-minera del estado, se determinó que la anomalía del suroeste del Valle de Calamajué, así como la del sureste de Bahía Las Ánimas corresponden a alteraciones asociadas a depósitos minerales, identificadas como Zona Mineralizada Calamajué y el prospecto Sierra Agua de Soda, respectivamente.

La anomalía encontrada en la porción norte de Isla Ángel de la Guarda indica una alta concentración de hidroxilos en la superficie cuyo origen podría estar relacionado a descargas de gas costeras, reportadas por pescadores locales. Asociada a esta región anómala se

detectaron algunos lineamientos mediante el realce espacial, aunque éstos aún no han sido reportados en documentos publicados.

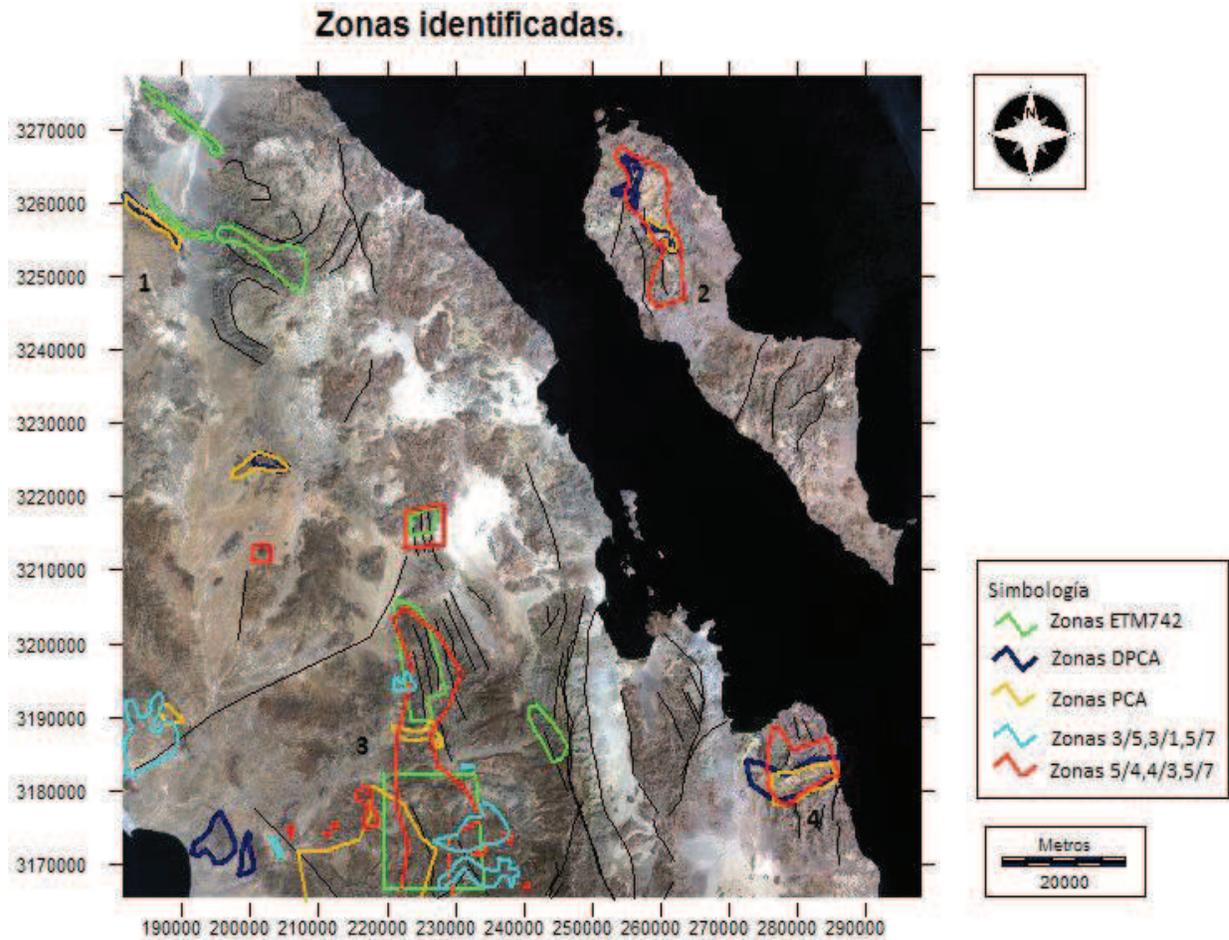


Figura 7.1. Despliegue simultaneo de las zonas de alteración identificadas en cada imagen resultante. Se puede observar que en algunos sitios se empalman los polígonos, éstas son las zonas con mayor potencial de exploración.

La anomalía de rumbo N-S, identificada en la Sierra San Francisco Borja se encuentra ligada a un sistema de fallas normales y no parece estar asociada a ningún yacimiento mineral, por lo que representan la única anomalía con potencial geotérmico detectada en la región peninsular de la zona de estudio (figura 7.2.).

En ambas anomalías se puede observar claramente la relación entre la extensión en superficie de las anomalías y los lineamientos que afloran; esta relación es de gran importancia en el estudio de los patrones de circulación de los fluidos hidrotermales.

Como se puede observar en la figura 7.2, los lineamientos tienen una tendencia general NW-SE y NE-SW, conformando los sistemas de esfuerzo en pares conjugados. Es evidente que el patrón que describen las anomalías espectrales detectadas se concentra alrededor de estos sistemas de fracturas.



Figura 7.2 Zonas con mayor potencial para la exploración geotérmica (en contorno rojo). En líneas negras los lineamientos principales.

7.2 Conclusiones

El análisis conjunto de la información espectral y espacial que proporciona la Percepción Remota es de gran utilidad en las primeras etapas de la exploración geotérmica y minera, ya que permite identificar y ubicar prospectos en grandes áreas a un costo bajo, enfocando las actividades de exploración a estos sitios.

Los procesos de cocientes de bandas, composiciones en falso color, análisis de componentes principales y el análisis de componentes principales dirigidas, son procesos extractores de información por lo que permiten obtener información espectral imperceptible a simple vista. Por otra parte, el realce espacial de lineamientos permite identificar fácilmente los sistemas de fallas principales.

La comparación de los resultados obtenidos con los métodos de composiciones en falso color, composiciones de cocientes de bandas, análisis de componentes principales y análisis de componentes principales dirigidas, en relación a los lineamientos identificación, permitió eliminar falsas anomalías en los resultados y determinar zonas con mayor probabilidad de éxito en la exploración.

Tomando en cuenta los factores que puede producir falsas anomalías (intemperismo de rocas félsicas, presencia de calizas arcillosas, etcétera) se analizó la información espectral y espacial, obteniéndose 4 zonas potenciales: suroeste del Valle Calamajué, norte de Isla Ángel de la Guarda, centro y norte de Sierra San Francisco Borja y sureste de Bahía Las Ánimas.

De los cuatro prospectos identificados, tanto el norte de Isla Ángel de la Guarda como el de Sierra San Francisco Borja pueden tener potencial de estar asociados a fuentes geotérmicas, el resto de ellos no se incluyen en esta categoría debido a que se encuentran asociados a cuerpos mineralizados.

Como estudio adicional, se propone el procesamiento de la información contenida en las bandas que abarcan en infrarrojo térmico, con el fin de obtener anomalías térmicas y correlacionarlas con los resultados obtenidos.

Para corroborar los resultados es necesario adquirir información de campo, como son estudios geoquímicos y/o geofísicos, así como realizar el levantamiento cartográfico-geológico de la zona prospecto para identificar manifestaciones superficiales de sistemas geotérmicos activos.

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Rosa María Prol Ledesma por su paciencia y apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

A los doctores Aldo Ramos Rosique, Claudia Arango Galván, José Antonio Hernández Espriú y Héctor Sandoval Ochoa por el interés mostrado y las recomendaciones aportadas.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a Facultad de Ingeniería por todo el conocimiento y experiencia brindados.

A mis padres por todo el apoyo y motivación entregados a lo largo de tantos años. Gracias.

REFERENCIAS

Asociación Geotérmica Mexicana (AGM), 2007, Recursos geotérmicos: México, D.F., Gutiérrez Negrín Luis C. A., actualizado el 23 de enero de 2015, disponible en <http://www.geotermia.org.mx/geotermia/?page_id=688>, consultado 20/03/2015.

Aragón-Arreola, M., Morandi M., Martín-Barajas A., Delgado-Argote L., González-Fernández A., 2005. Structure of the rift basins in the central Gulf of California: Kinematic implications of oblique Rifting: Elsevier, Tectonophysics 409, p. 19-38.

Barajas, A. M., Delgado-Argote, L. A., 1995, Inventario de recursos minerales del estado de Baja California: México, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Departamento de Geología, 77 p.

Bedell R., 1994, Remote sensing in mineral exploration; Reviews in Economic Geology. Remote sensing and spectral geology, 16, 2, 5-10.

Campa-Uranga, M.F., y Coney P.J., 1983, Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distribution in Mexico: Canadian Journal of Earth Sciences, v. 20, p. 1040-1051.

Campbell J. B., 2002. Introduction to Remote Sensing: E.U.A., the Guilford Press, 718 p.

Crosta, A. P., De Souza-Filho C. R., Azevedo, F. y Brodie C, 2003. Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal components analysis. Journal of Remote Sensing, 24, 21, 4233-4240.

Delgado-Argote L. A., 2000. Evolución tectónica y magmatismo Neógeno de la margen oriental de Baja California Central. Ciudad Universitaria, México. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México., Tesis de doctorado en ciencias (geología).

Delgado-Argote L. A. y García-Abdeslem J., 1999. Shallow Miocene basaltic magma reservoirs in the Bahia de Los Angeles basin, Baja California, Mexico: Elsevier, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 88, 29-46.

Delgado-Argote L. A. y López-Martínez M., 2000. Geologic reconnaissance and Miocene age of volcanism and associated fauna from sediments of Bahía de Los Angeles, Baja California, central Gulf of California.: Geological Society of America, Special Paper, 334, 111-121.

Diamond, L. W., 2006, Rock-water interactions (for beginners): Institute of Geological Sciences, University of Bern, Suiza, 12 p.

Escalona-Alcázar F. J. y Delgado-Argote L., 2000. Estudio de la deformación en las islas San Lorenzo y Las Ánimas, Golfo de California: implicaciones sobre su desplazamiento como bloque rígido desde el Plioceno Tardío: GEOS, 1, vol. 20, p. 8-20.

Fabriol H., et. al., 1999. Backscattering and geophysical features of volcanic ridges offshore Santa Rosalía, Baja California Sur, Gulf of California, Mexico: Elsevier, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 93, p. 75-92.

Fernández de la Vega-Márquez, R. M. Prol-Ledesma y G. Orozco, 2001. Hydrothermal alteration and main structures mapping using TM images in La Primavera geothermal field (Mexico). Geofísica Internacional, 40, 3, 147-162.

Fraser S. J. 1990. Discrimination and identification of ferric oxides using satellite Thematic Mapper data: A Newman case study: International Journal of Remote Sensing. 12, 3, 614-635.

Gastil, G., Krummenacher, D., Minch, J., 1979. The record of Cenozoic volcanism around the Gulf of California. *Geol. Soc. Am. Bull.* 90, 839–857.

Gobierno del Estado de Baja California (GEBC), 2013, Medio Físico, Orografía Hidrografía (en línea): Baja California, México, publicado 2013, disponible en http://www.bajacalifornia.gob.mx/portal/nuestro_estado/municipios/ensenada/orografia.jsp, consultado 7 de febrero de 2015.

Honarmand M., Ranjbar H. y Shahabpour J., 2013. Combined use of ASTER and ALI data for hydrothermal alteration mapping in the northwestern part of the Kerman magmatic arc, Iran. *International Journal of Remote Sensing*, 34, 6, 2023-2046.

Keppie, D. J., 2004, Terrains of Mexico Revisited: A 1.3 Billion Year Odyssey: *International Geology Review*, 46, 765-794.

Khorram S., Koch, F. H., Var der Wiele, C. F., Nelson, S. A. C., 2012. Remote Sensing: E.U.A., Springer, Briefs in Space Development, 17-130.

Knepper D. H., 1989, Mapping hydrothermal alteration with Landsat Thematic Mapper data: Remote Sensing in Exploration Geology. Field Trip Guidebook, 28th International Geological Congress, American Geophysical Union, 13-21.

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., 1994, Remote Sensing and Image Interpretation: Estados Unidos de América, John Wiley & Sons Inc., 750 p.

Moore K. G. y F.A. Waltz, 1983, Objective procedures for lineament enhancement and extraction. U. S. Geological Survey. Moore, K.G., and F.A. Waltz, 1983. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49, 641-647.

Pirajno, F., 2006, Hydrothermal Processes and Mineral Systems: Australia, Springer, 1250 p.

Ruiz-Armienta J. R. y Prol-Ledesma R. M., 1995, Técnicas de procesamiento de imágenes en la exploración de yacimientos minerales de origen hidrotermal: Servicio de Publicaciones Universidad Complutense, Física de la Tierra, 7, 105-137.

Sabins, F.F., 1997. Remote Sensing. Principles and Interpretation: W.H. Freeman, Nueva York, NY, 494 p.

Sabins, F.F., 1999. Remote sensing for mineral exploration: Elsevier, Ore Geology Reviews, 14, 157-183.

Secretaría de Protección al Ambiente del Estado de Baja California (SPAEBEC), 2007, Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero del Estado de Baja California (en línea): Baja California, México, publicado en 2007, disponible en http://www2.inecc.gob.mx/sistemas/peacc/descargas/bc_igei_2005_vf.pdf consultado el 30 de enero de 2015.

Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2008, Carta Geológico-Minera del Estado de Baja California, 1:500 000: Hidalgo, México, SGM, serie 1:500 000.

Thompson A. J. B., Thompson J. F. H., 1996, Atlas of Alteration. A field and petrographic guide to hydrothermal alteration minerals: Canadá, Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, 120 p.

USGS, 2007, Digital Spectral Library (en línea): Estados Unidos de América, Clark, R.N., Swayze, G.A., Wise, R., Livo, E., Hoefen, T., Kokaly, R., Sutley, S.J., publicado 2007, disponible en: <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral-lib.html>, consultado el 03/05/2014.

Vandenberg G. S. (2003). Identification and Characterization of mining waste using Landsat Thematic Mapper imagery in Cherokee County, Kansas. National Meeting of the American

Society of Mining and Reclamation and The 9th Billings Land Reclamation Symposium, Billings, 1329-1347.

Warner, T. A. y Campagna D. J., 2009, Remote sensing with IDRISI Taiga: a beginner's guide; Hong Kong, Geocarto International Centre, 298 p.