



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DETERMINACIÓN DE ESTRUCTURAS
EN LA ZONA CONTINENTAL DE BAHÍA DE
BANDERAS, JAL.

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO GEOFÍSICO.
PRESENTA:

ANA LUZ CACCAVARI GARZA

ASESOR: DR. ROSA MA. PROL LEDESMA

MEXICO, D.F. 2007





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A mi mamá...

Agradecimientos

A CONACYT y DGAPA, agradezco el apoyo proporcionado

A la Dra. Rosa Ma. Prol Ledesma por el apoyo, interés y paciencia que me brindó para desarrollar esta tesis.

Al Dr. Tomás González Morán y el Ing. Nahum Pérez Campos, por el constante interés en este trabajo.

Al Ing. Enrique del Valle Toledo, Al Dr. Héctor Sandoval Ochoa, la Dra. Xyoli Pérez Campos, Dr. Mortera, y todos los maestros fueron parte de mi formación.

A Tania, Daisy, Irais, David.

Y aunque no participaron de manera directa en la elaboración de este trabajo, a modo de agradecimiento de vida, hago una mención de las personas que de un modo u otro forman parte de esto.

A GUADALUPE, mi mamá, por todo el amor, apoyo, ejemplo, confianza, en particular porque sin ella y nuestras charlas, seguro estaría en RI... por cada detalle en el que me muestra su amor...

A VA, la persona más cercana del mundo, la mejor hermana, un ejemplo de mujer, en las buenas y las malas, por torombola, por su ropa....

A CHÍA, ATETO, MIMI, CHUCHO...

A MI PAPA, JESSICA, FEDERICA, SHARON, aunque lejos, forman parte importante de mi vida.

A la otra Banda: PACA, MARTHITA, WENDY, ERICK.. y la NINA, no!

A los tíos Alfredo y Tere... A la Nonna Raquel... A Alcibiades Colín... Moris, Fon, Aurelio y Raff

A TZITZIL y FABIAN, para que no se peleen, dos personas claves en mi vida, por haber estado ahí, no muchas veces... siempre. Por esa confianza tan grande que a veces es más hacia ustedes que hacia mí, por conocerme tan bien. Por haber sido cómplices, confidentes, regañadores, muy regañadores y sobretodo bobisísimos.

A LO, mi otra hermana, por tener más tiempo en mi vida que fuera de ella... por la sal, la rabia, las frutas, la mesa mal lijada, la moto, las cenas, las flores aventadas... a tu mamá..

A LUMI, mi inseparable cordada de viajes, caminos, "técnicas", lodo, por esa confianza ciega... aunque eso implique caminar y caminar... que chido!!

A ALEJANDRO... yo creo que no! Por las mil listas de películas, canciones, tlayudas.. charlas de media noche.. por las historias de terror y el reggaeton, no.

A ROBERTO CARLOS, el hermano más hermoso, paciente, inteligente y asqueroso, por ese gran viaje, por enseñarnos que las cosas no son blancas o negras, verda, asque? A tus papas.

A JAQUELINE (P_ _ _ _ _) por ser tan (o más) ilusa que yo... por entender... por saber cambiar llantas...

Al RAGAZZO, Javier Castillo, por las aseguradas extremas, las charlas cargadas de verdad, y sobre todo por GIRAR!

A GUSAM, porque pese a todo y por todo, te hiciste cotidiano y fundamental.

A los amigos de la prepa...PALOLA, a PABLO y TREJO, a cual más?, a RICARDO por adorable, a BILO por el 0 y van 20? a TOÑO por insensible, a MARCO por chafa, a LUIS porque el cielo esta roto... o estrellado?, a la BULLANGA, KARINE, TAVO, RODRIGO, PILAR, VIRGINIA, PACO, ISAI, EDER, ALFREDO.

A PANCHO por aguantar a mi amiga, y a veces a mi!

A MARCO AURELIO por la luna.

A los montañistas, de donde salió el gusto por las piedritas, al MALO, CARLOS RANGEL, por sus muchas enseñanzas, ISRA, EI CUÑADO, ARMANDO, EL RURAL, SANTIAGO, BETO, OLIVER, ALVARO, PACO, MARCELO, HUMBERTO, el siempre VEZINO,...FERNANDO ROBLES, y los buzos... bueno: GABY!!

A los geosicos:

MILIO... LUIS, TAN, RICHARD, los grandes amigos de toda la carrera, viajes, desveladas, charlas y charlas, prácticas, olores, por ese vinculo tan fuerte con cada uno.

A GAMEZ, ZUL, DAISY, OMAR, PACO, PANTER, ESME, ELSA, LIZ, MANOLO, ITZA, JUAN, NACHO, DANIEL, JUAN RAMON, ANA ROMERO "la mala", MANDRAKE, BONOME, PAHO, ERICK, por tanto y tanto estudio....

A XOCHI! Por los Ehh!! y Antiehh!!, porque cada 21 de septiembre sea distinto...y mejor.

A GERARDO y ESTEBAN, porque el trabajo y aprendizaje fue ligado a muchos buenos momentos y una buena amistad.

A JAVIER... Hola!, TAMA... Hooy, OSCAR, MARIA; JUAN CARLOS, GIKO, AVISPON... a PEPE sólo un gran ZUMBIDO!!

A la SAIMMMM, ABI-online, ADRIAN, JON por popoca y las bicis, BETO, PRIS, ROSA, a DAVIDEA por su seriedad ante la vida, el grabadorsikan, y el vickvaporub cuando tanto lo necesitaba.

Al Nacotour y demás físicos, por estar (no crear) ese momento crucial... por el coto, JULIO.... ISABEL por Utrecht, La MORENA hasta Chokolandia Huelva Town, HECTOR, los conciertos, cenas, PONY, OUCHHHH!! ROBERTO, CHAMIN.... Con mucho cariño a ALLAN y CINTH!!! (también por el mensaje).

A ABRAHAM, a pesar del desfase, porque lo pidió (y como lo nombró existe, no?) Dhu!! (ya lo sabe.. las peras azules cuadradas de media noche que no ven). Ah! Y por su silencio. Al CHIPI por el DHU!! y todo lo que eso implica, las empanadas y los 20's, a RODRIGO de tanto tiempo, a DALI por esos pulques y charlas...

A URSU, por tanta pila, porque hay más che que chi, no?...

A MEMO, AARON, FANNY, TAF, LILA, a ALFREDO, el elegido, por Anavision, la UNAM, las mineras... A SALO, tante grazie per tuttoooo, caro ragazzo.

A JACOBO!! Aunque no lo pidió, por esa gran amistad de tanto tiempo ya, por la tan apreciada cercanía actual. Por mi regreso a la roca. Porque merecemos ser llevados a nuestras casas.

Al CHIMP, por ser esa pausa en mi vida...y bueno, también por rojo y morado, serpentinas desenrolladas con flaming lips, zongolalalas, gatos negros y blancos, caciopeas robadas, P, mapas chilenos, tacatacas, trenes sin sueño... o con?, saltos! Fotos sin gente...por ser tan importante y significativo en mi vida... Arcos siempre, no?

<u>Capítulo 1. Introducción</u>	5
<u>Capítulo 2. Caracterización de la zona</u>	7
2.1 Geología.....	7
2.2 Geotectónica de la zona de estudio.....	8
1.2.1 Zona de Subducción de Jalisco.....	10
1.2.2 Placa de Rivera.....	11
<u>Capítulo 3. Bloque Jalisco</u>	13
3.1 Cinturón Volcánico Mexicano.....	13
3.2 Bloque Jalisco.....	14
3.3 Limite SE – Rifts de Colima y Chapala.....	16
3.4 Límite norte – rift Zacoalco.....	17
3.5 Graben Puerto Vallarta.....	20
3.6 Edad del Sistema.....	22
3.7 Movimiento del Bloque Jalisco y evolución de la Geotectónica del Occidente de México.....	23
<u>Capítulo 4. Percepción Remota</u>	24
4.1 Introducción.....	24
4.2 Percepción Remota.....	24
4.3 Orígenes.....	26
4.4 Datos; Espectro electromagnético.	27
4.5 Procesamiento de imágenes.....	30
4.5.1 Adquisición de datos.....	30
4.5.2 Datos.	31
4.6 Sensores.	31
4.7 Plataformas.....	33

4.8 Sistemas de Sensores Landsat TM.....	34
<u>Capítulo 5. Procesamiento</u>	39
5.1 Realce	39
5.2 Realce de contraste.....	40
5.2.1 Stretch lineal.....	41
5.2.2 Ecuación.....	42
5.2.3 Stretch con saturación.....	42
5.3 Realce espectral.....	44
5.3.1 Cociente de bandas	44
5.3.2 Componentes Principales.....	44
5.4 Realce espacial	52
5.4.1 Filtros de realce	54
5.4.1.1 Filtros Pasa-altas.....	54
5.4.2 Filtros suavizadores.....	56
5.4.2.1 Filtros Pasa-bajas.....	56
5.4.2.2 Filtro Media.....	58
5.4.2.3 Filtro Mediana.....	59
5.4.3 Filtros para detección de bordes.....	60
5.4.3.1 Derivada de primer orden.....	60
-Operador Sobel.....	61
-Operador de Roberts.....	63
5.4.3.1 Derivada de segundo orden.....	63
5.5 Diagrama de Rosas.....	64
<u>Capítulo 6. Resultados</u>	66

6.1 Imagen.....	66
6.2 Modelo digital.....	69
<i><u>Capítulo 7. Discusión de resultados</u></i>	70
<i><u>Conclusiones</u></i>	72
<i><u>Bibliografía</u></i>	73

Resumen

La costa occidental de México, debido a su funcionamiento como zona de subducción, esta caracterizada por una intensa actividad tectónica y sísmica. Existen gran cantidad de estudios enfocados en analizar su evolución tectónica. En este trabajo se realiza una revisión general de las condiciones presentes, para posteriormente mediante el analisis de imágenes satelitales realizar una hipotesis sobre el origen y significado de las estructuras presentes en el area. La zona de estudio se encuentra ubicada en ls estados de Nayarit y Jalisco, en los dominios de la Sierra Madre Occidental y el Cinturon Volcanico Mexicano, corresponde, tectonicamente hablando a la parte continental del Bloque Jalisco, uno de los pequeños bloques tectonicos que se encuentran en los limites entre la Placa Norteamerica y las Placas Rivera, Pacifico y Cocos, a lo largo de la Trinchera Mesoamericana.

Se cuenta con imágenes satelitales del sensor Landsat TM, que nos permiten cubrir un area de 30 x 30 Km, realizando asi un estudio regional de Bahia de Banderas, así como con el Modelo Digital del Terreno. Tanto la imagen como el modelo digital fueron sometidas a diversas tecnicas de procesamiento que nos permitieron realzar los lineamientos presentes para posteriormente realizar un analisis de los mismos.

Capítulo 1

Introducción

La presencia de rasgos tectónicos relacionados con vulcanismo basáltico fisural en la zona continental de Bahía de Banderas podría tener implicaciones muy importantes en la historia tectónica de la región. La primera sería la posibilidad de que existiera otra microplaca en la costa del Pacífico de México con bordes en Las Islas Marías, el Bloque Jalisco y la placa de Norte-América.

El interés de estudiar esta zona se ve reflejado en diversos estudios (Álvarez, 2002; Núñez-Cornú et al., 2002) que discuten la evolución tectónica que ha generado la formación de Bahía de Banderas y su relación con la tectónica regional. Núñez-Cornú et al. (2002) estudia la sismología de esta zona e identifica la complejidad de los esfuerzos presentes en la Bahía.

Desde hace tiempo (Johnson Y Harrison, 1990), se ha manejado la hipótesis de que la formación de la Bahía está generada por extensión tectónica y que se puede tratar de la continuación hacia el océano de alguno de los grábenes que se han identificado en el continente. El graben cuya existencia se propone en la Bahía de Banderas estaría relacionado con una rama del graben Tepic-Zacoalco, que es considerado como uno de los bordes del Bloque Jalisco. Reconocimientos de campo, identifican flujos de basalto en la parte costera de esta zona, relacionados con erupciones fisurales que siguen la dirección de las principales estructuras (Prol-Ledesma et al., 2003). Estos flujos basálticos deben ser muy recientes por su posición estratigráfica, aunque no es posible datarlos radiométricamente porque se encuentran muy alterados. Además, en exploración submarina de ventilas en la parte norte de Bahía de Banderas, se observó que los flujos basálticos se prolongan hacia el fondo marino donde afloran más allá de 500m de la costa (Prol-Ledesma et al., 2002 y 2003). Por esta razón, es importante tratar de determinar la presencia de las principales estructuras en el área y también establecer su afinidad con un régimen tectónico.

La existencia de una micro-placa se ha propuesto en diversos trabajos; por ejemplo, Núñez-Cornú et al. (2002) proponen la existencia del Bloque de las Islas Marías; ya que, de acuerdo a la sismicidad observada en Bahía de Banderas y las regiones aledañas, el "Borde Banderas" podría ser el límite de la placa Rivera, o bien la continuación de alguno de los grábenes de la zona de Punta Mita que tienen rasgos topográficos notables (Fig. 1.1).

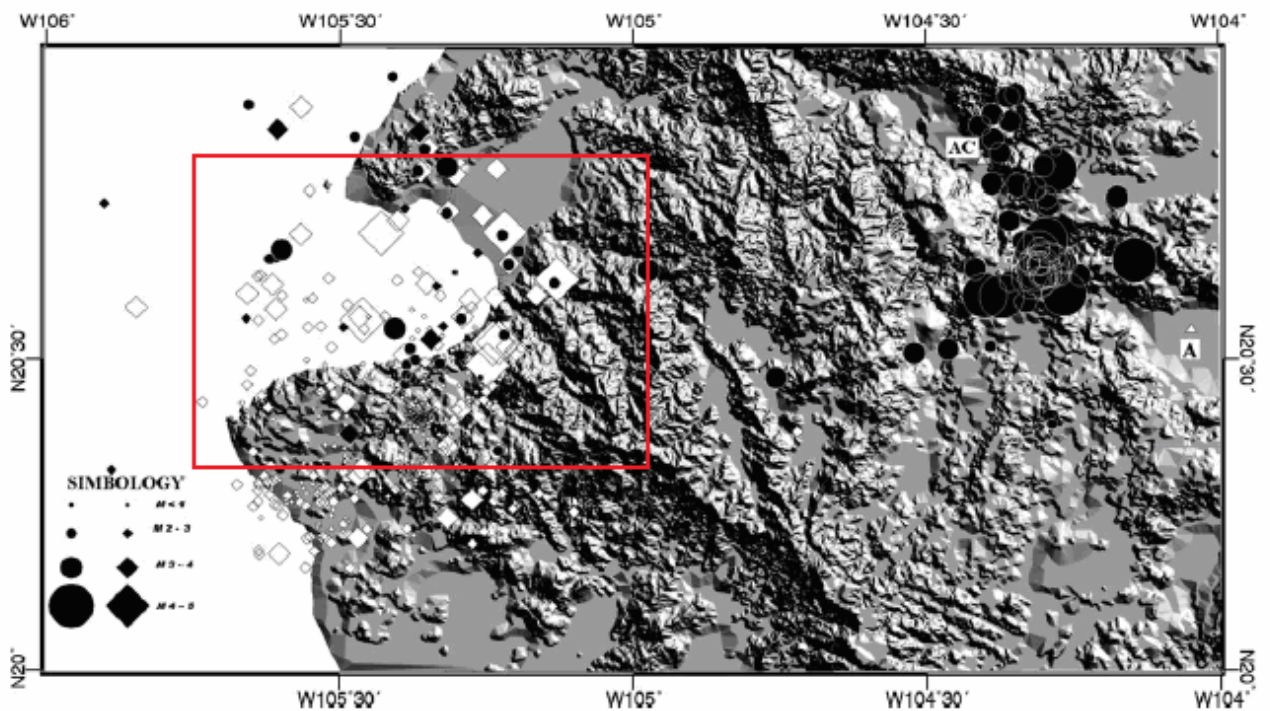


Fig. 1.1.- Modelo digital del terreno y sismicidad de la zona de Bahía de Banderas (tomado de Núñez-Cornú et al., 2002)

El objetivo de esta tesis es la utilización de imágenes de satélite y modelos digitales de elevación para definir los lineamientos presentes en las costas que bordean la Bahía de Banderas y contribuir al conocimiento de las tendencias estructurales predominantes en esa zona. La comparación con las direcciones predominantes observadas en las zonas aledañas pueden ayudar a identificar la presencia de áreas con diferente evolución tectónica.

Capítulo 2

Caracterización de la zona

2.1 Geología

La costa occidental de México se encuentra asociada con actividad tanto tectónica como volcánica, dando como resultado diferentes litologías asociadas a cada uno de estos procesos. La zona de este estudio está ubicada en la parte continental de Bahía de Banderas, que está localizada al norte del estado de Jalisco y en la zona sur del estado de Nayarit; en la costa occidental de México, cubriendo el sector oeste del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM). En esta área, el CVM separa dos dominios principales: la Sierra Madre Occidental (SMO) al noreste y el Bloque Jalisco al suroeste (*Ferrari et al, 1994*).

El CVM está formado en su mayoría por conos cineríticos basálticos y volcanes escudo, estratovolcanes andesíticos a dacíticos y domos dacíticos a riolíticos. La mayoría de estos con edades radiométricas Plio Cuaternarias (*Ferrari et al, 1994*). En la parte oeste, el CVM presenta volcanismo del cenozoico asociado a la subducción. La transición de rocas volcánicas silíceas en la SMO a rocas volcánicas más máficas ocurre de manera simultánea a la reorganización de la placa causada por la extensión del Golfo de California (*Ferrari et al, 2000*). Mientras que las rocas basálticas son resultado de procesos extensivos más recientes (*Ferrari et al, 1994*). Las rocas basálticas del CVM dominan esta región.

En el dominio de la SMO, argilitas y limolitas están intrusionadas por granitos del Oligoceno tardío. Estas rocas están expuestas en diversos afloramientos a lo largo de la parte baja del Río Grande de Santiago. De cualquier modo, la mayor parte de la zona, está cubierta por ignimbritas y andesitas que pertenecen a la secuencia volcánica de la SMO y que tiene por los menos 1,000 m de espesor a lo largo del Río Grande de Santiago (*Ferrari et al., 1994*).

La zona Norte es una provincia volcánica, donde se encuentra rocas de diferentes edades: 38-35 Ma, 31-26 Ma y 23 Ma (*Demant et al., 1989*). En la zona continental contigua a Bahía de Banderas, las ignimbritas de la Sierra Madre Occidental cubren un lapso de tiempo entre los 35 y 19 Ma, en la zona Este de la ciudad de Tepic (*Damon et al., 1979*), y de 24 a 17 Ma en el área de la

Presa de Santa Rosa (*Nieto et al., 1985*). En la zona norte de Tepic y de Guadalajara las ignimbritas de la Sierra Madre Occidental están cubiertas por basaltos e ignimbritas del Mioceno tardío y de entre 24 y 17 Ma en el área de la Presa de Santa Rosa (*Nieto et al., 1985*). Las ignimbritas de la Sierra Madre Occidental se encuentran también cubiertas por una secuencia de riolitas e ignimbritas, del Mioceno tardío, al sur del Río Grande de Santiago, entre Santa María del Oro y Plan de Barranca.

Por otra parte, el dominio correspondiente al Bloque Jalisco presenta dos diferentes zonas litológicas en su superficie: el Cinturón Plutónico costero del Cretácico tardío- Paleozoico y una zona de flujos de ceniza silicificada del Cretácico al Cenozoico temprano hacia el noreste, las cuales han sido intrusionadas por numerosos basaltos Plio-Cuaternarios (*Bandy et al, 1999*).

El basamento del Bloque Jalisco consiste de rocas del pre-Terciario, tobas riolíticas, andesitas, depósitos volcanoclásticos y secuencias turbidíticas en granitoides plutónicos. Diques andesíticos y dioríticos del Terciario temprano se encuentran expuestos de manera local en la parte norte del Bloque Jalisco (*Gastil et al., 1979a*) mientras que en la costa, al norte de Punta Mita, se encuentran emplazados basaltos del Mioceno tardío (*Gastil et al., 1979a*). Lavas basálticas y lamprofíricas del Plio-Cuaternario cubren el basamento del Bloque Jalisco en la zona de San Sebastián y Mascota a lo largo de del valle de Río Atenguillo (*Wallace y Carmichael, 1989*).

Dataciones K-Ar realizadas en las ignimbritas expuestas en el Bloque Jalisco arrojan una edad de 114 Ma (*Gastil et al., 1979a*) y con la técnica de $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ de 80 Ma (*Wallace y Carmichael, 1989*). Mientras que el rango de edad de emplazamiento de los granitoides está entre 106 y 85 Ma. (*Zimmermann et al., 1988*). Esto sugiere que todas estas rocas son parte del mismo arco magmático del Cretácico tardío que se ha reconocido a lo largo de la zona de Guerrero (*Campa y Coney, 1983*) y no pertenecen al arco volcánico de la Sierra Madre Occidental.

El espesor de la corteza en la parte central del Bloque Jalisco ha sido determinada mediante el procesamiento de datos gravimétricos y corresponde a aproximadamente 40 Km. de espesor (*Bandy et al, 1999*).

2.2 Geotectónica de la zona de estudio

Diversos estudios geológicos y geofísicos del Occidente de México han identificado la ocurrencia de eventos tectónicos de gran magnitud, incluyendo sistemas de fracturación que delimitan los bloques tectónicos. (Urrutia-Fucugauchi y González-Morán, 2006). El proceso geológico dominante en esta región es la subducción de la Placa Rivera por debajo de la Placa Norteamericana

en la Zona de Subducción de Jalisco (ZSJ), controlando tanto la actividad sísmica y volcánica como las deformaciones tectónicas en el área (Bandy *et al*, 1999).

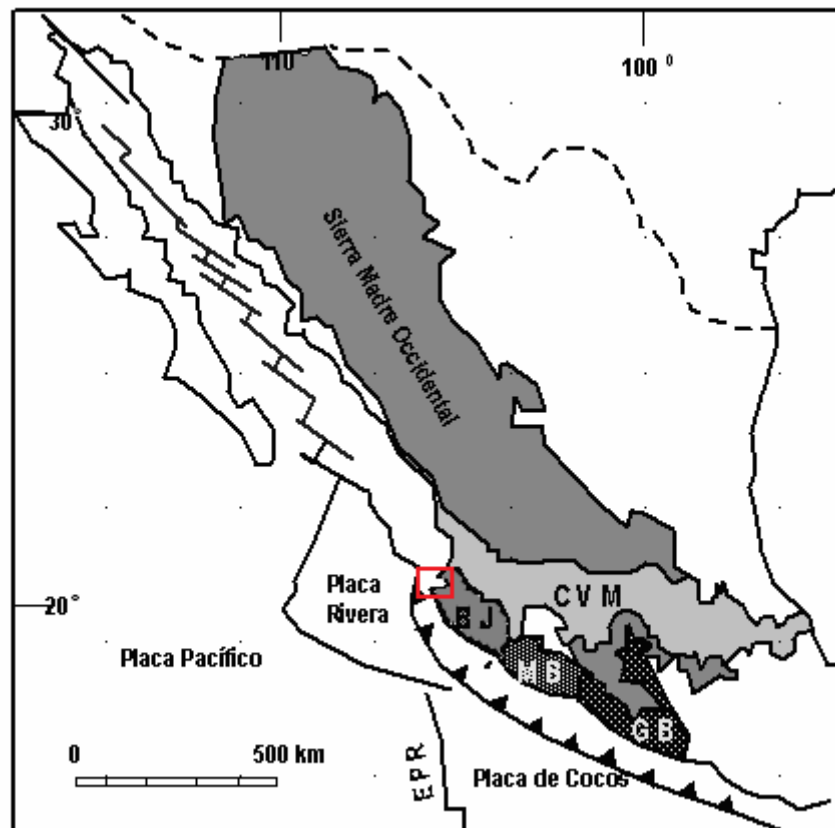


Fig. 2.1 Geotectónica del Occidente de México. BJ=Bloque Jalisco, MB=Bloque Michoacán, GB=Bloque Guerrero, CVM=Cinturón Volcánico Mexicano. Adaptada de Ferrari, 1995.

La situación actual de la Placa Rivera, sin embargo, no está totalmente definida ya que mientras que algunos autores consideran que el movimiento de la Placa Rivera se ha detenido, otros consideran que la Placa Rivera se encuentra actualmente subduciendo a la Placa Norteamericana, de manera completamente independiente a las Placas de Cocos y Pacífico por lo menos desde el Plioceno. Así mismo, el límite entre la Placas Rivera y la Placa de Cocos tampoco está bien definido y se sugiere que, contrario a lo que se esperaba, se trata de un límite divergente (Bandy, 1992). Por otra parte, la zona de Bahía de Banderas experimenta fuertes esfuerzos distensivos y el como resultado de la convergencia de la Placa Rivera hacia la Placa del Pacífico (Kostoglodov y Bandy, 1995).

La tectónica regional está caracterizada por un sistema de tres fallas extensionales: Graben Tepic-Zacoalco, Graben Chapala y Graben Colima (Allan *et al*, 1991) con orientación N-S, E-W y NW-SE (Ferrari *et al*, 1994). La parte continental definida por estas estructuras se conoce como

Bloque Jalisco. Un pequeño bloque que se considera se está separando de la Placa Norteamericana (*Allan et al, 1991*), y se acrecerá eventualmente a la Placa del Pacífico (*Ferrari et al, 1994*). Estudios aeromagnéticos realizados en esta zona ayudan a corroborar los límites de los cuerpos ígneos y para inferir los patrones estructurales, asumiendo que los límites entre la Sierra Madre Occidental y el Bloque Jalisco están marcados por diferencias considerables en los conjuntos ígneos. (*Urrutia-Fucugauchi y González-Morán, 2006*).

Como se mencionó, la costa occidental de México presenta gran actividad tectónica, a continuación se incluye una descripción esquemática del desarrollo tectónico de la región.

2.2.1 Placa Rivera

Uno de los principales elementos que afectan la tectónica del Bloque Jalisco es la Placa Rivera. Estas dos microplacas se encuentran separadas entre sí por la Trinchería Mesoamericana. Pese a que tanto los límites de la Placa Rivera, como su propia existencia, siempre han sido controversiales, se consideró como una microplaca que interactúa entre la Placa Norteamericana y la Placa del Pacífico, cuyos límites están definidos de la siguiente manera: la Fractura de Rivera al Sur, el East Pacific Rise al oeste, limitando con la Placa del Pacífico, la Fractura de Tamayo al norte y la Trinchería Mesoamericana al este, limitando con la Placa Norteamericana y con el Bloque Jalisco (*Atwater, 1970*).

Diversos estudios posteriores han intentado demostrar que la Placa Rivera se encuentra actualmente unida a la Placa Norteamericana y, por lo tanto, no tiene ningún movimiento con respecto a ésta (*Larson, 1972*), mientras que otros afirman que sí presenta todavía movimiento de la Placa Norteamericana (*Molnar, 1973*).

La evidencia más contundente de su movimiento independiente es la continuación de la Trinchería Mesoamericana y la sismicidad asociada a este movimiento a una latitud de 20 ° N, lo que parece ser un indicador de la subducción de la esquina sureste de la Placa Rivera por debajo de la Norteamericana. También se tienen como evidencia algunos mecanismos de deslizamiento encontrados para sismos a lo largo de la Fractura Tamayo, apoyando la teoría del movimiento lateral derecho de la Placa Rivera respecto a la Norteamericana (*Eissler et al, 1984*).

Otro cuestionamiento que aún no se ha resuelto es el referente al límite entre la Placa de Cocos y la Placa Rivera. Una posibilidad es la existencia de un punto cuádruple entre las placas Rivera, Cocos, Pacífico y Norteamérica, y con el East Pacific Rise, la Trinchería Mesoamericana y la

Fractura de Rivera uniéndose en un punto. Bajo estas circunstancias, no existiría un límite entre la Placa de Cocos y la Placa de Rivera (*Eissler et al, 1984*).

Sin embargo, diversos autores afirman que el punto donde se unen la Placa de Cocos con la Placa Rivera se encuentra de 70 a 100 Km al oeste de la Trinchera (*Sclater et al., 1971; Larson, 1972; Mammerickx, 1980; Mammerickx y Klitgord, 1982*). Esto implica que la Placa Rivera y la Placa de Cocos están en contacto a lo largo de la cordillera ("rise") y de la trinchera, y que existen dos puntos triples, muy cercanos uno de otro: el correspondiente a las Placas Pacífico-Rivera-Cocos y el correspondiente a Rivera-Cocos-Norteamérica (*Eissler et al, 1984*).

2.2.2 Zona de Subducción de Jalisco

La Zona de Subducción de Jalisco (ZSJ) es la parte de la Trinchera Mesoamericana ubicada más al norte en esta trinchera y está limitada por las Islas Tres Marías en el norte y el graben de Colima al sur. Debido a que la situación de la Placa Rivera no está totalmente definida, se considera también que la subducción a lo largo de la ZSJ produce actividad sísmica en esta área. Durante el siglo XX se presentaron tres grandes sismos, con magnitudes de 8.0, 7.6 y 8.0 grados en la escala de Richter (*Pacheco y Sykes, 1992*). Sin embargo, la actividad sísmica es baja comparada con la zona sur de la Trinchera, además de disminuir considerablemente hacia el norte de la parte sur de rift de Colima (*Eissler y McNally, 1984*).

La zona continental que se encuentra a un costado de la Zona de Subducción de Jalisco está constituida en su mayoría por el Bloque Jalisco. De manera regional se puede observar que el Bloque Jalisco está separándose de la Placa Norteamericana (*Luhr et al., 1985; Allan et al, 1991; Garduño y Tibaldi, 1991; Kostoglov y Bandy, 1995*).

Capítulo 3

Bloque Jalisco

El Bloque Jalisco ha sido definido como la zona entre la costa occidental de México y los bordes de los grábenes de Tepic-Zacoalco, Chapala y Colima (Fig. 3.1). La zona de estudio se ubica cubriendo el sector oeste del Bloque Jalisco, por lo cual es necesario hacer una descripción detallada de sus características geológicas.

3.1 Bloque Jalisco

El Bloque Jalisco es la parte continental en la porción centro-occidental de México que se encuentra delimitada por un sistema de tres grábenes:

- Tepic-Zacoalco al Noroeste
- Colima y Chapala al Este
- Trinchera Mesoamericana al Oeste

Cada una de las ramificaciones mencionadas corresponden a *rifts* activos independientes, determinados por lagunas y que tienen una longitud de aproximadamente 40 Km, con una orientación de 90, 140 y 10 respectivamente (*Michaud et al., 1990*). Estos, se unen para formar el punto triple de Jalisco ubicado a 50 Km al sureste de la ciudad de Guadalajara. Las rocas dominantes en el área de los tres grábenes son andesitas calcoalcalinas y rocas relacionadas, típicas de los arcos volcánicos de subducción (*Luhr et al., 1985*). En el graben Colima y graben de Tepic-Zacoalco magmas alcalinos han erupcionado contemporáneamente con magmas calcoalcalinos desde el Plioceno. Los magmas alcalinos son raros en zonas de subducción, pero frecuentes en zonas de fracturación (*rifting*) continental (*Carmichael et al. 1974*)

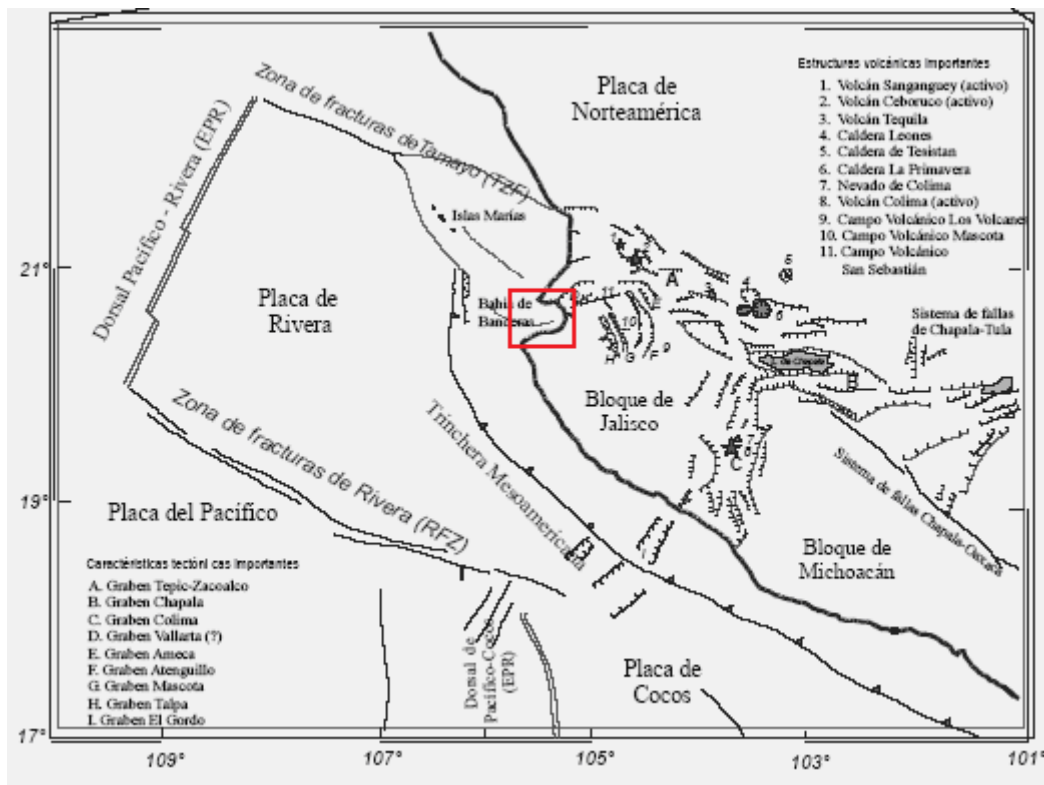


Fig. 3.1 Ambiente Geodinámico del occidente de México. Límites en tierra del Bloque Jalisco: SE, Graben Colima y Chapala; SW-W Trinchera Mesoamericana; Norte: Graben Tepic-Zacoalco. (Rutz, 2002)

Estudios geofísicos realizados en la zona oeste y centro de México también han demostrado que el Bloque Jalisco presenta un patrón diferente en las anomalías aeromagnéticas y gravimétricas (Rosas-Elguera *et al.*, 1996). El Bloque Jalisco se encuentra caracterizado por anomalías dipolares de altas frecuencias y amplitudes. Este patrón contrasta fuertemente con la respuesta aeromagnética de los bloques que se encuentran al este del graben Colima y al norte del graben Tepic-Zacoalco (Urrutia-Fucugauchi y González-Morán, 2006).

3.2 Cinturón Volcánico Mexicano

El Cinturón Volcánico Mexicano es un complejo arco continental relacionado con la subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Placa Norteamericana a lo largo de la Trinchera Mesoamericana. Se extiende desde el Mar de Cortés hasta el Golfo de México. Abarca una buena porción de la parte central de México y tiene numerosos volcanes. Se estima que la tasa de convergencia que presenta este proceso de subducción corresponde a 6 o 7 cm/año aproximadamente (Minster y Jordan, 1978).

El volcanismo que se presenta en la parte oeste del Cinturón Volcánico Mexicano se ve influenciado por el decrecimiento en la actividad, observado en la subducción asísmica de la Placa

Rivera (*Demant, 1978*). Hasta hace aproximadamente 2 M.a. una porción restante de la Placa Farallón se encontraba todavía subduciendo por debajo de la Placa Norteamericana (*Larson, 1972*). A partir de esta fecha, la Placa Rivera ha estado colisionando de manera gradual con la Placa Norteamericana; se estima que la velocidad con la que se mueve es de 2 cm/año (*Nixon, 1982*). El CVM presenta diversos volcanes cuaternarios en la parte oeste, que se asocian a tres estructuras extensionales que corresponden a los límites del Bloque Jalisco.

El CVM constituye unos de los arcos volcánicos más complejos y variados de la región circum-Pacífica. Entre sus rasgos peculiares se pueden citar: a) la gran variabilidad del estilo volcánico y composición química a lo largo del arco; b) la presencia de un volcanismo alcalino de tipo intraplaca (similar a los OIB-Ocean Island Basalt) que está espacialmente asociado al volcanismo dominante relacionado con la subducción; c) la oblicuidad de su parte central y oriental con la trinchera; y d) la notable variación del ancho del arco (*Ferrari, 2000*). El CVM se suele dividir en tres sectores: occidental, central y oriental, que presentan diferencias significativas en lo que respecta al tipo de volcanismo y su composición química (Fig. 3.2). En el sector occidental, limitado al este por el *rift* de Colima, el arco volcánico se sobrepone a la parte norte del bloque Jalisco y al límite meridional de la Sierra Madre Occidental. El volcanismo emplazado dentro del BJ es casi exclusivamente monogenético y de composición basáltico-andesítica.

Estudios recientes han demostrado que el volcanismo del CVM se caracteriza por pulsos de mayor intensidad separados por periodos de actividad reducida. El primer pulso tuvo lugar durante el Mioceno tardío (10-9 Ma) (*Ferrari et al, 1994*). Después, hace 8 Ma se presentó una disminución en la actividad volcánica. Durante el Plioceno inferior (5-3 Ma) el volcanismo se vuelve bimodal (*Rigther et al., 1995*). En la porción occidental, el inicio de este volcanismo pliocénico está marcado por el emplazamiento de basaltos calcoalcalinos entre Tepic y Guadalajara (*Moore et al., 1994*) en la parte norte del *rift* Colima (*Allan, 1986*). Un último pulso caracteriza el volcanismo de Plioceno tardío-Cuaternario, cuando la composición de los productos se vuelve otra vez intermedia-máfica (*Ferrari, 2000*).

3.3 Limite SE – Grábenes de Colima y Chapala

El Graben Colima (GC) es una estructura compleja y asimétrica, en la cual la distribución de bloques basculados no está muy marcada. Está caracterizado por las grandes profundidades que logra alcanzar (*Michaud et al, 1990*). Su espesor varía desde 20 hasta 70 Km. (*Luhr et al., 1985*). El

máximo relieve observado es de 1700 m, pero datos gravimétricos indican un desnivel vertical de 2.4 Km. (Allan, 1981). Se extiende hacia el sur de la zona de intersección a lo largo de unos 90 Km. y los lineamientos norte-sur continúan hacia la costa del Pacífico. Según dataciones *K-Ar* realizadas en esta zona su formación corresponde al Plioceno inferior (Garduño y Tibaldi, 1991),

El graben de Colima se divide en los dos siguientes sectores:

- el graben norte y central, con dirección norte-sur
- el sur del graben con orientación noreste-suroeste.

En la parte sur el sistema está limitado por el volcán llamado Nevado de Colima, del Pleistoceno, que se ubica en la fosa central. Al sur de este volcán, el *riff* desaparece. En esta región afloran una serie de plataformas plegadas del Cretácico. La prolongación meridional del *riff* de Colima es una zona de deformación difusa formada por fallas normales (Michaud et al., 1990). La continuación del sur del Graben de Colima y situado al otro lado de la Trinchera Mesoamericana es el Graben de El Gordo. El *riff* Colima ha presentado actividad tectónica recientemente debida a una falla normal con dirección NE-SW, manifestada en un sismo de magnitud 5.2, presentado en Marzo del año 2000. (Pacheco et al., 2000). La región norte del *riff* está cubierta por sedimentos, correspondientes a playa de lago (Luhr et al., 1985).

Graben Chapala

El Graben Chapala (GCh) es una estructura asimétrica EW que se encuentra constituida de tres bloques principales. Los dos bloques ubicados en la zona septentrional basculan hacia el Norte, aproximadamente de 5 a 10°, y el bloque restante hacia el sur, presentando poca inclinación. Se extiende 90 km hacia el oriente del punto triple, donde se ensancha y muestra una transición de fallamiento en bloque a fallamiento en escalón con orientación noreste-este de fallas transformantes (Luhr et al., 1985). Este eje corresponde a una zona activa que puede ser considerada como el límite norte del Bloque Michoacán (Barrier et al, 1990).

3.4 Límite norte-noroeste – Graben Tepic-Zacoalco

Aunque aún no se encuentra establecido, el graben Tepic-Zacoalco es considerado por diversos autores como el límite norte del Bloque Jalisco (Barrier et al, 1990). Se extiende hacia el

Noroeste, a 50 Km del punto triple de Jalisco, y eventualmente se une a la parte noroeste de Cinturón Volcánico Mexicano. Está caracterizado por una fuerte asimetría y la presencia de bloques de alrededor de 1 Km de largo. Este lineamiento volcánico se extiende alrededor de 180 km. Se menciona la existencia de una estructura de graben con orientación noroeste y la evidencia de fallas transformantes lateral-derecha con orientación paralela al azimut de las fallas transformantes del golfo de California (*Gastil et al., 1978*). Se puede mencionar también que el graben con orientación NO-SE muestra fallas lateral-izquierdas del Mioceno-Plioceno inferior, seguido de un fallamiento lateral-derecho en el Plioceno superior-Cuaternario. (*Garduño y Tibaldi, 1991*)

La existencia de este graben está claramente marcada por la perfecta alineación NW-SE de volcanes activos, desde Guadalajara al SE hasta Tepic al NW (Fig. 3.3). En la parte noroeste del graben se conoce la existencia de seis volcanes de composición calcoalcalina, que presentan también una orientación hacia el noroeste. Toda esta región está cubierta de material volcánico reciente. (*Barrier et al., 1990*), el más joven de los volcanes de esta zona erupcionó hace menos de mil años, y se sabe que han venido erupcionando desde el Pleistoceno (*Gastil et al. 1979*).

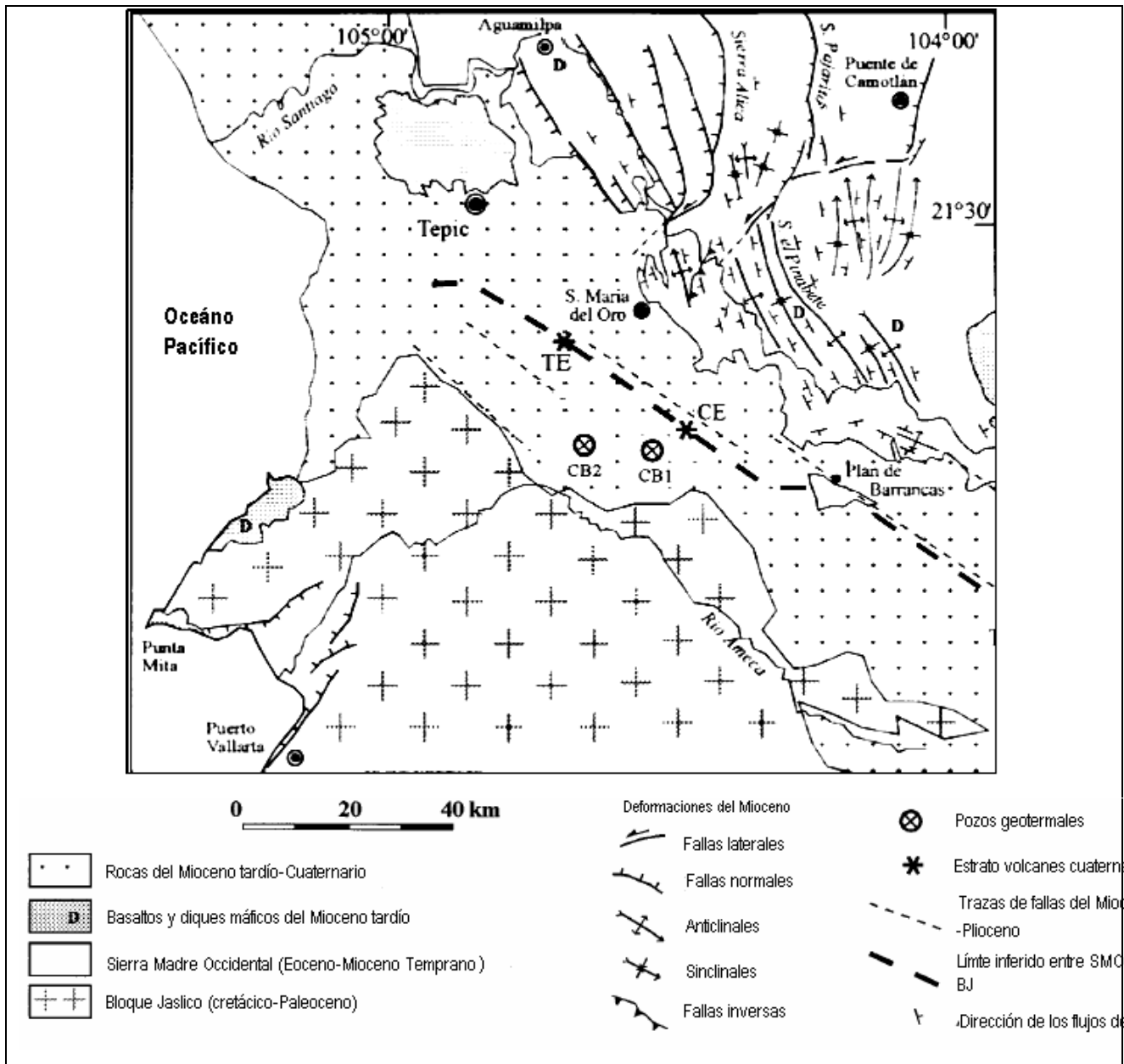


Fig. 3.3 Esquema geológico que muestra las principales estructuras del Mioceno. JB. Bloque Jalisco, TE. Tepetitlic, CE. Ceboruco, TQ Tequila (estratovolcanes). PR Caldera La primavera. (Ferrari,1995)

Durante la mitad del Mioceno tardío, la estructura se reactivó debido a un corte tectónico relacionado con el inicio de la abertura del Golfo de California (Ferrari, 1995), que fue remplazada, desde el final del Mioceno por la extensión responsable de la formación del graben Tepic-Zacoalco.

El graben Tepic-Zacoalco está compuesto por numerosos sistemas de fallas, que se pueden agrupar en dos ramas principales:

Rama Norte. Esta rama está formada por dos cuencas escalonadas, con inclinación de 125° en promedio. La primera de estas cuencas es el Graben Ceboruco que tiene una profundidad de

2700 m, compuesto por una depresión asimétrica desarrollada en dos etapas: el Mioceno tardío y el Plioceno temprano. La segunda cuenca es el graben de Barrancas-Santa Rosa, que tiene 70 km de largo y 20 km de ancho, con aproximadamente 550 m de desplazamiento vertical que tuvo lugar durante el Plioceno. En los límites entre estas dos cuencas o depresiones se presentan movimientos de deslizamiento. En la parte sureste del graben Plan de Barrancas-Santa Rosa se encuentran rocas del Cuaternario, que se ven afectadas por pequeñas fallas (*Rosas-Elguera et al., 1996*).

Rama Sur. Esta rama consiste de tres medios grábenes con una tendencia de 125°, se localiza dentro del Bloque Jalisco y es paralela a la rama norte del rift Tepic (*Rosas-Elguera et al., 1996*). Las paredes de los medios grábenes son de rocas graníticas del Cretácico (*Schaaf et al., 1995*), las cuales son cortadas por las fallas normales de deslizamiento sureste. El medio graben de Amatlán de Cañas corresponde al Plioceno y Cuaternario y está formado por volcanes alcalinos y calcoalcalinos (*Richter y Carmichael, 1992*) que están encima de un conglomerado granítico con un espesor de 100 m. Esto indica que en el Plioceno temprano la mayor parte de la cuenca ya se había desarrollado. La depresión situada más al este es el medio graben Zacoalco, que está formado por fallas de deslizamiento con dirección sur-suroeste con un desplazamiento vertical mínimo de 1400 m. Se sugiere el graben del Río Ameca, como una ramificación secundaria del Graben Tepic-Zacoalco (*Johnson y Harrison, 1990*)

Esta ramificación tiene una orientación oeste-suroeste a lo largo de 90 km hasta llegar a la costa, en Bahía de Banderas, cerca de Puerto Vallarta (Fig. 3.4). Tiene un ancho de 20 a 30 km. Las fallas en los márgenes del graben del Río Ameca se extienden hacia el oeste y suroeste, formando las costas norte y sur de Bahía de Banderas. La dirección dominante de estas fallas es WSW-ENE, paralelas a la dirección del propio graben. A excepción de un flujo de lava localizado al norte de Vallarta, la extensión del Río Ameca no presenta volcanismo reciente; sin embargo, se ha observado que existe actividad hidrotermal reciente (*Núñez-Cornú et al., 2000*).

Se explica la existencia del graben del Río Ameca como un límite extensional entre el bloque de Jalisco y un pequeño territorio continental, que podría llegar a formar parte de la placa de Rivera. La formación de depresiones que se presentan en el graben pueden ser explicadas mediante el movimiento SW del Bloque Jalisco (*Urrutia-Fucugauchi y González-Morán, 2006*). Por último, la dirección del graben es aproximadamente perpendicular a la dirección de subducción de la Placa de Rivera bajo el Bloque de Jalisco (*Johnson y Harrison, 1990*).

Los estudios aeromagnéticos realizados sobre el Graben Tepic-Zacoalco y las zonas adyacentes a una altitud de 300 m. s muestran que las anomalías están dominadas por altas frecuencias y grandes amplitudes, que en general está correlacionada con los lineamientos que presentan los volcanes (Urrutia-Fucugauchi y González-Morán, 2006).

3.5 Graben Puerto Vallarta.

Una parte del Bloque Jalisco está compuesta por el Batolito Vallarta, emplazado en el Cretácico tardío, aproximadamente hace 100 a 75 M.a. (*Schaaf et al., 1995*); la parte norte del Bloque Jalisco corresponde a una sucesión volcánica de eoceno al Mioceno temprano de la Sierra Madre Occidental; y la parte este es una sucesión del Bloque Michoacán con edades que van del Triásico al Terciario temprano.

El Batolito de Puerto Vallarta es isotópica y geoquímicamente diferente de los intrusivos del Cretácico tardío al terciario que se encuentran expuestos en el Bloque Michoacán (*Rosas-Elguera et al., 1996*). El Batolito de Puerto Vallarta se encuentra expuesto a una elevación de 1000 a 2500 m, indicando que se ha llevado a cabo una elevación sustancial desde su emplazamiento (*Rosas-Elguera et al., 1996*). La ausencia de tobas de cenizas volcánicas de la Sierra Madre Occidental dentro de la sucesión estratigráfica del Bloque Jalisco (*Ferrari et al., 1994*) y la presencia de los restos de un conglomerado de los inicios del Mioceno tardío sobre el Batolito de Puerto Vallarta en el interior de la Trinchera de Manzanillo (*Michaud et al., 1995*) son indicadores de que la mayor parte del levantamiento ocurrió en el Paleogeno (*Rosas-Elguera et al., 1996*).

Mediante la perforación de pozos geotérmicos a lo largo del rift Tepic-Zacoalco se encontraron rocas plutónicas correlacionadas con el Batolito Puerto Vallarta a una profundidad de 1.1 a 1.8 Km por debajo del nivel del mar (*Ferrari et al., 1994*). Mientras que pozos petroleros que se perforaron a una profundidad de 4 Km al sur de la Ciudad de Colima no encontraron rocas plutónicas (*Grajales-Nishimura y López-Infanzón, 1983*). Esto sugiere que los límites del Bloque Jalisco se desarrollaron como una consecuencia del levantamiento del Batolito Puerto Vallarta (*Rosas-Elguera et al., 1996*).

El Graben Puerto Vallarta está formado por sistemas de fallas principales con ángulos de 35-45° y un complejo plutónico con una edad de 85 M.a. (*Zimmermann et al., 1988*). En la parte este del graben se presentan otras fallas con inclinación de 70° (Fig. 3.5). Algunos estudios de microtectónica realizados en el granito encontrado cerca del límite NW de la falla mencionada, muestran extensión

oblicua a 20°, esta misma extensión se presentó en una ignimbrita no datada en la zona noreste del graben. La extensión en esta dirección no es la responsable de la mayor parte de la depresión y está más bien relacionada con la subsecuente reactivación.

Un conglomerado fluvial pobremente consolidado en la parte SE del graben se encuentra también afectado por fallas normales con pendiente de 30 a 40° y con una caída vertical de 50 m. Únicamente se ha encontrado un plano de falla estriado con una inclinación de 60 ° hacia el Oeste (*Ferrari et al., 1994*).

Los estudios aeromagnéticos realizados en la zona norte de Bahía de Banderas muestran que el patrón NE-SW que presenta tanto el graben Ameca como el graben de Bahía de Banderas o Graben Vallarta no es consistente con el patrón de movimiento del Bloque Jalisco (Urrutia-Fucugauchi y González-Morán, 2006). Por el contrario este patrón de movimiento se encuentra más correlacionado con el patrón extensional del Plioceno y Cuaternario (Rosas-Elguera et al., 1996, Ferrari, 1995).

No hay dataciones absolutas que delimiten la edad de formación de Graben Puerto Vallarta. No obstante, la edad y similitudes isotópicas entre los batolitos de Los Cabos y el de Puerto Vallarta son indicadores de que la punta de Baja California estuvo localizada a lo largo de la costa norte de Punta Mita antes de su separación de la península (*Bohnel et al., 1992*).

Desde que el Graben Puerto Vallarta se igualó a los agrietados bordes de estos batolitos, se piensa que se desarrolló durante la separación final de Baja California de la Placa Norteamericana, durante el Mioceno tardío y el Plioceno temprano (*Stock y Hodges, 1989*). De cualquier modo, el fallamiento del conglomerado requiere que el tectonismo continúe activo (*Ferrari et al., 1994*).

3.6 Edad del Sistema

Existen diversas interpretaciones de las edades de los grábenes. *Díaz y Mooser (1992)* sugieren que el fallamiento empezó en el Graben Chapala y la parte norte del Graben Colima, durante el Plioceno; esto se puede observar en la edad del magmatismo alcalino.

Gastil (1978) notó que bloques en dirección noroeste y segmentos del CVM, cortan estratos anteriores al Plioceno, con lo que se piensa que la actividad tectónica extensional se inició durante el Plioceno (*Luhr, 1985*).

El sistema activo de *riffs* del punto triple de Jalisco está superpuesto a un sistema extensivo anterior de bloques basculados (Mio-Plioceno). La posible frontera NW del Bloque Jalisco está

ubicada en una serie de depresiones de alrededor de 200 Km., de largo y continúa como el Graben Tepic-Chapala (*Luhr et al., 1985*). Esta región está caracterizada por la existencia de numerosos fosas del Neogeno orientadas WNW-ESE. Las mejor conservadas son las fosas de Ameca y de Amatlán, alineadas al Sur del *riff* activo. Están rodeadas al NE por grandes fallas normales inactivas. Estas fosas se han rellenado de sedimentos continentales (conglomerados, diatomitas y sedimentos calcáreos lacustres) y derrames volcánicos del Plioceno (*Michaud et al., 1990*).

Estas series son afectadas por fallas normales, que ponen en evidencia una fase distensiva NNE-SSW del Mioceno superior al Plioceno. Estas mismas estructuras se encuentran más hacia el Este, al sur del lago Chapala, donde se encuentran cortadas por el sistema reciente y en ocasiones se observan reactivadas como las fallas del borde de la fosa de Cotija (*Michaud et al., 1990*). Fallas jóvenes en el Graben Colima indican que el tectonismo extensional está activo (*Allan et Carmichael, 1984*).

3.7 Movimiento del Bloque Jalisco y Evolución de la geotectónica del Occidente de México

Bloque de Jalisco-Bloque de Michoacán. Se asume que el movimiento relativo entre los bloques de Jalisco y Michoacán tiene una dirección que es perpendicular a la del graben de Colima con azimut de N100°E y una velocidad de 8 mm/año, (*Johnson y Harrison, 1990*)

Bloque de Jalisco-Norteamérica. De acuerdo a *Johnson y Harrison, (1990)*, la dirección del movimiento entre el bloque de Jalisco y la placa de Norteamérica es perpendicular a la dirección del graben de Tepic-Zacoalco con un azimut de N40°O y velocidad relativa de 7 mm/año. Este movimiento de extensión está de acuerdo con los trabajos realizados por *Nieto-Obregón et al. (1985)*. En cambio, según otros estudios (*Gastil et al., 1978 y Garduño y Tibaldi, 1991*), el movimiento dominante actualmente en el graben de Tepic-Zacoalco es de transformación lateral-derecha.

El movimiento del Bloque Jalisco es complejo, según los extensiones que se pueden observar en los grabenes Ameca, de Bahía de Banderas y Colima. Existen diversos patrones de estructuras oblicuas en el graben Tepic-Zacoalco y en el graben Ameca muestran que el movimiento del Bloque ha seguido diversos patrones cinematicos (*Urrutia-Fucugauchi y González-Morán, 2006*). Existen diversos patrones propuestos por diferentes autores; el más aceptado es de Ferrari 1995 que

presenta un fallamiento lateral izquierdo, con movimiento ESE hace 12-14 millones de años, lo que fue precedido por un movimiento de fallamiento lateral derecho y movimiento WNW hace 12-9 ma.

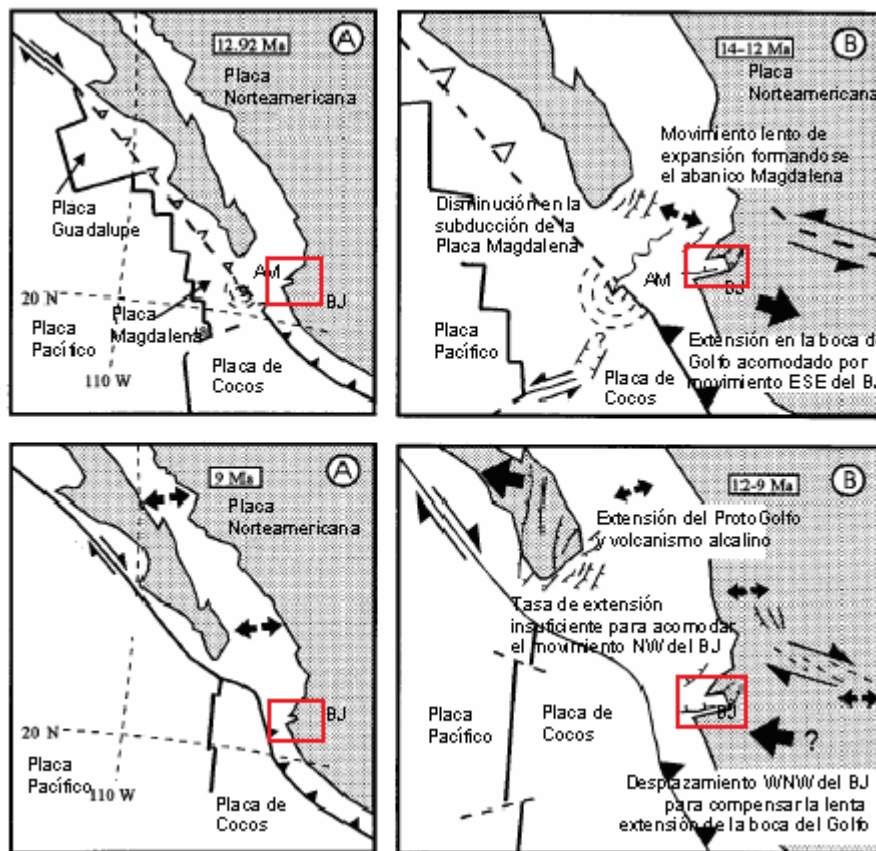


Fig. 2.2 Arreglo geodinámico hace 12.92 Ma (Stock and Lee, 1994) y hace 9 Ma. (Lonsdale, 1989) AM= Abanico Magdalena, BJ=Bloque Jalisco. B. Interpretación propuesta para la reorganización de la boca del golfo, en los periodos de 14-12 Ma y de 12-9 Ma. (Ferrari, 1995)

Evolución

Los graben en el oeste del Cinturón Neovolcánico Mexicano son una manifestación de la reorganización de límite de placas en la cuenca del océano Pacífico (Demant, 1978).

Diversos estudios han discutido las evidencias de la formación de la dorsal del Pacífico Oriental, que tuvo lugar durante los últimos 12 millones de años. Luhr et al. (1985) sugieren que el segmento de la dorsal del Pacífico Oriental, limitado por las fracturas de Rivera y Tamayo, se está desplazando hacia el Este con un salto de 550 km, lo que implica llegar hasta el graben de Colima. Si este proceso se completa, la subducción de la placa de Rivera bajo la Norteamericana cesará, el graben de Colima evolucionará como una dorsal, el segmento noroeste del eje volcánico se

convertirá en una falla transformante lateral derecha y el graben de Chapala se considerará como un brazo abortado o no evolucionado del punto triple (*Luhr y Carmicheal, 1981*). La parte de la Placa Norteamericana que se encuentra al occidente del graben de Colima, el bloque de Jalisco, formará parte de la placa de Rivera, separándose de tierra firme con una orientación noroeste. *Garduño y Tibaldi (1991)* afirman que el Bloque Jalisco tiene un movimiento hacia el oeste-noroeste con respecto al eje Neovolcánico, siguiendo la misma trayectoria que la península de Baja California.

Capítulo 4

Percepción remota

4.1 Introducción

Debido a que no siempre nos resulta posible estar en contacto directo con nuestro objeto de estudio, o a que en algunas ocasiones se busca estudiar superficies muy extensas, no siempre se puede recurrir a los métodos de exploración que se aplican directamente en campo, por lo que recurrimos al uso de la percepción remota. Esta técnica consiste, de manera general, en la obtención de información de un objeto sin estar en contacto físico con él. Esto es, que mediante el uso de sensores podemos recabar datos sobre nuestro objeto, fenómeno o superficie de interés para poder procesar estos datos y analizarlos. La percepción remota puede referirse a cualquier proceso en el que ocurra esto, como es el caso de la lectura, que consiste en, mediante la vista, percibir las letras o caracteres que tenemos en el texto y, posteriormente, analizar el sentido que estas tienen. Otro ejemplo cotidiano de lo que puede ser entendido como percepción remota es la fotografía, en donde la cámara funciona como sensor que obtiene información del objeto (persona o paisaje) fotografiado.

Sin embargo, el término de percepción remota se aplica de manera más específica, ya que este método se dedica a obtener información de la superficie terrestre mediante el análisis de los valores de reflectancia del objeto en estudio. Para analizar la reflectancia de la superficie terrestre con sensores pasivos, se utiliza como fuente el sol, así que la radiación electromagnética emitida por el sol y afectada de alguna forma por la atmósfera es captada por los sensores diseñados para detectarla y analizada para estudiar los materiales superficiales en la Tierra.

4.2 Percepción remota

La Percepción Remota es, en términos generales, una rama de la Geofísica que nos permite obtener información de un objeto, área o fenómeno sin estar en contacto físico con él, mediante el análisis de datos adquiridos con sensores o algunos otros dispositivos mediante el estudio de la radiación electromagnética que emite el objeto de estudio.

Dos procesos básicos se involucran en la percepción remota: la adquisición y el análisis de datos, en los que se pueden considerar los siguientes elementos (Fig.4.1)

- a) Fuentes de energía
- b) Propagación de energía a través de la atmósfera
- c) Interacciones de energía de acuerdo con las características de reflectancia, absorbanza, transmitancia y emitancia de la superficie terrestre
- d) Retransmisión de energía a través de la atmósfera, durante la cual sufre procesos de absorción y dispersión.
- e) Plataformas aéreas y espaciales
- f) Obtención y captura de datos del sensor por medios digitales o en forma de imagen impresa.
- g) Análisis de datos
- h) Compilación y representación gráfica de la información
- i) Presentación de esta información a los usuarios finales

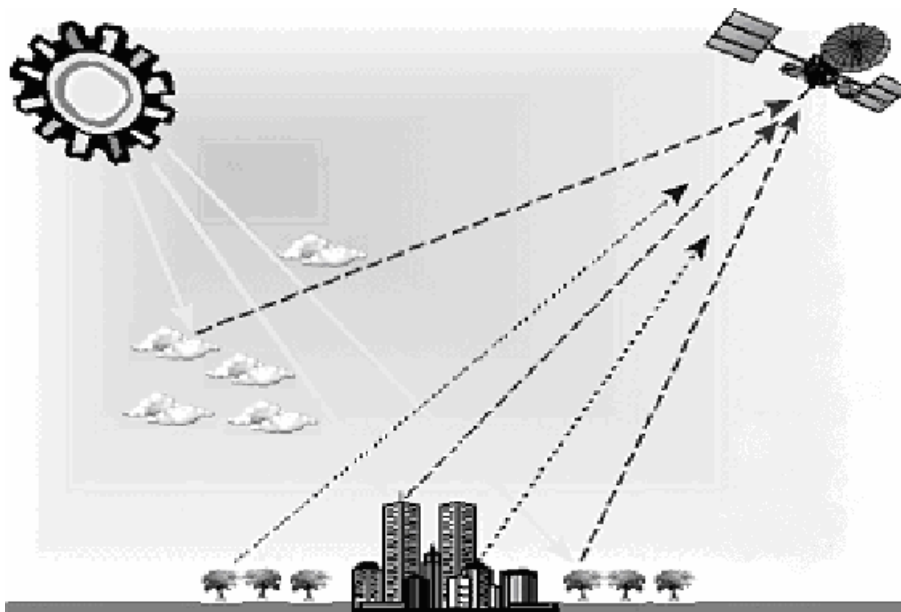


Fig. 4.1. Proceso de la percepción remota: emisión de energía, propagación, interacción con el medio. Adaptada de Medina, 2005.

4.3 Orígenes

El origen de la percepción remota o teledetección está ligado a los experimentos de Newton (1822), quien constató que al atravesar un prisma, un rayo luminoso (luz blanca) se desdobra en un haz de colores o espectro de colores.

Desde entonces los científicos fueron ampliando sus estudios al respecto. Verificaron que la luz blanca era una síntesis de ondas electromagnéticas de diferentes longitudes de onda, una especie de vibración compuesta básicamente de muchas vibraciones diferentes. Posteriormente, descubrieron que cada color descompuesto en el espectro correspondía a una temperatura diferente y que la luz roja incidiendo sobre un cuerpo, lo calentaba más que la luz violeta.

Algunos autores colocan el origen de la Percepción Remota ligado al desarrollo de sensores fotográficos, cuando las fotografías aéreas eran obtenidas desde globos. La Percepción Remota es fruto de un esfuerzo multidisciplinario que envolvió y envuelve avances en la física, físico-química, química, biociencias y geociencias, ciencias de la computación, mecánica, etc.

La evolución de la teledetección está ligada a algunos de los principales eventos citados a continuación:

- 1822 - Desarrollo de la teoría de la luz;
 - - Newton: descomposición de la luz blanca;
 - - Utilización de una cámara primitiva;
- 1939 - Desarrollo de equipos ópticos;
 - - Investigaciones de nuevas sustancias fotosensibles;
- 1859 - Utilización de cámaras fotográficas a bordo de globos;
- 1903 - Utilización de fotografías aéreas con fines cartográficos;
- 1909 - Obtención de fotografías aéreas por aviones;
- 1930 - Coberturas sistemáticas del territorio con fines de levantamiento de recursos naturales;
- 1940 - Desarrollo de equipos para radiometría que sean sensibles a la radiación infrarroja;
 - - Utilización de películas infrarrojas en la II Guerra Mundial, para la detección de camuflajes;
- 1944 - Primeros experimentos para utilizar cámaras multiespectrales;
- 1954 - Desarrollo de radiómetros de microondas;
 - - Pruebas iniciales con el objetivo de construir radares de vista lateral;

- 1961 - Desarrollo de procesamientos ópticos y digitales;
 - - Primeros radares de vista lateral;
- 1962 - Desarrollo de vehículos espaciales tripulados y no tripulados;
 - - Lanzamientos de satélites meteorológicos;
 - - Primera fotografía orbital MA-4-Mercury;
- 1972 - Fotografías orbitales obtenidas por el programa Gemini;
 - - Surgen otros programas espaciales que incluyen al satélite de recursos naturales: SEASAT, SPOT, ERS, LANDSAT;
- 1983 - Lanzamiento del Landsat 4, SIR-A, SIR-B, MOMS;
- 1991 - Lanzamiento del ERS-1.

4.4 Datos; Espectro electromagnético

La percepción remota tiene sus bases en el estudio de la manera en la que los diferentes materiales o coberturas que tiene la superficie terrestre reflejan las ondas del espectro electromagnético, el cual comprende a todas las ondas electromagnéticas de distintas frecuencias y longitudes de onda.

La *radiación electromagnética* es el resultado de la variación periódica de los *campos eléctrico y magnético*. Se define campo para esta materia de estudio, como una región del espacio en la que la materia está sometida a algún tipo de fuerza. En el caso de la radiación electromagnética, los campos son producidos por las partículas cargadas en movimiento.

La luz visible es un tipo de radiación electromagnética (Fig. 4.2). Se comporta como una *onda* que se propaga en el espacio, o bien como un conjunto de *fotones*. A este fenómeno se le denomina *dualidad de la radiación*.

Los distintos tipos de radiación electromagnética dependen directamente de las características de la onda, que son: *frecuencia, longitud de onda y amplitud o intensidad*. La frecuencia y la longitud de onda están directamente relacionadas, por lo que para describir completamente una onda, en este caso, la radiación electromagnética, basta con dar información acerca de su amplitud y frecuencia (o longitud de onda).

Como se mencionó, los parámetros de la radiación electromagnética son:

- frecuencia
- longitud de onda
- amplitud.

La *longitud de onda* (λ) es la distancia entre dos puntos en la misma fase de su movimiento ondulatorio. Se mide en unidades de distancia: por ejemplo, metros (m) o cualquiera de sus submúltiplos, como el ángstrom ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$).

La *frecuencia* (ν) se define como el número de máximos que pasan por un punto por unidad de tiempo. Sus unidades son los hercios (Hz), de forma que 1 Hz equivale a un ciclo por segundo.

La *amplitud* (A) es la distancia que hay entre el punto de máximo desplazamiento y el punto de inflexión de la onda.

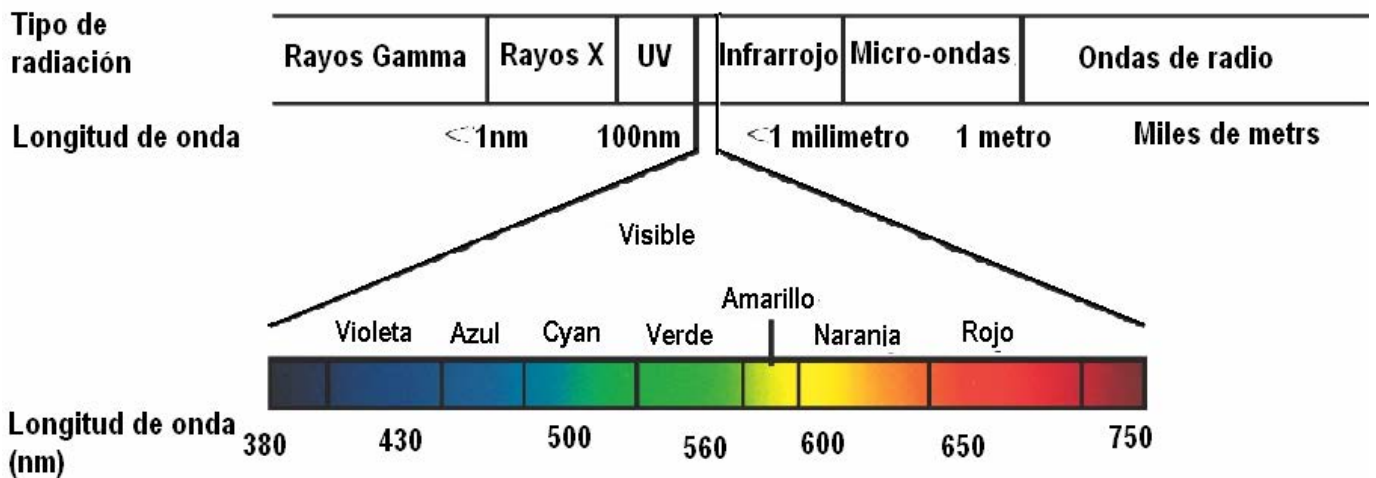


Fig. 4.2. Espectro electromagnético

Debido a que la velocidad de la luz se asume como constante ($c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$), existe una relación directa entre la frecuencia y la longitud de onda, ya que dada una longitud de onda determinada, si sabemos que la onda se desplaza a velocidad c , para saber el número de veces que pasa un máximo por un punto, sólo hace falta dividir la velocidad de la luz entre la longitud de onda. Tenemos, por tanto, que $\nu=c/\lambda$.

Regiones del espectro electromagnético (Sabins, 1986):

Región	Longitud de onda	Comentarios
Rayos Gama	<0.03nm	La radiación entrante en esta región del espectro es absorbida completamente por la atmósfera superior y no se utiliza en las técnicas de percepción remota
Rayos X	0.03 a 30 nm	Es absorbida completamente por la atmósfera. No se utiliza en percepción remota
Ultravioleta	0.03 a 0.4 μm	Longitudes de onda entrantes del orden de 0.03 μm son absorbidas completamente por el ozono de la atmósfera superior
Banda UV Fotográfica	0.3 a 0.4 μm	Transmitida a través de la atmósfera. Detectable con película y foto-detectores pero la dispersión atmosférica es severa.
Visible	0.4 a 0.7 μm	Detectada con película y foto-detectores. Abarca el pico de emisión de la energía proveniente del Sol en 0.5 μm .
Infrarrojo	0.7 a 100 μm	La interacción con la materia varía con la longitud de onda. Las ventanas atmosféricas de transmisión están separadas por bandas de absorción.
Infrarrojo reflejado	0.7 a 3.0 μm	La radiación solar reflejada que no contiene información acerca de las propiedades térmicas de los materiales. El intervalo de 0.7 a 0.9 μm es detectable con película.
Infrarrojo Térmico	3 a 5 μm , 8 a 14 μm	Principal ventana atmosférica para el infrarrojo que incluye la región térmica. Las imágenes en estas longitudes de onda son adquiridas por un scanner óptico-mecánico pero en general no se registran con película fotográfica.
Microonda	0.1 a 100 cm	Longitudes de onda larga que pueden penetrar las nubes, la niebla y la lluvia. Las imágenes son generalmente adquiridas con sensores activos.

Radars	0.1 a 100 cm	Las imágenes de radar son adquiridas en varias bandas de longitud de onda.
Radio	>100 cm	La banda de radio abarca aquellas longitudes de onda mayores de 10 cm (frecuencias menores de 3 Ghz). Esta región es usada principalmente por sensores activos y en menor medida por otros de carácter pasivo.

4.5 Procesamiento de imágenes

La relevancia de la percepción remota consiste en que nos permite obtener información de las imágenes, que no es observada a simple vista. Las diferentes técnicas y métodos utilizados nos dan la posibilidad de extraer una mayor cantidad de información de nuestra imagen. Dependiendo del objetivo de nuestro estudio, la imagen será procesada de diferente manera para obtener la información específica requerida

4.5.1 Adquisición de datos

“In situ”

Antes de ir directamente a la adquisición de datos es necesario cumplir algunos requerimientos “in situ”, esto son: realizar la calibración del sensor y realizar una evaluación objetiva y precisa de los resultados finales. Los datos “in situ” se refieren a datos de campo, colectados directamente en la zona de estudio. Al tomar los datos acerca de la reflectancia de una cobertura o material en un punto de localización conocida, nos resulta posible compararlos con los materiales que presenten los mismos valores de reflectancia en nuestra imagen. Los datos de campo son generalmente obtenidos junto con las coordenadas de posicionamiento global (GPS). Es importante coleccionar, tanto datos en campo, como datos remotos porque los primeros nos sirven para calibrar los segundos.

En algunas ocasiones los datos colectados durante otras investigaciones, o bien para otros fines, como mapas de suelo, urbanísticos, de vegetación, etc. son de gran valor para nuestros estudios para complementar la verificación de campo, en particular, si estos datos se encuentran integrados en un Sistema de Información Geográfica (GIS por sus siglas en Inglés).

4.5.2 Datos

Existen dos tipos de variables que pueden ser medidas por los sensores:

- 1) Aquellas que pueden ser medidas directamente. Estas son por ejemplo las que nos proporcionan información de manera directa, sin necesidad de otro dispositivo auxiliar. Un ejemplo de esto es el mapeo de temperatura: un sensor en la banda del infrarrojo térmico puede medir la temperatura aparente de una superficie mediante la medición de la radiación emitida en su superficie. Otro ejemplo es la determinación de la ubicación en los ejes x , y , así como la altura z , de un objeto. Esta información puede ser extraída directamente con un estereoscopio de una fotografía aérea y sobreponiéndola a una imagen satelital.

- 2) El segundo tipo de variables puede ser medido mediante el análisis de más de una variable física, y son conocidas como híbridas. Un ejemplo de este tipo de variables es el análisis que se hace a los datos de clorofila y temperatura para determinar el estado de estrés de las plantas.

4.6 Sensores

Los datos obtenidos a partir de técnicas de percepción remota pueden ser colectados usando sensores pasivos o sensores activos.

Sensores pasivos: mide la radiación electromagnética que es reflejada o emitida por el terreno u objeto de interés. Como ejemplo tenemos las cámaras fotográficas o de video y los sensores multiespectrales, que se usan para medir la energía irradiada por los materiales (la energía irradiada es la suma de la energía reflejada y la emitida).

Sensores activos: en este caso, los sensores generan energía electromagnética en una banda definida del espectro (por ejemplo en la región de las microondas) que posteriormente es reflejada por el objeto a estudiar y es entonces registrada por el sensor mismo. Un ejemplo es el radar.

Los sistemas de percepción remota colectan tanto datos analógicos (videos o fotografías aéreas) y/o digitales (imágenes ráster)

Algunas de las características de los sensores son:

La *resolución* - que es la medida de la habilidad de un sistema óptico de distinguir entre señales que están espacialmente cerca o son espectralmente similares.

La *resolución espectral* se refiere al número y dimensiones de un intervalo de longitudes de onda específico en el espectro electromagnético, las cuales son perceptibles para el sensor. El tamaño de este intervalo es completamente variable, desde muy grande como en las fotografías aéreas pancromáticas (fotografías en tonos de gris captadas en un rango de 0.4 a 0.7 μm), hasta relativamente pequeñas como la banda 3 del sensor Landsat 5 Thematic Mapper (0.63 a 0.69 μm). En el primer caso, el sensor mide toda la energía reflejada en la región del visible, desde el azul hasta el rojo, y en el segundo mide únicamente un sector específico dentro del rojo. Algunas regiones o bandas del espectro electromagnético son óptimas para obtener alguna información en particular. Las bandas están seleccionadas para maximizar el contraste entre el objeto de estudio y el fondo. Entre mejor caracterizada esté la respuesta del objeto de estudio en una banda, mayor es la probabilidad de detectar e identificar la información requerida.

Así mismo, la *resolución espacial* es la medida de la separación angular o lineal mínima entre dos objetos que puede ser definida por el sensor. La resolución espacial es normalmente definida por los ingenieros como el número de líneas definidas por milímetro en la imagen. Para otros sensores es simplemente la dimensión en metros de la superficie proyectada en el campo instantáneo de visión (IFOV). Por ejemplo, la superficie proyectada en el campo de visión de Landsat Thematic Mapper es de 30 x 30 m². La selección de la resolución requerida para el estudio de un objeto en particular depende de las dimensiones de dicho objeto.

La *resolución temporal* está determinada por la frecuencia con la que pasa el sensor por un área determinada. De manera ideal, los sensores obtendrían datos continuamente para discriminar información sobre el objeto de estudio. Esto es, por ejemplo, de suma importancia en estudios agrícolas donde se pueden observar cambios relacionados con los cultivos de temporada. Esto es utilizado en estudios temporales, en los cuales se comparan imágenes de distintas fechas y se observan los cambios que han ocurrido.

Por último, la *resolución radiométrica* define la capacidad de un sensor para detectar diferencias en la intensidad de la señal de la energía medida, tanto emitida como reflejada.

Actualmente, los sensores Landsat Thematic Mapper (TM) han mejorado su resolución espectral, radiométrica, espacial y temporal. Las mejoras en la resolución, generalmente, incrementan la precisión con la que un fenómeno puede ser estudiado.

Sistemas de Sensores

Para poder procesar los datos de percepción remota con ayuda de algoritmos, es necesario tener la información en formato digital. Para realizar esto, existen dos maneras:

1. Adquirir la imagen en forma analógica y pasarla a formato digital.
2. Adquirir los datos desde un inicio en forma digital.

Los datos de percepción remota se toman generalmente de manera digital, por lo que la digitalización no es necesaria. Existen gran cantidad de sensores con características muy diversas, con diferentes resoluciones temporales, espaciales, espectrales, etc. Los sistemas de los Sensores detectan la energía electromagnética que proviene del objeto o fenómeno de interés y pasa a través de la atmósfera, posteriormente es registrada como una señal eléctrica analógica, que después se cambia a un valor digital.

Durante el proceso, los datos obtenidos de los sensores remotos son almacenados tanto en forma digital como en forma analógica, y a menudo procesados en conjunto con datos no provenientes de sensores remotos (auxiliares). Estos datos se utilizan para corroborar la información de nuestra imagen.

Existen, como ya se mencionó, muchos tipos de sensores, la imagen utilizada en este trabajo fue obtenida con el Landsat Thematic Mapper, por lo que explicaremos en detalle su historia y funcionamiento.

4.7 Plataformas

Para la obtención de los datos se utilizan los sensores. Estos sensores se encuentran colocados en plataformas, en el caso de las imágenes con las que trabajamos estas plataformas corresponden a satélites. Los satélites pueden estar estacionarios o tener una órbita definida. Las órbitas pueden ser:

- Ecuatoriales: con órbita alrededor del Ecuador
- Polares: con órbita en el eje de la Tierra
- Semipolar: con órbita oblicua al eje de la Tierra

Se considera también la inclinación de la órbita que es el Angulo formado por el plano orbital y el plano ecuatorial.

4.8 Sistemas de Sensores Landsat

En 1967, la National Aeronautics and Space Administration (NASA) inició el programa Earth Resource Technology Satellite (ERTS). Como resultado de este programa se lanzaron cinco satélites que portaban varios sistemas de sensores diseñados originalmente para recolectar información de la Tierra. El ERTS-1 fue puesto en órbita el 23 de Julio de 1972. Posteriormente la NASA renombró el programa ERTS a Landsat. Los satélites con el nombre ERTS fueron renombrados: el ERTS-1, recibió el nombre de Landsat 1, ERTS-B cambió a Landsat-2 y fue lanzado el 22 de enero de 1975, posteriormente colocaron el Landsat-3 el 5 de Marzo de 1978; el Landsat-4 el 16 de Julio de 1982 y el Landsat-5 el 1º de Marzo de 1984.

Los Landsat 1 a 3 fueron colocados en órbitas circulares a una altitud de 919 Km. (Fig. 4.3) Los satélites orbitan la Tierra cada 103 minutos, resultando 14 vueltas por día. Tienen una inclinación orbital de 99° lo que los hace cercanos al polo y ocasiona que crucen por el Ecuador con un ángulo de aproximadamente 9° de la normal. Existen diversos sensores colocados en los satélites Landsat, uno de ellos es el Landsat Multispectral Scanner (MSS) colocado en los satélites Landsat 1 a 5. Otro es el Landsat Thematic Mapper, con el cual se obtuvo la imagen con la que se hizo este estudio (Sabins, 1996).

Generación	Landsat 1, 2 y 3	Landsat 4 y 5
Orbitas al día	14	14.5
Cantidad de órbitas (<i>paths</i>)	251	233
Ciclo repetidor	18 días	16 días
Recubrimiento lateral al ecuador	14.0 %	7.6 %
Pasa la latitud 40°N a la hora local del sol	9:30 a.m.	10:30 a.m.
Periodo de operación	1972 - 1984	1982 - futuro
Memoria de los datos en el satélite	Si	No
Equipado con:		
Scanner multiespectral (MSS)	Si	Si
Thematic Mapper	No	Si

Landsat Thematic Mapper (TM)

Este sensor fue colocado el 16 de Julio de 1982 en el satélite Landsat-4 y el 1º de Marzo de 1984 en el Landsat-5. El TM es un sensor de escaneo óptico-mecánico que lee la energía en las regiones del visible, el infrarrojo cercano, el infrarrojo el medio y el infrarrojo térmico. Obtiene imágenes con una resolución espectral, espacial, temporal y radiométrica superiores al Landsat MSS y funciona de la siguiente manera: Un telescopio dirige la radiación entrante obtenida a lo largo de una línea de escaneo a través de un corrector de línea a un primer plano de la región del visible y el infrarrojo cercano o al plano del infrarrojo medio o infrarrojo térmico. Los detectores para las bandas del visible y el infrarrojo cercano (1 a 4) son arreglos de cuatro líneas, cada uno contiene 16 detectores de silicón. Los dos detectores del infrarrojo medio consisten de un arreglo de 16 celdas de indio-antimonio, y el detector del infrarrojo térmico corresponde a un arreglo de cuatro celdas de mercurio-cadmio.

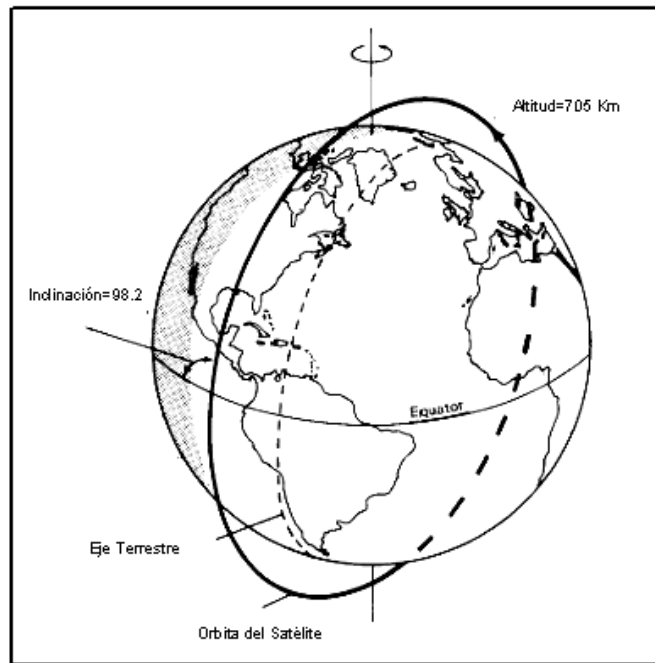


Fig.4.3 Órbita del satélite

Tiene una resolución espacial de 30 x 30 m para 6 de las bandas, y de 120 x 120 m para la banda del infrarrojo térmico. Las bandas del TM, fueron escogidas por sus valores en la penetración del agua, diferenciación de los tipos y salud de la vegetación, la humedad del suelo y las plantas, diferenciación de las nubes, nieve y hielo, e identificación de alteraciones hidrotermales en ciertos tipos de rocas.

En el aspecto de identificación de la vegetación, las bandas del TM se situaron de modo tal que maximicen la identificación de los factores que controlan la reflectancia de las hojas, como pigmentación, humedad, estructura, etc.

Características de las Bandas de Landsat Thematic Mapper (Jensen, 1996)

<i>Banda</i>	<i>Ancho de banda</i>	<i>Nombre</i>	<i>Resolución espacial (Km)</i>	<i>Resolución radiométrica (bits)</i>	<i>Resolución temporal (días)</i>	<i>Altitud (Km)</i>	<i>Numero de píxeles por línea</i>	<i>Comentario</i>
1	0.45 a 0.52 μm	azul	30 x 30	8	16	705	3000	Ofrece una gran penetración en cuerpos de agua, también es útil para estudios de uso de suelo y caracterización de vegetación y óxidos. El límite inferior corresponde al pico de transmitancia del agua clara, mientras que el superior marca la absorción de clorofila de vegetación sana. Las longitudes de onda inferiores a 0.45 están substancialmente influenciadas por dispersión y absorción atmosférica
2	0.52 a 0.60 μm	verde	30 x 30	8	16	705	3000	Esta banda se encuentra entre la absorción de clorofila en azul y rojo, por lo tanto corresponde a niveles de alta reflectancia de vegetación sana
3	0.63 a 0.69 μm	rojo	30 x 30	8	16	705	3000	Corresponde a la absorción de clorofila en rojo de vegetación sana y es la banda mas utilizada para diferenciación de la vegetación. También es útil para establecer límites de clases de suelos y limites geológicos. Esta banda ofrece un mayor contraste que las bandas 1 y 2 porque se reduce el efecto de atenuación atmosférica. El límite de 0.69 μm es significativo, ya que en la región de 0.68 a 0.75 μm es donde ocurre el cambio en la

								reflectancia de la vegetación, y podría aportar información que entorpezca la interpretación
4	0.76 a 0.90 μm	infrarrojo cercano	<i>30 x 30</i>	8	16	<i>705</i>	<i>3000</i>	Esta banda tiene buena respuesta para cuantificar la biomasa presente en una imagen. Es útil para la identificación de afloramientos y enfatiza los contrastes entre agua-suelo, y suelo-afloramientos.
5	1.55 a 1.75 μm	Infla rojo medio	<i>30 x 30</i>	8	16	<i>705</i>	<i>3000</i>	Esta banda es bastante sensible para cuantificar y analizar la cantidad vegetación presente en el agua. Es útil también para diferenciar entre nubes, hielo y nieve, factor muy importante en la investigación hidrológica.
6	10.4 a 12.5 μm	Infrarrojo término	<i>120 x 120</i>	8	16	<i>705</i>	<i>3000</i>	Esta banda mide la cantidad de radiación infrarroja emitida por las superficies. La temperatura aparente es función de la emisión y de la temperatura verdadera o cinética de la superficie. Esto resulta útil para encontrar actividad termal. Esta banda normalmente nos ofrece información única de topografía en zonas muy montañosas
7	2.08 a 2.35 μm	infrarrojo medio	<i>30 x 30</i>	8	16	<i>705</i>	<i>3000</i>	Banda útil para la diferenciación y caracterización de formaciones rocosas. Es particularmente útil para identificar rocas con minerales del grupo de los hidroxilos, los carbonatos y los sulfatos

Capítulo 5

Procesamiento

5.1 Realce

Para poder obtener mayor información de nuestras imágenes, se llevan a cabo diferentes tipos de procesamiento: uno que trata el carácter radiométrico de la imagen llamado *realce radiométrico*; mientras que el otro tiene relación con el carácter geométrico de la imagen, el cual se conoce como *realce geométrico*.

El realce radiométrico se relaciona con la alteración del valor numérico de los píxeles de la imagen. Estos procedimientos involucran la creación de nuevos valores de brillantez para un píxel a partir de los valores ya existentes, siendo estos procesos denominados también *operaciones de puntos o puntuales*.

Dentro de los realces geométricos se incluyen aquellos procesos por medio de los cuales los detalles geométricos dentro de una imagen pueden ser modificados o realzados. En contraste con las operaciones puntuales usadas en el realce radiométrico; las técnicas de realce geométrico son caracterizadas por operaciones sobre una vecindad. Dicha vecindad o ventana es movida sobre la imagen renglón por renglón y columna por columna con lo que se obtiene un nuevo valor de brillantez para el píxel central de la ventana.

Las técnicas tanto de realce geométrico como radiométrico pueden ser agrupadas en diferentes tipos: manipulación de contraste, manipulación de rasgos espaciales y manipulación de imágenes multiespectrales. Dentro de estos amplios grupos se explicarán las siguientes técnicas:

1. *Manipulación de contraste*: modificación del contraste de la imagen, el cual puede ser: lineal, lineal con saturación, ecualización, etc.
2. *Manipulación de rasgos espaciales*: filtrado espacial por medio de convolución o con algunos operadores como por ejemplo el Laplaciano.

3. *Manipulación de imágenes multispectrales*: cociente de bandas, análisis de componentes principales, composiciones de color y álgebra de imágenes (Lillesand y Kiefer, 1994).

Los métodos de realce se aplican a las imágenes con el objetivo de mejorar su apariencia para visualizar mejor los materiales o rasgos de interés. Existen diferentes técnicas para lograr esto y cada una de ellas se aplica dependiendo de las características de la imagen y de los resultados que se obtengan en cada paso. Para el procesamiento inicial de nuestras imágenes se utilizó el realce de contraste.

5.2 Realce de contraste.

Los sensores remotos registran la radiación emitida y reflejada de los diferentes materiales de la tierra. De modo ideal, algunos de los materiales reflejan una enorme cantidad de energía en cierta longitud de onda mientras que otros materiales reflejan una menor cantidad en la misma longitud de onda. Esto nos proporciona cierto contraste entre esos materiales. Sin embargo, este caso ideal pocas veces ocurre en la práctica, por lo que es necesario hacer más evidente el contraste que existe entre los materiales.

El mejoramiento del contraste permite mejorar la visualización de la imagen. Pero es importante recordar que las transformaciones usadas para ello implican la alteración de los valores numéricos y por lo tanto no sirven para el análisis cuantitativo de los datos.

La necesidad de mejorar el contraste de las imágenes deriva de los requerimientos en el diseño del sensor. En particular los satélites con cobertura global abarcan gran variedad de materiales con valores de radiancia desde muy bajos, como los océanos, hasta muy altos, como la nieve o la arena. Sin embargo, una cobertura en particular tendrá un rango de valores de radiancia mucho menor y la imagen visualizada tendrá un bajo contraste porque no usa el rango completo disponible por el sensor.

Podemos mejorar el contraste con varios métodos:

- *Stretch lineal*: deforma linealmente el histograma.
- *Stretch con saturación*: deforma linealmente el histograma y asigna a un porcentaje de valores el valor máximo o el mínimo.
- *Ecuilibración del histograma*: asigna nuevos valores con base en la probabilidad.

5.2.1 Deformación lineal (Linear Stretch)

Cuando el ajuste de la gama de tonos de gris consiste en una expansión uniforme, se trata de una transformación que, como su nombre lo indica, es lineal: corresponde a una recta. Controlando únicamente dos parámetros: la inclinación de la recta y el punto de intersección de la recta.

La función de mapeo lineal puede ser representada por:

$$DN = 255 \left(\frac{DN - MIN}{MAX - MIN} \right)$$

Donde:

DN = nuevo valor de la escala de gris;

DN = valor original de niveles de gris (255)

MIN = Valor mínimo de la imagen, se asigna a 0 en la imagen resultante

MAX = Valor máximo, se asigna a 255 en la imagen resultante

Lo que ocurre en esta transformación, es simplemente ajustar los datos de la imagen a la escala de grises, disminuyendo la relevancia de los valores poco representativos. Como se puede observar en la figura que se muestra más adelante (Fig.4.1). Esto ocasiona que los valores en esta nueva imagen tengan una mayor gama de tonos de gris para ser representados y, por lo tanto, un mejor contraste. Este método es el más simple, sin embargo, no necesariamente da mejor realce a la imagen dependiendo de la forma del histograma. Cuando el histograma abarca únicamente un rango representativo, en la imagen podemos observar mejor contraste; sin embargo cuando se extiende hasta el valor máximo del rango, aunque sea con valores de frecuencia muy baja, la mejor opción es la saturación con deformación lineal del histograma.

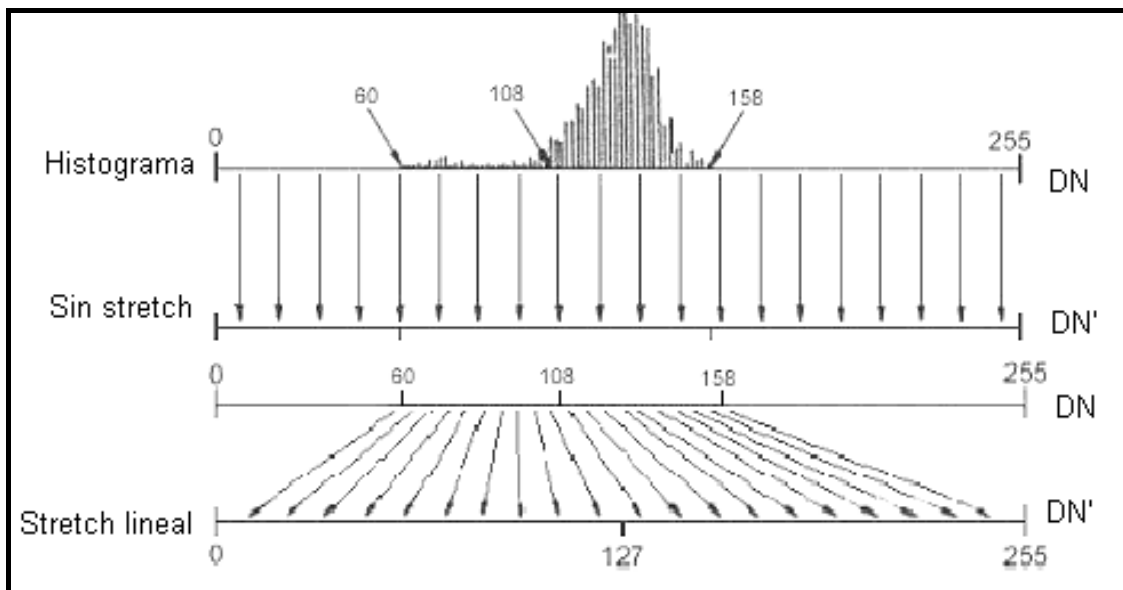


Fig.4.1 Realce de contraste. Stretch lineal. (Lillesand y Kiefer, 1979)

5.2.2 Ecuación del histograma.

Esta transformación consiste en reducir el contraste de las áreas muy claras o muy oscuras de la imagen. Los datos de nuestra imagen se distribuyen de una manera en la que los valores mas representativos tienen mayor cantidad de tonos en gris, y en las áreas donde tenemos pocos datos se utilizan menor cantidad de tonos. Esta aproximación se consigue al dispersar los picos del histograma de la imagen y no considerar las partes menos prominentes.

Por ejemplo, si tenemos nuestro valor representativo entre 109 y 158, estos valores los representamos únicamente con valores de 0 a 38, es decir que se utilizan menor cantidad de tonos de gris para representar los datos que no aportan información completamente relevante, mientras que a los otros datos se les asigna mayor cantidad de tonos, obteniendo mejor contraste y resaltando estos datos dentro de la imagen. En la figura anterior se observa que los datos se distribuyen de una manera más conveniente para mejorar su despliegue. Esta deformación del histograma no es una transformación lineal.

5.2.3 Stretch con Saturación

En caso de que una imagen presente una distribución muy amplia del histograma en los valores extremos de la distribución pero con una frecuencia baja, lo que usualmente se denomina "colas", se utiliza el realce lineal con saturación. En este método se toman los valores localizados en

las "colas" y se les asigna el valor máximo o mínimo de acuerdo a su cercanía a uno o a otro. El resto de los valores es realizado a partir de una deformación lineal del histograma.

En las imágenes siguientes se puede observar el *stretch* con saturación.

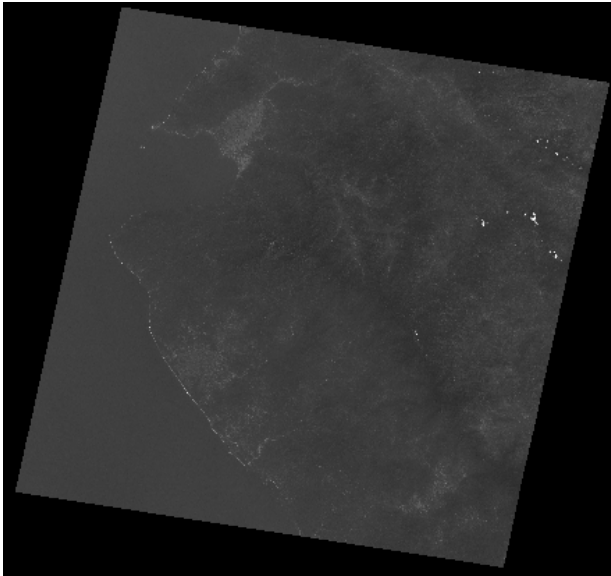


Fig. 4.2a Banda 1

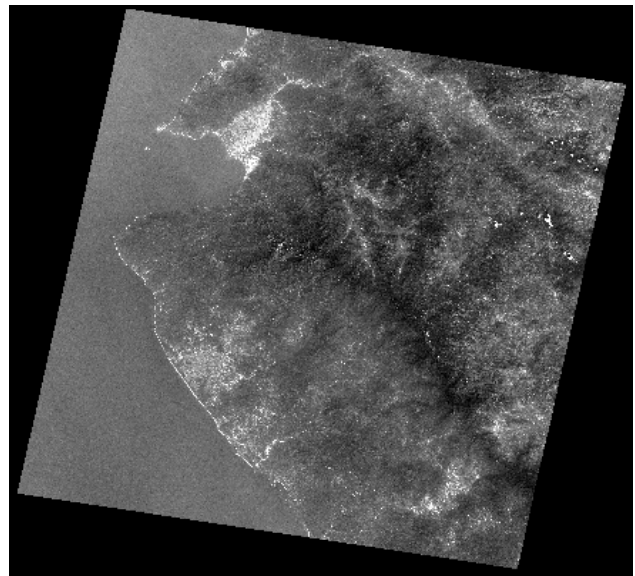


Fig. 4.2b Banda 1 con stretch con saturación

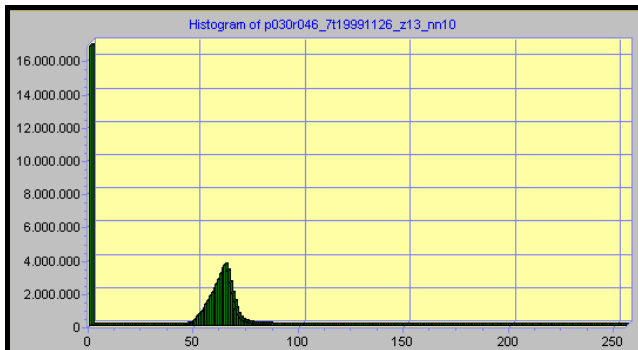


Fig.4.3a. Histograma de la banda 1.

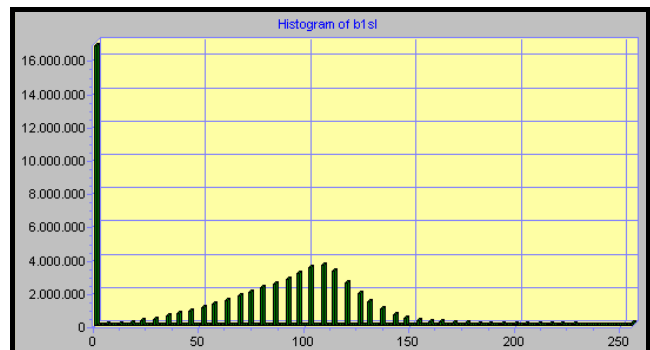


Fig.4.3b. Histograma de la banda 1 con stretch

Comparando las dos imágenes y los dos histogramas correspondientes, podemos notar que tras aplicar el *stretch* se logra resaltar considerablemente los rasgos de nuestra imagen. En los histogramas podemos notar que aplicando el stretch logramos una distribución mas uniforme y se eliminan considerablemente las colas. Se realiza el *stretch* con diferentes valores de saturación, en cada una de las bandas, para ver cuál arroja mejores resultados y posteriormente trabajar con estas imágenes.

5.3 Realce espectral.

5.3.1 Cociente de bandas

El método de cociente de bandas es un proceso de división de los valores de brillantez de una banda espectral entre los valores correspondientes de otra banda. La expresión matemática es:

$$DN_{i,j,r} = \frac{DN_{i,j,k}}{DN_{i,j,m}}$$

donde $DN_{i,j,r}$ es el píxel resultante en el renglón i y columna j , el $DN_{i,j,k}$ es el píxel en la misma localización de la banda k y el $DN_{i,j,m}$ de la banda l [Jensen, 1996; Lillesand y Kieffer, 1979].

Al hacer un cociente de una banda en la que ciertos materiales tienen alta reflectancia entre una banda en la que esos mismos materiales tengan baja reflectancia, se realiza la brillantez de dichos materiales y por lo tanto se pueden identificar con mayor facilidad. Como es el caso del cociente de las bandas 4 entre la 3, que nos ayuda a identificar la vegetación, ya que la vegetación tiene valores altos en la banda 4, y bajos en la 3. Este método no fue utilizado en este estudio,

5.3.2 Componentes Principales

El método de Análisis de Componentes Principales (ACP) es una técnica estadística de síntesis de la información, o reducción de la dimensión (número de variables). Es decir, su objetivo es reducir el número de variables perdiendo la menor cantidad de información posible, reducir el número de variables y darles un mayor peso a las que tienen más importancia en el análisis. Las variables obtenidas (componentes principales) serán una combinación lineal de las variables originales y además serán independientes entre sí.

La técnica de componentes principales produce una transformación de las imágenes originales (bandas) para producir nuevas imágenes (componentes) que no están correlacionadas unas con otras. Esto se consigue mediante un análisis estadístico multivariado que da como resultado:

- Una matriz de varianza-covarianza
- Una matriz de correlación entre bandas
- Imágenes de las componentes principales
- Una matriz de carga de cada banda en las componentes principales

Un aspecto importante en el análisis de componentes principales es la interpretación de los factores, ya que la interpretación se basa en la relación que existe entre los factores obtenidos y las variables iniciales. Es necesario considerar tanto el signo, como la magnitud de las correlaciones.

En el caso de la percepción remota, la componente 1 siempre muestra el mayor porcentaje de varianza y, por lo tanto, es la que servirá para realizar un realce espacial, puesto que presenta los rasgos morfológicos en forma clara.

La técnica de componentes principales fue propuesta inicialmente por Karl Pearson pero debido a la complejidad de los cálculos se utilizó hasta la aparición de las computadoras.

Fundamentos del método de Componentes Principales

La técnica de Componentes Principales esta basada tanto en transformaciones lineales como en algunas propiedades de la matriz de varianza-covarianza. Se realizan rotaciones de los espacios vectoriales, esto es, transformaciones del espacio vectorial sobre sí mismo, y están asociadas con matrices cuadradas, unitarias y ortogonales. La matriz tiene tantas filas y columnas como la dimensión del espacio, sus columnas son vectores unitarios y tiene la característica de que al ser multiplicada por su transpuesta produce la matriz unidad. Esto es, $Q^{-1} = Q'$. Ya que no se modifica la variabilidad de la nube de puntos al realizar una traslación, la varianza y la covarianza de la nube es la misma antes y después de realizada la translación.

Considerando p variables aleatorias de tipo numérico X_1, X_2, \dots, X_p que posiblemente estén correlacionadas entre sí, formamos un vector aleatorio, denotado por: $X=(X_1, X_2, \dots, X_p)$.

La matriz de varianza-covarianza para la variable X está definida como Σ y su entrada en la fila i columna j es el valor de la covarianza entre X_i y X_j . Lo que hace que la diagonal de la matriz Σ esté conformada por las varianzas $V(X_1), V(X_2), \dots, V(X_p)$ y que sea simétrica. Otra propiedad de la matriz es que, en su forma cuadrática, todas las raíces son positivas. Estas propiedades de Σ hacen que la matriz tenga p valores propios reales y diferentes, garantizando que sea diagonalizable. Es decir, se puede encontrar una matriz Q , invertible, tal que $\Sigma = Q \Lambda Q^{-1}$ donde Λ es la matriz diagonal formada por los valores propios de Σ , denotados $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$

Es posible reordenar, de acuerdo con su magnitud, los valores propios de Σ de tal manera que λ_1 sea el mayor de ellos, λ_2 el siguiente, y así sucesivamente y λ_p el menor de todos. Esto es un

reordenamiento de las columnas de la matriz \mathbf{Q} de manera que la primera sea un vector propio asociado con λ_1 , la segunda un vector propio asociado con λ_2 y así sucesivamente. En particular dichas columnas pueden estar formadas por vectores propios normalizados, es decir, perpendiculares entre sí y de longitud igual a la unidad. De esta manera se construye una matriz que produce la rotación deseada ya que, como puede probarse, el primer vector propio $\mathbf{U}_1 = (u_{11}, u_{12}, \dots, u_{1p})'$ apunta en la dirección de máxima variabilidad de la nube centrada. Esta dirección se llama primera dirección principal. El segundo vector propio $\mathbf{U}_2 = (u_{21}, u_{22}, \dots, u_{2p})'$ apunta en la siguiente dirección de máxima variabilidad de la nube centrada, llamada segunda dirección principal y así sucesivamente.

Una vez resuelto el problema de la rotación, bastará multiplicar la variable centrada $\mathbf{X}_c = \mathbf{X} - \mathbf{G} = (X_1^c, X_2^c, \dots, X_p^c)$ (donde cada fila de \mathbf{G} es el centro de gravedad G) por la matriz de rotación \mathbf{Q} para obtener la nueva variable $\mathbf{F} = (F_1, F_2, \dots, F_p)$, llamada Variable de Componentes Principales.

Cada componente F_j del vector aleatorio \mathbf{F} , se llama una componente principal. Evidentemente se cumple que $F_j = u_{j1}X_1^c + u_{j2}X_2^c + \dots + u_{jp}X_p^c$ es decir, cada componente principal es una combinación lineal de las variables originales centradas.

La traza de Σ , por ser la suma de las varianzas de las variables originales X_i recibe el nombre de varianza total, VT.

$$\text{Traza}(\Sigma) = \text{Traza}(\mathbf{Q}\Lambda\mathbf{Q}^{-1}) = \sum_{i=1}^p \lambda_i$$

Se puede probar además que $V(F_i) = \lambda_i$ para $i = 1, 2, \dots, p$ y que $\text{Cov}(F_i, F_j) = 0$.

La varianza total es igual a la suma de los valores propios de Σ e igual a la suma de las varianzas de las componentes principales. Es decir, la varianza total es la misma con las variables originales que con las variables transformadas, F_i .

Las componentes principales son variables aleatorias no correlacionadas entre sí, obtenidas mediante transformaciones lineales de las variables originales centradas. Es decir es: $F_j = \mathbf{U}_j \cdot \mathbf{X} = u_{j1}X_1 + u_{j2}X_2 + \dots + u_{jp}X_p$ para $j = 1, 2, \dots, p$

Por lo tanto $E(F_j) = 0$ para $j = 1, 2, \dots, p$

Si todas las variables originales X_i son ortogonales entonces todas las componentes principales son normales.

Fases de un análisis de componentes principales:

- Análisis de la matriz de correlaciones

Para realizar un análisis efectivo, es necesario que existan correlaciones entre las variables. Esto indica que existe información redundante y un número menor de factores explicará gran parte de la variabilidad total.

- Selección de los factores

La elección de los factores se realiza de tal forma que el primero recoja la mayor proporción posible de la variabilidad original; el segundo factor debe recoger la máxima variabilidad posible no recogida por el primero y así sucesivamente. Del total de factores se elegirán aquéllos que recojan el porcentaje de variabilidad que se considere suficiente. A éstos se les denominará componentes principales.

- Análisis de la matriz factorial

Una vez seleccionados los componentes principales, se representan en forma de matriz. Cada elemento de ésta representa los coeficientes factoriales de las variables, es decir, las correlaciones entre las variables y los componentes principales; la matriz tendrá tantas columnas como componentes principales y tantas filas como variables.

- Interpretación de los factores

Para que un factor sea fácilmente interpretable debe tener las siguientes características:

- Los coeficientes factoriales deben ser próximos a 1.
- Una variable debe tener coeficientes elevados sólo con un factor.
- No deben existir factores con coeficientes similares.

- Cálculo de las puntuaciones factoriales

Son las puntuaciones que tienen los componentes principales para cada caso, que nos permitirán su representación gráfica. Estas se calculan mediante la expresión:

$$X_{ij} = a_{i1} \circ Z_{i1} + \dots + a_{ik} \circ Z_{kj} = \sum a_{is} \circ Z_{sk}$$

Los coeficientes están representados por la letra a y Z representa a los valores estandarizados que tienen las variables en cada uno de los sujetos de la muestra.

Aplicación y resultados del método de Componentes Principales

Este método, es utilizado para comprimir los datos multiespectrales calculando un nuevo sistema de coordenadas.

Lo obtenido, y que se presenta a continuación, es:

- Una matriz de correlación entre bandas
- Una matriz de carga de cada banda en las componentes principales.

Matriz de correlación

	1	2	3	4	5	7
1	1.000000	0.971946	0.889694	0.728546	0.711089	0.720028
2	0.971946	1.000000	0.960329	0.831328	0.839776	0.843111
3	0.889694	0.960329	1.000000	0.808267	0.906217	0.935844
4	0.728546	0.831328	0.808267	1.000000	0.903893	0.817791
5	0.711089	0.839776	0.906217	0.903893	1.000000	0.975857
7	0.720028	0.843111	0.935844	0.817791	0.975857	1.000000

La diagonal de nuestra matriz de correlación, nos muestra, que como es lógico, cada banda esta perfectamente relacionada con ella misma. (1.000000) La correlación con las otras bandas será menor cuanto menor sea el valor de correlación.

Podemos observar que las bandas presentan una alta correlación unas con otras, lo que significa que son similares visual y numéricamente. Esta correlación proviene del efecto de las sombras resultantes de la topografía, de la superposición de las ventanas espectrales entre bandas y del propio comportamiento espectral de los objetos.

En ocasiones, el análisis de las bandas espectrales individuales puede ser ineficiente debido a la información redundante presente en cada una de esas bandas. La transformación que realizamos es una técnica de realce que reduce o remueve esta redundancia espectral, es decir,

genera un nuevo conjunto de imágenes cuyas bandas individuales presentan informaciones no disponibles en otras bandas. Esta transformación se deriva de la matriz de varianza-covarianza y crea un nuevo conjunto de imágenes donde cada valor de "píxel" es una combinación lineal de los valores originales.

Como se observa en la matriz de correlación, el número de componentes principales es igual al número de bandas espectrales utilizadas y son ordenadas de acuerdo con el decremento de la variancia de nivel de gris. La primera componente principal tiene la mayor variancia (mayor contraste) y la última por consecuencia, la menor variancia, como se muestra en la siguiente tabla:

Componente	C1	C2	C3	C4	C5	C7
% var.	87.63	7.52	4.49	0.23	0.09	0.04
Eigenval.	5293.27	454.54	271.25	13.70	5.23	2.66

En este caso en particular, podemos observar la mayor parte de la información se encuentra en la componente 1 (87.63%). Esto significa que contiene la información de brillo asociada a las sombras de topografía y a las grandes variaciones de la reflectancia espectral general de las bandas. Esta componente principal posee la mayor parte de la variancia total de los datos, concentrando la información, antes dispersa, en varias dimensiones.

Por otro lado, podemos observar que, únicamente las componentes 2 y 3 muestran un porcentaje relativamente significativo frente a las demás componentes (7.52 y 4.49 % respectivamente). Normalmente la segunda componente presenta gradualmente menos contraste y menos información topográfica debido a la ausencia de sombras. Mientras que la tercera y cuarta componentes principales contienen típicamente menos estructura de la imagen y más ruido que las dos primeras, indicando la compresión de los datos en las primeras bandas. En este caso, se puede observar que las últimas tres componentes no presentan mucha información, esto corresponde únicamente a aquella información que está presente sólo en alguna de las bandas, o bien al ruido existente en los datos originales.

Matriz de carga

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	0.853030	0.52137	-0.041948	-0.052817	-0.000745	-0.018332
2	0.941822	0.359047	0.044216	0.035508	-0.008998	0.061156
3	0.947611	0.166610	0.198111	0.137025	-0.013472	-0.030935
4	0.951678	-0.144298	-0.262426	0.008621	0.008611	-0.000874
5	0.956130	-0.216623	0.176390	-0.030195	-0.031010	-0.000125
7	0.940039	-0.113889	0.338667	-0.014512	0.080296	0.001884

La matriz de carga se usa para analizar las componentes que nos sirven para realizar cierto análisis en particular, como es el caso de la vegetación, debido a que para nuestro estudio esto no es necesario, dicho análisis no se realizó, y únicamente se presenta como producto obtenido del método.

Así mismo, mediante este método se obtuvieron las imágenes de cada una de estas componentes; debido a que la primera componente principal es la que presenta la mayor parte de la información, es la única imagen que se presenta (Fig. 5.4):

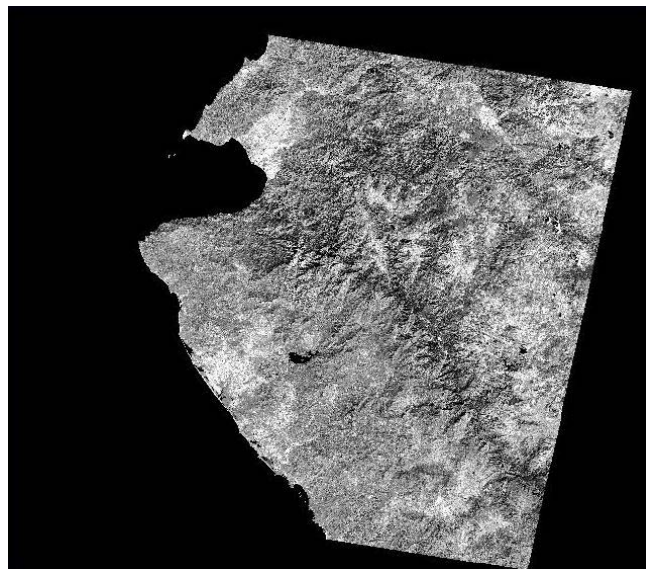


Fig. 5.4 Imagen de la primera componente con stretch lineal

En general, el stretch lineal nos arroja mejor calidad en la imagen por lo que se le aplicó a esta imagen.



Fig. 5.5 Ventana de la primera componente

Debido a que nuestra zona de estudio es menor a la que se muestra en la imagen, se realizó una ventana que acorte la imagen y nos permita tener más detalle de la zona de interés. La ventana tiene las siguientes dimensiones 3215 columnas y 2227 renglones (Fig. 5.5).

El histograma (Fig. 5.6), a continuación, corresponde a la ventana de la primera componente, se puede observar que la distribución de los valores en la escala de grises muestra valores muy elevados entre los 8 y los 24, esto se debe a que en nuestra imagen existe una zona muy extensa que corresponde a mar, por lo que los valores de reflectancia son muy bajos, cercanos al negro.

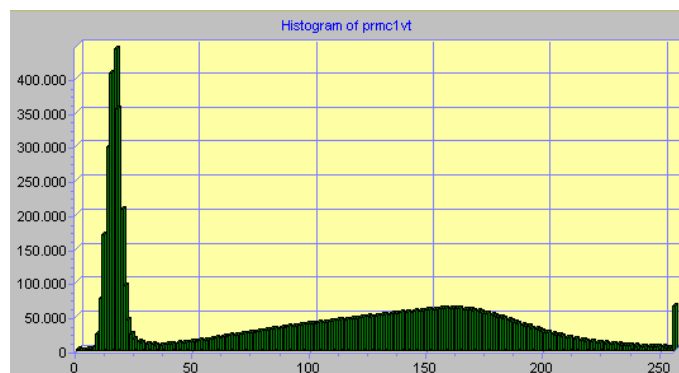


Fig. 5.6 Histograma de la ventana de la primera componente. Eje X corresponde al valor en la escala de grises, eje Y a la frecuencia con que se presenta este valor en la

El resto de los valores se encuentra uniformemente distribuido en la escala desde 30 hasta 254 aproximadamente, alcanzando el valor más alto en 160.

5.4 Realce espacial

Las técnicas de filtraje espacial son transformaciones de la imagen píxel a píxel, que no dependen solamente del nivel de gris de un determinado píxel, sino también del valor de los niveles de gris de los píxeles vecinos en la imagen original. Esto se debe a la característica que tiene las imágenes satelitales llamada frecuencia espacial. Definida como el número de cambios en el valor de brillantez por unidad de distancia de cada parte de la imagen. Si existen pocos cambios en el valor de brillantez de un área dada de la imagen, esto se refiere a un área de baja frecuencia. Debido a que la frecuencia espacial por su propia naturaleza describe el valor de brillantez de una región, es necesario adoptar una aproximación espacial para extraer información espacial de manera cuantitativa. Esto se realiza tomando valores de los píxeles vecinos.

La frecuencia espacial en las imágenes obtenidas mediante sensores remotos puede ser aumentada o atenuada mediante dos aproximaciones diferentes: los filtros espaciales de convolución basado en el uso de mascararas de convolución. Su uso es relativamente sencillo y es utilizado para aumentar el detalle de bajas y altas frecuencias, así como los bordes de las imágenes; la otra técnica empleada es el análisis de Fourier, que matemáticamente separa la imagen en sus componentes espaciales de frecuencia. Resultando una transformada de Fourier de la imagen.

Filtros espaciales de convolución.

Un filtro espacial es un filtro para el cual el valor de brillantez ($BV_{i,j}$) aplicado en la imagen original, localizado en i, j , resulta, en la imagen obtenida una función del promedio (combinación lineal) de los valores de brillantez localizados en un patrón espacial alrededor de i, j de la imagen original. Este proceso de evaluar los píxeles vecinos es llamado filtro de convolución bidimensional. Este proceso es a menudo utilizado para modificar las características de la frecuencia espacial de una imagen. Los filtros espaciales que enfatizan las frecuencias espaciales altas resaltan los bordes de una imagen. Mientras que los filtros que enfatizan las bajas frecuencias se utilizan para reducir el ruido de las imágenes.

Como se puede observar en la figura 5.7 los filtros espaciales se pueden clasificar de acuerdo a su linealidad en: lineales y no lineales. Los lineales, a su vez, pueden clasificarse según las frecuencias que dejen pasar: los *filtros pasa bajas* atenúan o eliminan las componentes de alta frecuencia a la vez que dejan inalteradas las bajas frecuencias; los *filtros pasa altas* atenúan o eliminan las componentes de baja frecuencia con lo que agudizan las componentes de alta frecuencia; los *filtros paso banda* eliminan regiones elegidas de frecuencias intermedias. La forma de operar de los filtros lineales se basa en la utilización de máscaras que recorren toda la imagen centrando las operaciones sobre los píxeles que se encuadran en la región de la imagen original que coincide con la máscara y el resultado se obtiene mediante una computación (suma de convolución) entre los píxeles originales y los diferentes coeficientes de las máscaras.

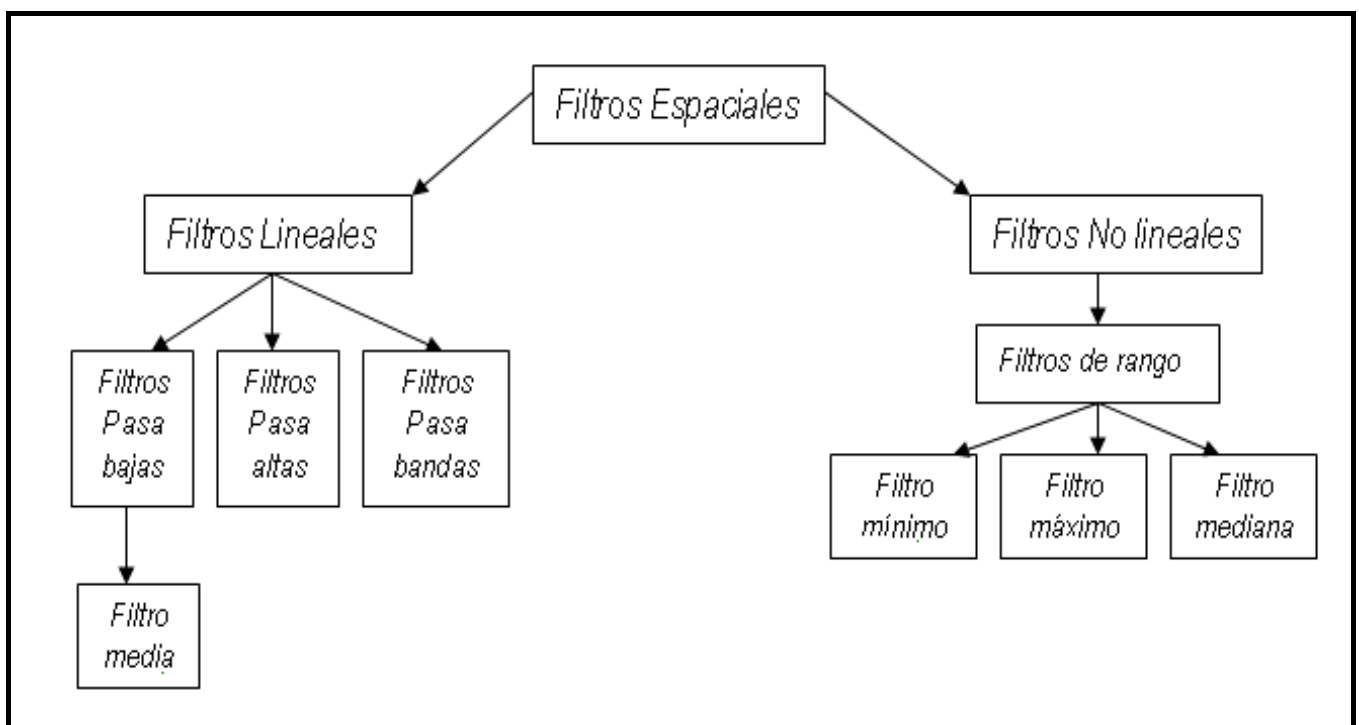


Fig.5.7 Clasificación de los filtros espaciales con base en su linealidad

Los *filtros espaciales no lineales* también operan sobre entornos. Sin embargo, su operación se basa directamente en los valores de los píxeles en el entorno en consideración. Ejemplos de filtros no lineales habituales son los filtros mínimo, máximo y de mediana que son conocidos como *filtros de rango*. El *filtro de mediana* tiene un efecto de difuminado de la imagen, permite eliminar el ruido de forma eficaz, el *filtro de máximo* se emplea para buscar los puntos más brillantes de una imagen

produciendo un efecto de erosión, y el *filtro de mínimo* se emplea con el objetivo contrario, buscar los puntos más oscuros de una imagen produciendo un efecto de dilatación.

Otra manera de clasificar los filtros espaciales, se basa en la finalidad con la que se aplican (Fig. 5.8) tenemos los *filtros de realce* (*Sharpening*) para eliminar zonas borrosas y los *filtros de suavizado* (*Smoothing*) para difuminar la imagen, también tenemos los *filtros diferenciales* que se componen de varios tipos de máscaras (Laplaciano, Prewitt, Sobel, etc.), y se utilizan para la *detección de bordes*. El proceso de detección de bordes se basa en realizar un incremento del contraste en las zonas donde hay una mayor diferencia entre las intensidades, y en una reducción de éste donde no tenemos variación de intensidad.

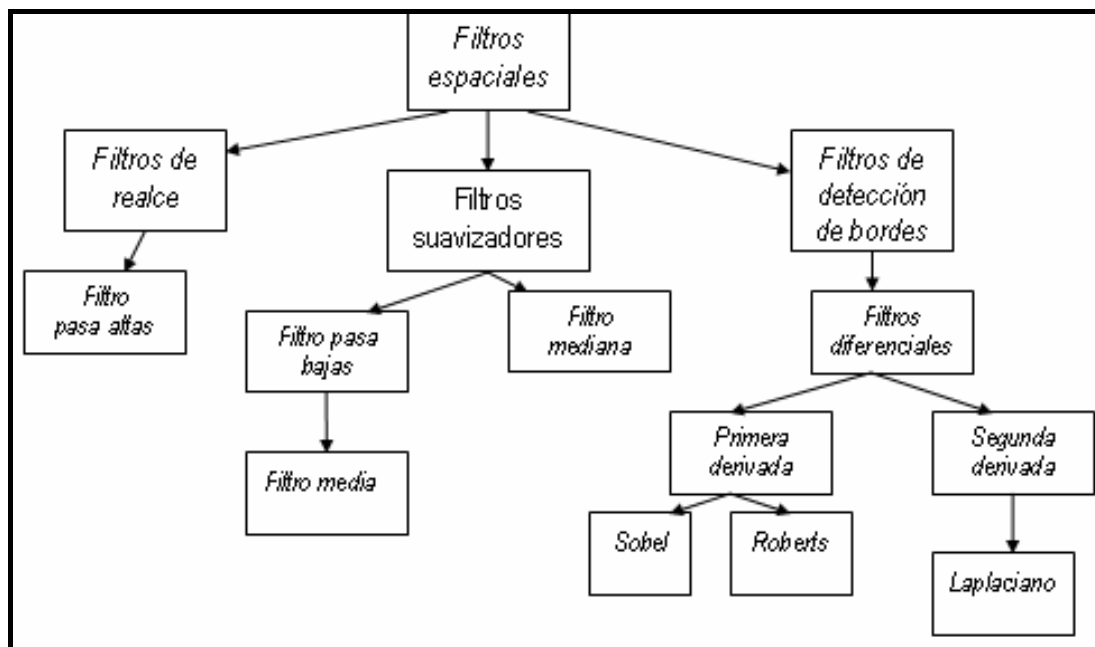


Fig.5.8 Clasificación de los filtros espaciales con base en su finalidad

5.4.1 Filtros de realce

5.4.1.1 Filtros Pasa Altas

El filtraje pasa altas tiende a realzar los detalles, produciendo una "agudización" ("*sharpering*") de la imagen, es decir, las transiciones entre regiones diferentes se tornan más nítidas. Ejemplos: límites de un campo de cultivo, lineamientos geológicos, entre otros.

Estos filtros pueden ser usados para realizar ciertas características presentes en la imagen, tales como bordes, líneas curvas o manchas. El efecto indeseado es el de enfatizar el ruido que pueda existir en la imagen.

Los filtros de realce de bordes atribuyen valores de nivel de gris para los "píxeles" de la escena original, según la influencia de sus "píxeles" vecinos. La mayor o menor influencia será función de valores (positivos, nulos o negativos) determinados por el usuario y atribuidos a los elementos de la máscara, según la configuración del filtro utilizado. A través de la combinación de estos valores de entrada o pesos, es que se obtendrá un realce mayor o menor de la escena, según direcciones preferenciales de interés.

Las máscaras de filtraje que se presentan a continuación, son utilizadas para el realce de bordes en diferentes sentidos. El nombre dado a cada una indica la dirección ortogonal preferencial en que será realzado el límite de borde. Por ejemplo, la máscara norte realza límites horizontales, y así, respectivamente, en las direcciones que se muestran en la figura siguiente (Fig.5.9):

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

Fig.5.9 Máscaras de realce de bordes.

El realce **no direccional de bordes** es utilizado cuando el usuario desea realzar bordes, independientemente de la dirección.

5.4.2 Filtros suavizadores

5.4.2.1 Filtros pasa bajas

El tipo de filtros que bloquea las altas frecuencias espaciales son los filtros de baja frecuencia o filtros pasa bajas. El filtro de baja frecuencia más simple evalúa un valor de brillantez del píxel original, en particular, BV_{in} , y los píxeles alrededor de este píxel original y arroja un nuevo valor de brillantez, BV_{out} , que es el resultado de la convolución. El tamaño de las máscaras de convolución o kernel es normalmente 3×3 , 5×5 , 7×7 o 9×9 , como se puede observar en la siguiente figura (Fig. 5.10):

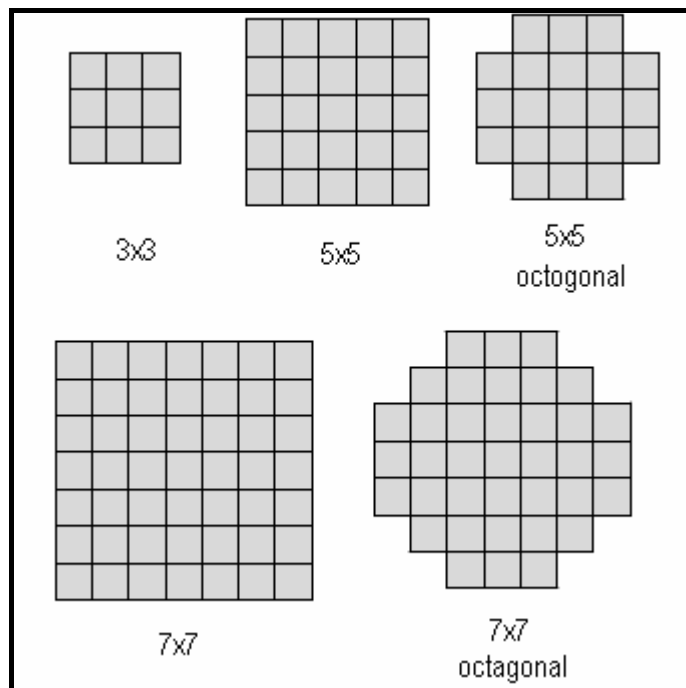


Fig. 5.10 Ejemplos de filtros convolutivos (Jensen, 1996)

El filtro de máscara 3×3 , tiene 9 coeficientes, c_i , definida de la siguiente manera:

$$\begin{array}{r} c_1 \quad c_2 \quad c_3 \\ \text{Máscara patrón:} \quad c_4 \quad c_5 \quad c_6 \\ c_7 \quad c_8 \quad c_9 \end{array}$$

Considerando por ejemplo una máscara A, los coeficientes del filtro de bajas frecuencias son todos iguales a 1:

$$\text{Máscara A} = \begin{matrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{matrix}$$

Los coeficientes, c_i , en la máscara se multiplican por los siguientes valores de brillantez (BV_i) en la imagen original:

$$\text{Máscara patrón:} \begin{matrix} c_{1 \times} BV_1 & c_{2 \times} BV_2 & c_{3 \times} BV_3 \\ c_{4 \times} BV_4 & c_{5 \times} BV_5 & c_{6 \times} BV_6 \\ c_{7 \times} BV_7 & c_{8 \times} BV_8 & c_{9 \times} BV_9 \end{matrix}$$

Donde

$$BV_1 = BV_{i-1, j-1}$$

$$BV_6 = BV_{i, j+1}$$

$$BV_2 = BV_{i-1, j}$$

$$BV_7 = BV_{i+1, j-1}$$

$$BV_3 = BV_{i-1, j+1}$$

$$BV_8 = BV_{i+1, j}$$

$$BV_4 = BV_{i, j-1}$$

$$BV_9 = BV_{i+1, j+1}$$

$$BV_5 = BV_{i, j}$$

La convolución de la máscara A y los datos originales dan como resultado una imagen filtrada, donde:

$$\begin{aligned} \text{Filtro pasabajas} &= \text{Int} \sum_{i=1}^{n=9} c_i \times BV_i / n \\ &= \text{Int} \left(\frac{BV_1 + BV_2 + BV_3 + \dots + BV_9}{9} \right) \end{aligned}$$

El porcentaje de frecuencia espacial se mueve al siguiente píxel, donde se computa el porcentaje de los valores de brillantez de los nueve valores. Esta operación se repite para cada píxel de la imagen original. Este suavizamiento de las imágenes es útil para remover el ruido generado por los sistemas electrónicos de los sensores. Sin embargo, realizando esto, la imagen se vuelve un tanto borrosa, incrementándose al aumentar el kernel. Para reducir la falta de nitidez se utilizan máscaras con diferente distribución:

$$\text{Máscara B} = \begin{matrix} 0.25 & 0.50 & 0.25 \\ 0.50 & 1.00 & 0.50 \\ 0.25 & 0.50 & 0.25 \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ \text{Máscara C} = & 1.00 & 2.00 & 1.00 \\ & 1.00 & 1.00 & 1.00 \end{matrix}$$

Usando un filtro de 3 x 3, la imagen filtrada puede resultar dos líneas y dos columnas más pequeña que la imagen original.

5.4.2.2 Filtro Media

El filtro pasa bajas más utilizado es el filtro media, que es el que efectúa el promedio de los valores del entorno. El filtro espacial de media reemplaza el valor de un píxel por la media de los valores del punto y sus vecinos. Su efecto es el difuminado o suavizado de la imagen y se aplica junto con el de mediana para eliminar ruidos. Este filtro se aplica con la siguiente máscara para un tamaño 3x3:

$$\begin{matrix} 1/9 & 1/9 & 1/9 \\ 1/9 & 1/9 & 1/9 \\ 1/9 & 1/9 & 1/9 \end{matrix}$$

Normalmente el tamaño de la máscara se toma en función de la cantidad de suavizado que queramos aplicar en cada momento. La visualización del resultado es el único medio de saber si hemos elegido el tamaño adecuado.

Se puede observar que el efecto final del filtro de la media es un suavizado de la imagen por reducción o redistribución del valor de los píxeles. Este filtro tiene el resultado opuesto a los de detección de bordes, donde el objetivo de los filtros es acentuar las diferencias, por esta razón el filtro de la media es un filtro pasa bajas. También hay que notar que este filtro no modifica la imagen en las zonas donde el valor de los píxeles es el mismo, en oposición a los detectores de bordes que asignan a estas regiones un valor de cero.

En resumen, la media, como el resto de los filtros de suavizado, suaviza los contornos y otros detalles de forma de los objetos aparezcan menos definidos.

5.4.2.3 Filtro Mediana

Este tipo de filtro se utiliza para remover ruido de la imagen. Entendemos por ruido en imágenes digitales cualquier valor de un píxel de una imagen que no se corresponde exactamente con la realidad. Cuando se adquiere una imagen digital, ésta está contaminada por ruido. El ruido se debe, la mayoría de las veces al equipo electrónico utilizado en la captación de las imágenes.

Existen dos tipos de ruido:

- *Ruido gaussiano*: Se caracteriza por tener un espectro de energía constante para todas las frecuencias. Cuando se presenta este problema, el valor exacto de cualquier píxel es diferente cada vez que se captura la misma imagen. Este efecto, suma o resta un determinado valor al nivel de gris real y es independiente de los valores que toma la imagen.
- *Ruido impulsivo*: Se caracteriza por la aparición de píxeles con valores arbitrarios normalmente detectables porque se diferencian mucho de sus vecinos más próximos.

El filtro mediana es útil para remover ruido impulsivo .

En el filtrado de mediana, el nivel de gris de cada píxel se reemplaza por la mediana de los niveles de gris en un entorno de este píxel, en lugar de por la media (Fig. 5.11). Recordar que la mediana M de un conjunto de valores es tal que la mitad de los valores del conjunto son menores que M y la mitad de los valores mayores que M , es decir en un conjunto ordenado de mayor a menor o viceversa, sería el valor de la posición central.

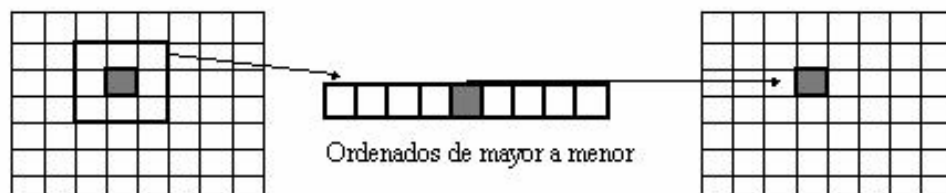


Fig. 5.11. Filtro mediana

El filtro de la mediana no puede ser calculado con una máscara de convolución, ya que es un filtro no lineal. Podemos ver cómo este tipo de filtro elimina totalmente el punto que tenía un valor muy diferente al resto de sus vecinos. Como se selecciona el valor de centro, el filtrado de mediana consiste en forzar que puntos con intensidades muy distintas se asemejen más a sus vecinos, por lo

que observamos que el filtro de mediana es muy efectivo para eliminar píxeles cuyo valor es muy diferente del resto de sus vecinos, eliminando así, ruido de la imagen.

Como se puede observar si comparamos la imagen original de la ventana de la componente 1 con esta última imagen (Fig. 5.12) obtenida al aplicar el filtro Mediana, tenemos una notable mejora en la calidad de nuestra imagen, ya que este tipo de filtros se encarga de eliminar todo el ruido presente en la imagen.

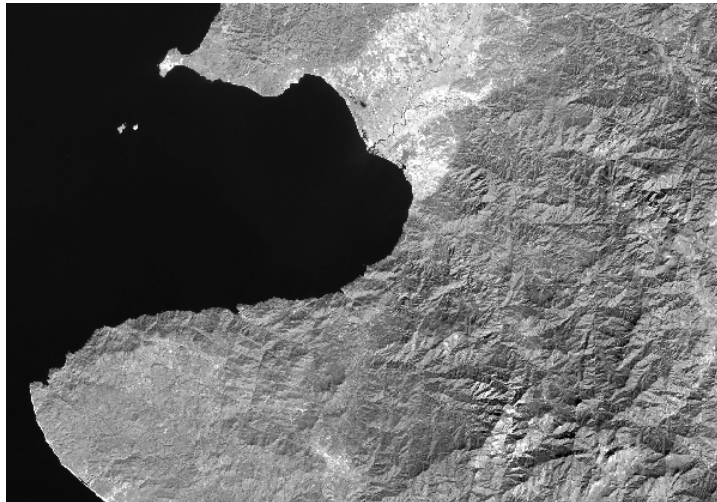


Fig. 5.12 Ventana de la componente 1 con filtro Mediana

En la categoría de filtraje no lineal, están disponibles los operadores para detección de bordes y filtros morfológicos.

5.4.3 Filtros para detección de bordes

Los filtros utilizados para la detección de bordes son *filtros diferenciales*, se basan en la derivación o diferenciación. Dado que el promediado de los píxeles de una región tiende a difuminar o suavizar los detalles y bordes de la imagen, y esta operación es análoga a la integración, es de esperar que la diferenciación tenga el efecto contrario, el de aumentar la nitidez de la imagen, resaltando los bordes.

5.3.3.1 Derivada de primer orden.

Utilizamos máscaras de 3x3 o más grandes, entre más grandes los errores producidos por efectos del ruido son reducidos mediante medias locales tomadas en los puntos en donde se

superpone la máscara. Las máscaras normalmente tienen tamaños impares, de forma que los operadores se encuentran centrados sobre los puntos en donde se calculan los gradientes, mediante las siguientes expresiones:

$$\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} = \Delta_x = \frac{f(x + d_x, y) - f(x, y)}{dx}$$
$$\frac{\partial f(x, y)}{\partial y} = \Delta_y = \frac{f(x + d_y, y) - f(x, y)}{dy}$$

Los operadores basados en la derivación de primer orden más utilizados son los siguientes:

- **Operador de Sobel**
- Operador de Roberts

Operador de Sobel

Se aplica sobre una imagen digital en escala de grises, calcula el gradiente de la intensidad de brillo de cada píxel dando la dirección del mayor incremento posible (de negro a blanco) además calcula el monto de cambio en esa dirección, es decir, devuelve un vector. Lo que el resultado nos muestra es qué tan contrastante es el cambio de un punto a otro, así como los puntos que presentan bordes y la dirección que presentan estos. El vector obtenido es bidimensional y sus componentes están dadas por las primeras derivadas de las direcciones verticales y horizontales. Para cada punto de la imagen, el gradiente del vector apunta en dirección del incremento máximo posible de intensidad, y la magnitud del gradiente del vector corresponde a la cantidad de cambio de intensidad en esa dirección. Lo anterior implica que el resultado de aplicar el operador Sobel sobre región de una imagen con intensidad de brillo constante es un vector cero, y el resultado de aplicarlo en un punto sobre un borde es un vector que apunta cruzando el borde (perpendicular) en sentido de los puntos más oscuros hacia los más claros.

El operador utiliza dos kernels de 3×3 elementos para aplicar convolución a la imagen original para calcular aproximaciones a las derivadas, un kernel para los cambios horizontales y otro para las

verticales, éstos se multiplican por la matriz original para obtener nuestro vector. Los kernels son los siguientes:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} * A \qquad G_y = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 2 \end{bmatrix} * A$$

Donde G_x , es la componente horizontal, G_y la vertical, y A es la de la imagen original. El resultado de esta aplicación, en cada "píxel", es dado por:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

Donde G es el valor de nivel de gris correspondiente a la localización del elemento central de la máscara. También podemos obtener la dirección del gradiente mediante:

$$\theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right)$$

Donde, por ejemplo, θ es 0 para bordes verticales con puntos más oscuros al lado izquierdo. A continuación podemos ver un ejemplo (Figs. 5.13):



Fig.5.13a Imagen original



Fig.5.13b Cálculo del gradiente X con el operador Sobel



Fig.5.13c Cálculo del gradiente Y con el operador Sobel



Fig.5.13d Imagen final filtrada con el operador Sobel

Operador de Roberts

El operador gradiente de Roberts es el método no lineal más simple utilizado para la detección de bordes. Presenta la desventaja que, dependiendo de la dirección, ciertos bordes son más realzados que otros, inclusive teniendo igual magnitud. Como resultado de su aplicación, se obtiene una imagen con altos valores de niveles de gris, en regiones de límites bien definidos y valores bajos en regiones de límites suaves, siendo 0 para regiones de nivel de gris constante (Fig.5.14).



Fig. 5.14a Imagen original



Fig.5.14b Imagen final filtrada con el operador Roberts

5.4.3.2 Derivada de segundo orden

Operador Laplaciano

El *operador Laplaciano* se define como una *derivada de segundo orden* y presenta una sensibilidad más grande frente al ruido y una ligera incapacidad para determinar la dirección de los bordes. Está expresado de la siguiente manera:

$$\nabla^2 f(x, y) = \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2}$$

Aunque el Laplaciano responde a las transiciones de intensidad, rara vez se utiliza en la práctica para la detección de bordes, pues tiene los siguientes inconvenientes:

- Los operadores basados en la primera derivada son sensibles al ruido en imágenes. El Laplaciano aún lo es más.
- Genera bordes dobles.

- No existe información direccional de los ejes detectados.

El Laplaciano es un buen ejemplo de un operador de derivada de segundo orden, se distingue de los otros operadores porque resalta los bordes en todas las direcciones. El operador Laplaciano producirá bordes más agudos que la mayoría de las otras técnicas, estos toques de luz incluyen pendientes positivas y negativas de la intensidad.

El borde Laplaciano de una imagen puede ser obtenido realizando una convolución con máscaras (Fig. 5.15) tales como:

1	-2	1	-1	-1	-1	0	-1	0
-2	4	-2	-1	8	-1	-1	4	-1
1	-2	1	-1	-1	-1	0	-1	0
a)			b)			c)		

Fig.5.15. Ejemplo de máscaras para el uso del Laplaciano

La imagen resultante tiene un cambio del signo en los bordes de la imagen. Estos cambios de signo son referidos como pasos cero. Después del operador de convolución, la imagen se debe procesar para encontrar estos pasos cero y para fijar los píxeles de la salida.

Las máscaras del operador Laplaciano coinciden con las máscaras de filtro pasa altas. Esto se debe a que el Laplaciano detecta los bordes, es decir, las altas frecuencias de la imagen, sin considerar la orientación, por lo que además de utilizarse para la detección de bordes sirve también para el filtrado pasa altas de imágenes.

5.4 Diagrama de rosas

Una roseta o diagrama de rosas es un diagrama sencillo que nos permite visualizar las direcciones de los rumbos generales de estructuras tabulares (diques, vetas) y de planos tectónicos (diaclasas, fallas). En este tipo de diagrama no hay información sobre el echado o la dirección de inclinación. Se puede considerar este diagrama como un histograma redondo. Los rangos de rumbo

se ubican al margen del círculo desde arriba (Norte o 0°) hacia abajo (Sur o 180°) en sentido de reloj. La cantidad de los datos de un rango se encuentra en el eje desde el centro (como 0%) hacia al margen (como 100%). Únicamente es necesario calcular la mitad de los rangos (el medio círculo) porque el rumbo es un elemento bidireccional y automáticamente cubre el rango opuesto es decir el rango de diferencia de 180° (lado opuesto) se marca igualmente.

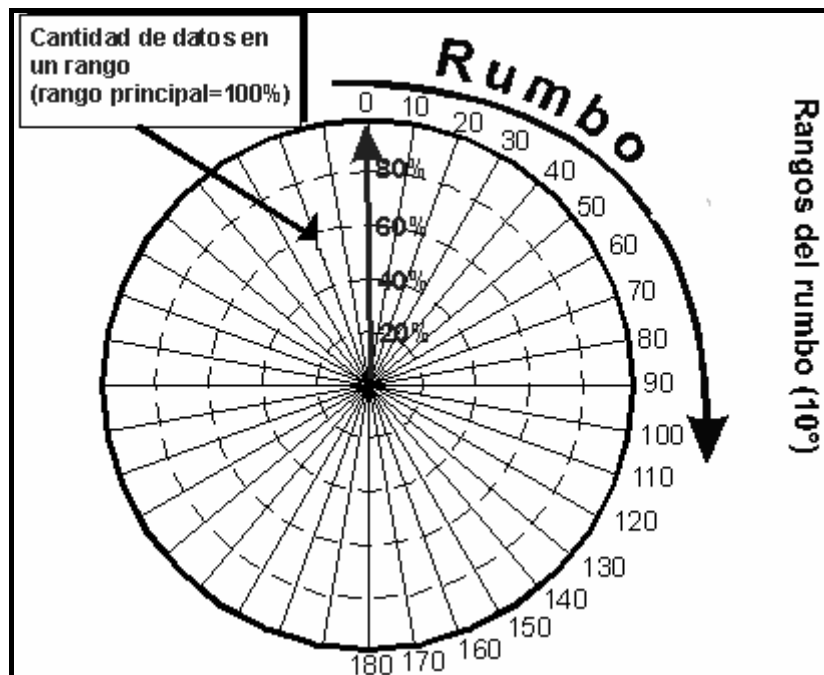


Fig. 5.16 Diagrama de Rosas

Capítulo 6

Resultados

6.1. Imagen Satelital

Las imágenes que obtuve como resultado del procesamiento mencionado en el capítulo anterior y que se considere de utilidad para realizar el análisis de la zona, son las que se muestran a continuación (Figs. 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5). A todas éstas se les aplicaron técnicas de realce de contraste (stretch lineal), componentes principales, filtros suavizadores (mediana) y filtros direccionales. Se pueden observar los lineamientos presentes en cada una de ellas que, dependiendo de la dirección, resultan más o menos evidentes.

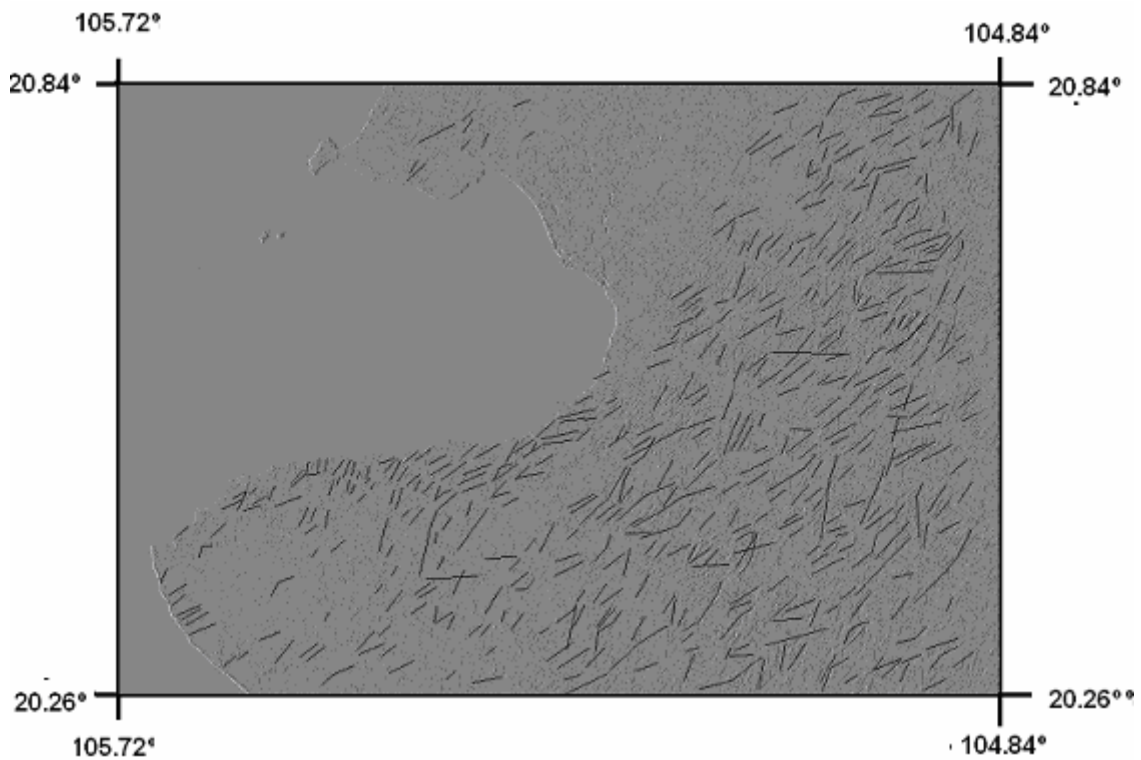


Fig. 6.1. Imagen del filtro direccional E

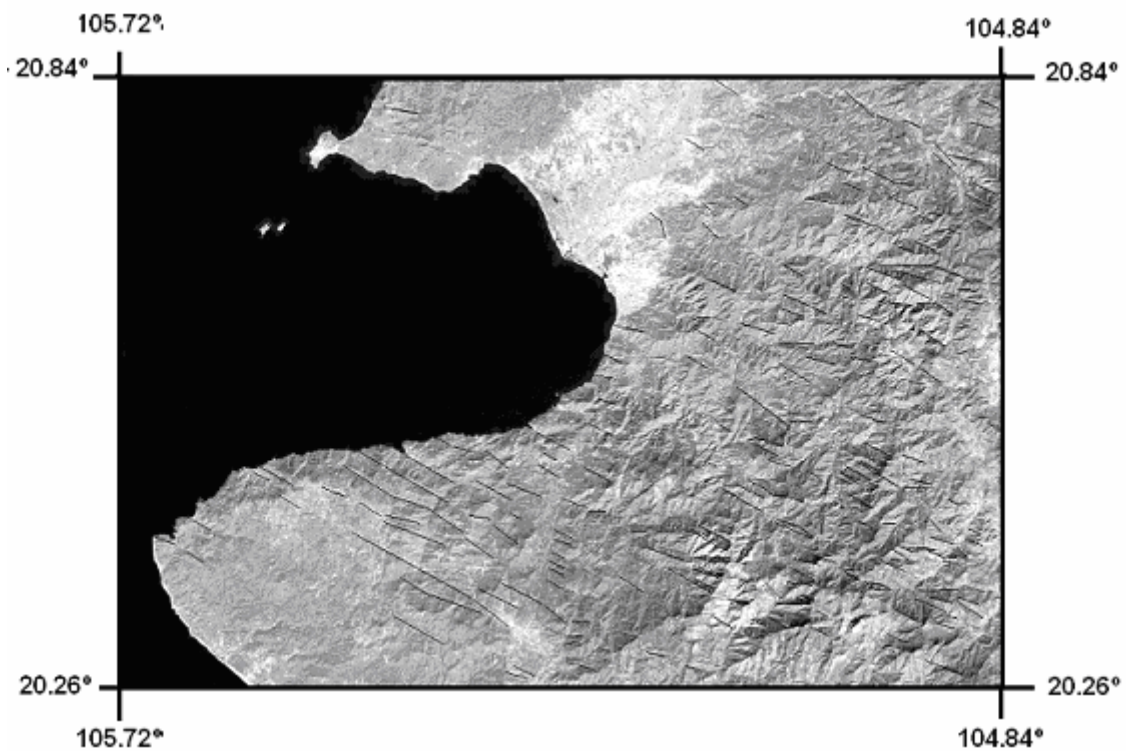


Fig.6.2 Imagen del filtro direccional NW

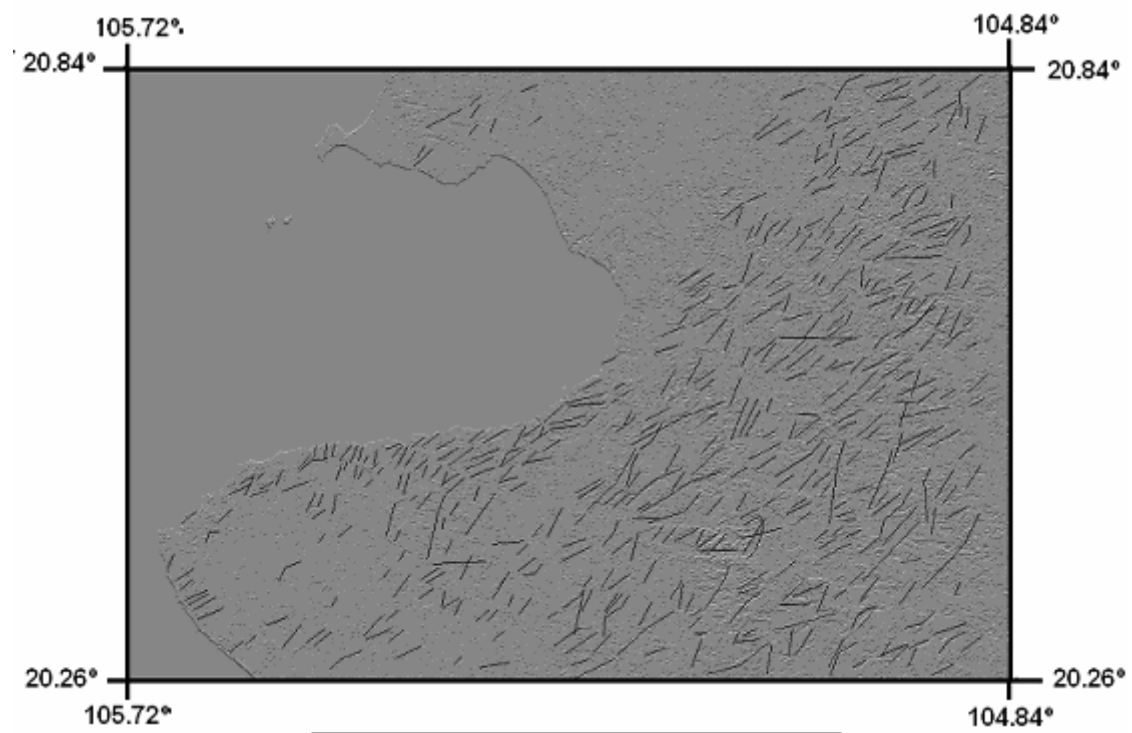


Fig. 6.3. Imagen del filtro direccional NS

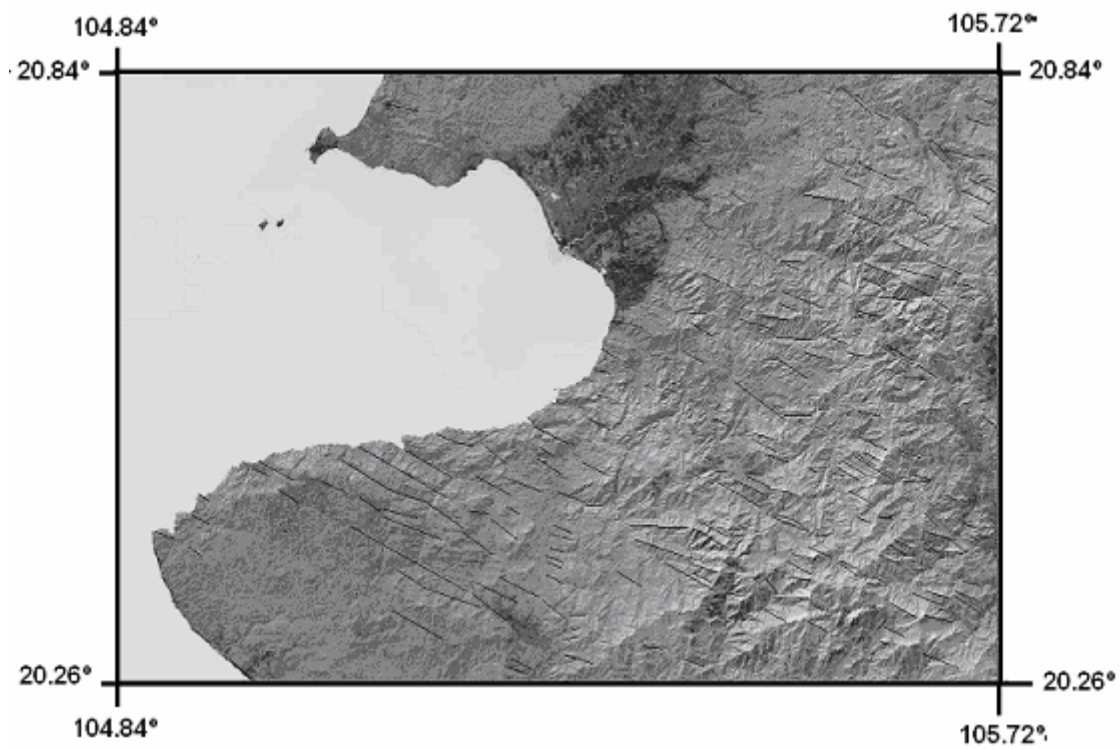


Fig. 6.4. Imagen del filtro direccional NE

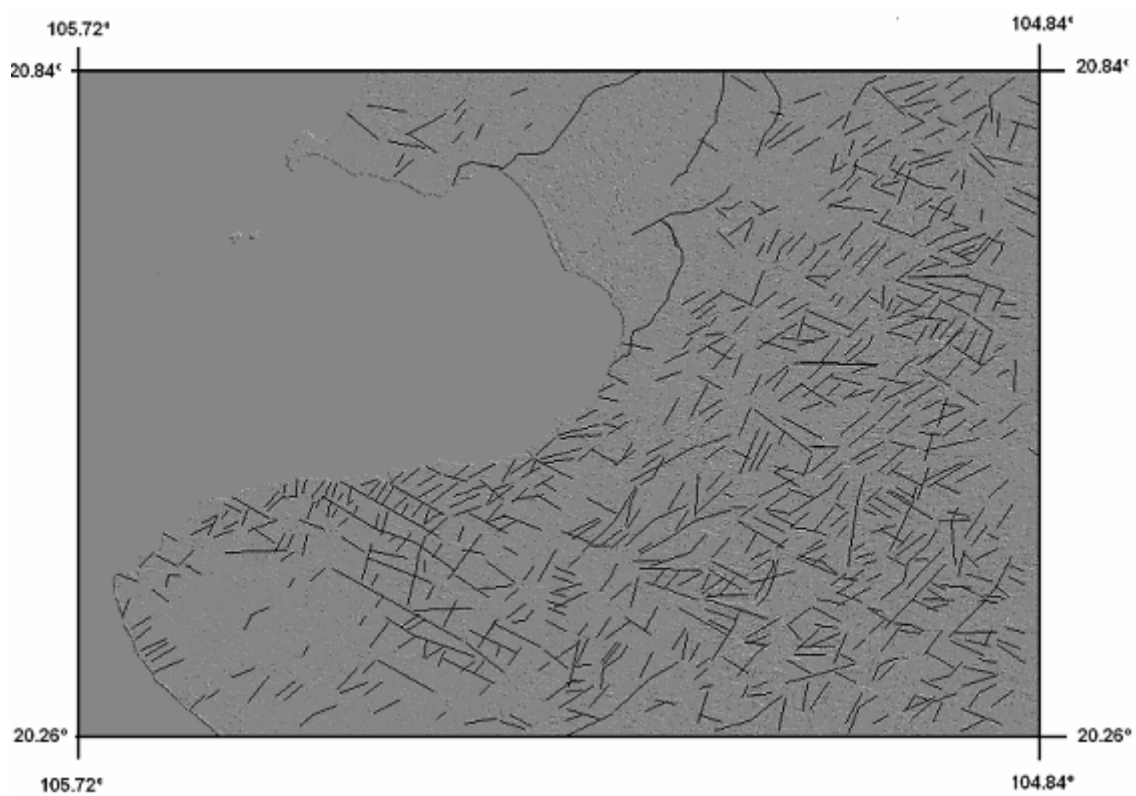


Fig. 6.5. Imagen que presenta los lineamientos obtenidos con todos los filtros.

6.2. Modelo digital

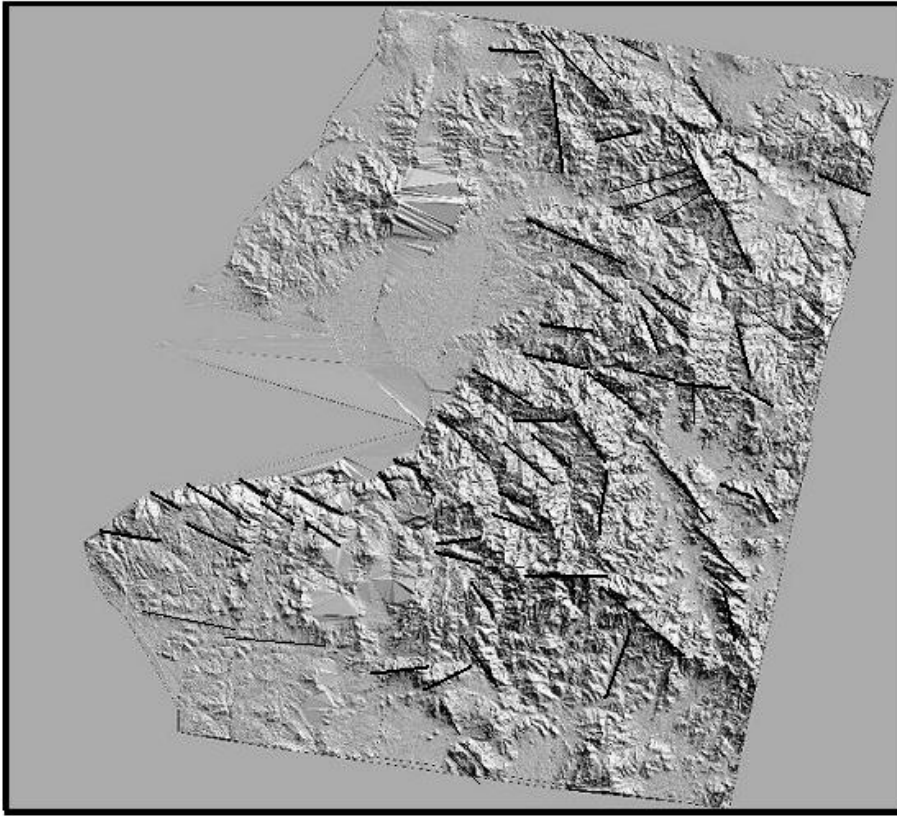


Fig.6.6. Modelo digital del terreno con los principales lineamientos marcados

Capítulo 7

Discusión de resultados

Con base en los resultados obtenidos mediante el procesamiento de las imágenes satelitales y del modelo digital del terreno, se construyeron los diagramas de rosas con los lineamientos que se observan (Fig. 7.1)

Se dividieron en tres categorías según su magnitud: las menores de 5 km, las que tienen una magnitud mayor a 5 km y menor a 10 km, y las mayores de 10 km.

Esta separación es útil para determinar cuál es la dirección de los lineamientos principales y cuál la de los lineamientos secundarios.

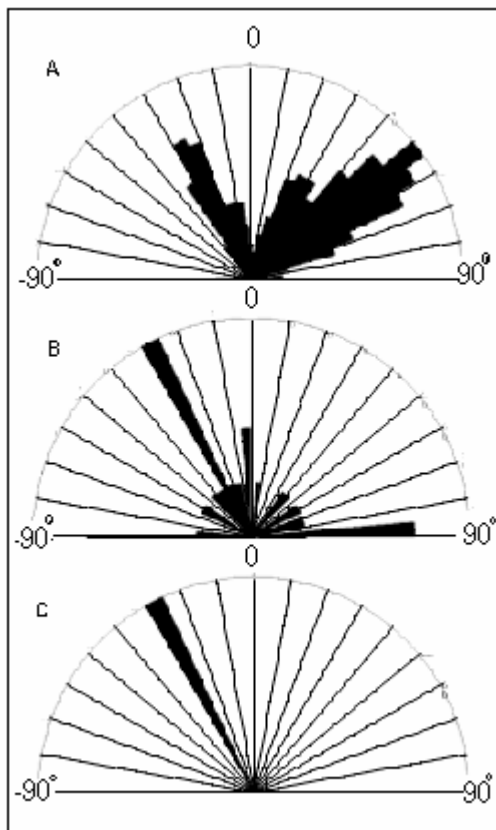


Fig. 7.1 Diagrama de rosas. **A.** Lineamientos menores a 5 km con dirección principal NE-SW y secundaria NW-SE. **B.** Lineamientos entre 5 y 10 km con dirección principal NW-SE. **C.** Lineamientos mayores a 10 km con dirección NW-SE

El primer diagrama de rosas (A) corresponde a los lineamientos pequeños, menores a 5 km o secundarias. Como se puede observar, la dirección que presentan casi todos estos lineamientos es de aproximadamente 50° NE-SW, mientras que en el mismo diagrama se observa un porcentaje menor en dirección 30° NW-SE, los cuales son prácticamente perpendiculares a los primeros.

La segunda categoría, que corresponde a los lineamientos de 5 a 10 km de longitud (B), presenta una dirección predominante de 30° NW-SE. Sin embargo, se pueden observar abundantes lineamientos en distintas direcciones; es decir, aunque existe una dirección principal, la tendencia de una gran cantidad de lineamientos no está bien definida.

Los lineamientos de mayor longitud se muestran en el tercer diagrama, el número de lineamientos en esta dirección es pequeño, y las dimensiones que tienen son de 13 km. aproximadamente. La dirección que presentan es de 30 ° NW-SE.

Los resultados obtenidos por Urrutia-Fucugauchi y González-Morán (2006) Fig. 7.2. y los presentados en este trabajo establecen que los lineamientos principales presentan una dirección NW-SE y los secundarios y de menor magnitud se encuentran perpendiculares a éstos. La dirección que presentan estos lineamientos coincide con la dirección de los grábenes Atenguillo, Mascota, y Talpa, (Fig. 7.2). También coinciden con la dirección del graben Tepic-Zocoalco, en el cual los volcanes se encuentran alineados también en dirección NW-SE, desde Guadalajara (SE) hasta Tepic (NW).

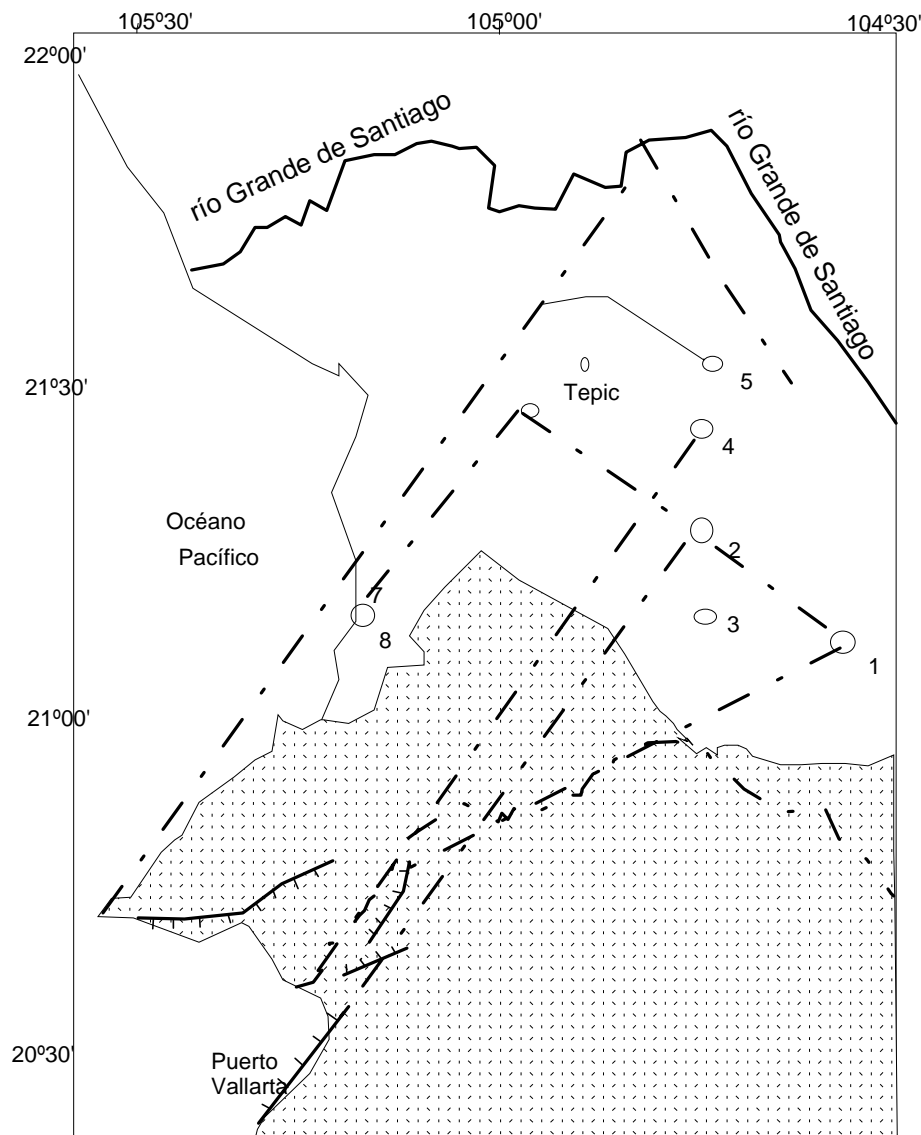


Fig. 7.2 Representación esquemática de los principales lineamientos interpretados por el análisis de anomalías aeromagnéticas y centros volcánicos en los zona de los grábenes Tepic-Zacoalco y Ameca. La alineación de los lineamientos es de N35W y de N60E. Los círculos representan los principales volcanes (1=tequila, 2=Ceboruco, 3=Cerro Grande San Pedro, 4=Sanganguey, 5=Las Navajas, 6=San Juan, 7=La Tigra, 8=Ceboruco) Tomado de Urrutia-Fucugauchi y González-Morán, 2006)

Todo esto indica que se tiene una continuidad en los patrones de las estructuras principales en la región. Estudios de batimetría y magnetimetría realizados en la zona marina de Bahía de Banderas, reafirman esta hipótesis; se observó que existe un cañón submarino de gran profundidad pero que no muestra anomalías magnéticas, además de que el cañón encontrado se encuentra muy sedimentado, por lo que se puede pensar que no corresponde a un proceso actual sino que los procesos que lo originaron puede probablemente estar relacionado con a la formación del Golfo de California (*Prol-Ledesma et. al., en preparación*).

Conclusiones

La tectónica del oeste de México es muy compleja debido a que involucra muchos procesos tectónicos y volcánicos, este trabajo es un aporte importante en el proceso de entender lo que ocurre en esta región. Para poder elaborar conclusiones acertadas, es necesario realizar un amplio estudio de la geología y geotectónica del área, para entender así los procesos que se encuentran involucrados y en base a estos elaborar correlaciones con los resultados obtenidos.

La percepción remota es una herramienta muy útil para realizar estudios de manera general sobre un área, sin que resulte necesario invertir tanto tiempo ni dinero, en realizar un trabajo de campo más detallado, en este caso, nos permitió analizar los diversos lineamientos para realizar una valoración

Es importante considerar el objetivo deseado para tener una resolución espacial y espectral que nos sirva para obtener resultados satisfactorios, esto es poder observar en la imagen, las características que estamos buscando. En caso de tener una imagen muy grande es posible perder detalle de la zona de estudio, y de igual manera una imagen de menor tamaño, únicamente nos permite realizar un estudio local. Cada una de las bandas de nuestro sensor nos permite trabajar con características distintas del terreno, en este caso, el Landsat TM, con sus 7 bandas y su área de 30 x 30 Km. nos permite analizar el área de manera adecuada.

Igualmente es necesario realizar una selección adecuada de las técnicas de procesamiento que se aplicaran, el realce de contraste aplicado en la imagen nos permitió visualizar las características de la imagen con mayor facilidad.

Debido a que buscamos resaltar los lineamientos en la imagen, la técnica de componentes principales, resulta útil para representar la imagen tomando como ejes de coordenadas las características de la imagen que resultan más representativas. La componente 1 es la que recopila mayor información, y por lo tanto resulto útil trabajar con esta imagen.

La aplicación de filtros de realce espacial es fundamental en este trabajo, ya que son útiles para realzar los bordes y lineamientos, que es lo que estamos buscando. Dentro de estos filtros se aplicaron los filtros suavizadores, que mediante un efecto de difuminado reduce el ruido de la imagen, se utilizo este sobre el media, ya que el media también realiza un suavizado de los bordes.

Por ultimo, se utilizaron los filtros de direccionales, que son una particularidad de los filtros pasa altas, que tienden a realzar el detalle, haciendo los bordes mas nítidos. Debido a la orientación

de los lineamientos que se encuentran en la imagen, las direcciones en las que se obtuvo mayor información fueron: E, NW, NS, NE, así como en el modelo digital del terreno.

El uso del diagrama de rosas, como herramienta estadística, resulta sumamente útil para visualizar los resultados obtenidos de una manera ordenada y clara.

La zona de estudio presenta gran cantidad de lineamientos con un patrón de orientación NW-SE que se relaciona fácilmente con los grábenes cercanos (Atenguillo, Talpa, Mascota y Vallarta) y la dirección del graben Tepic-Zacoalco, así como con los patrones de alineación de los volcanes de la zona; por esto, se puede pensar que existe un movimiento distensivo general, que sigue esta dirección; sin embargo, en esta área, estos lineamientos no representan un cambio abrupto en la tectónica general de la zona, por lo que no se les puede asociar directamente con ningún límite entre placas, únicamente se puede confirmar que los lineamientos de esta área siguen el patrón de la dirección de los movimientos tectónicos de la zona. Mediante este análisis se puede observar que esta zona no es evidente la determinación de un límite Norte del Bloque Jalisco, debido a la continuidad de los patrones en los lineamientos.

Bibliografía

- ALLAN, J.F. 1985. Sediment depth in the northern Colima graben from 3-D interpretation of gravity. *Geofísica Internacional*, 24, p.21-30
- ALVAREZ, R Banderas Rift Zone: A plausible NW limit of the Jalisco Block
Geophysical Research Letters, 29, 20, p.55-1- 55-4.
- BANDY, W. L., 1992. Geological and geophysical investigation of the Rivera- Cocos plate boundary; implication for plate fragmentation: College Station, Texas A&M University
- BANDY, W., V. KOSTOGLODOV, A. HURTADO-DÍAZ M. MENA. 1999. Structure of the southern Jalisco subduction zone, Mexico, as inferred from gravity and seismicity, *Geofísica Internacional (1999)*, Vol., 38, num. 3, p. 127-136
- BARRIER, E., BOURGOIS, J., MICHAUD, F., 1990, Le système de rifts actifs du point triple de Jalisco: vers un proto-golfe de Jalisco: *Compte Rendue Académie des Sciences du Paris*, v. 310, p. 1513–1520.
- BOURGOIS, J., RENARD, V., AUBOUIN, J., BANDY, W., BARRIER, E., CALMUS, T., CARFANTAN, JC., GUERRERO, J., MAMMERICKX, J., MERCIER de LEPINAY, B., MICHAUD, F. et SOSSON M., 1988 Fragmentation en cours du bord Ouest du Continent Nord Américain : Les frontières sous-marines du Bloc Jalisco (Mexique) *Compte Rendue Academie de Sciences de Paris*, 307, serie II, p.1121-1130
- DEMANT, A., 1978. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación: *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista 2*, p. 172-187
- EISSLER, H., MCNALLY, K.C., 1984. Seismicity and tectonics of the Rivera plate and implications for the 1932 Jalisco, Mexico, earthquake. *J. Geophys. Res.* 89 (B6), p.4520–4530.
- FERRARI, L., 2000 Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, V.III p.84-92
- FERRARI, L., 1995. Miocene shearing along the northern boundary of the Jalisco block and the opening of the southern Gulf of California: *Geology*, v. 23, p. 751–754.
- FERRARI, L., PASQUARÉ, G., VENEGAS, S., CASTILLO, D., ROMERO, F., 1994. Regional tectonics of western Mexico and its implications for the northern boundary of Jalisco Block. *Geofísica Internacional*. 33, p.139-151.
- FERRARI, L., CONTICELLI, S., VAGELLI, G., PETRONE, C.N., MANETTI, P., 2000. Late Miocene vulcanism and intra-arc tectonics during the early development of the Trans-Mexican Volcanic Belt : *Thecnophysics*, v.318, p.161-185

- GARDUÑO, V.H., TIBALDI, A., 1991. Kinematic evolution of the continental active triple junction of the western Mexican Volcanic Belt. *Compte Rendue Académie des Sciences du Paris, Série II*, 135–142.
- GRAJALES-NISHIMURA, M., LOPEZ-INFANZÓN, M., 1983. Estudio Petrogenético de las rocas ígneas y metamórficas del Prospecto Tomatlán-Guerrero-Jalisco, Proyecto C-1160: *Instituto Mexicano del Petroleo Open File Report*.
- JENSEN, J., R. Introductory digital image processing, a remote sensing perspective. *Prentice Hall, Segunda edición, United States of America*, 1996.
- KOSTOGLOV V., BANDY W.L., 1995. Seismotectonic constraints on the convergence rate between the Rivera and the North American plates: *Journal of Geophysical Research*, v. 100, p. 17977-17989
- LARSON, R. L., 1972. Bathymetry, magnetic anomalies, and plate-tectonic history of the mouth of the Gulf of California: *Geological Society of America Bulletin*, v. 83, p. 3345-3360.
- LILLESAND, T., M., Y KIEFER, R., W. Remote sensing and image interpretation. *John Wiley & Sons, Inc. Tercera edición. U. S. A.*, 1994.
- LUHR, J.F, NELSON, S., ALLAN J.F. et CARMICHAEL S., 1985. Active rifting in South-western Mexico: Manifestations on an incipient eastward spreading-ridge jump. *Geology* 13, 54-57
- MAMMERICKX, J., KLITGORD K.D., 1982. Northern East Pacific Rise: Evolution from 25 m.y. B.P. to the present: *Journal of Geophysical Research*, v. 87, p.6751-6759
- MICHAUD, F., QUINTERO, O., BARRIER, E., BOURGOIS, J., 1991. La frontière Nord du Bloc Jalisco (Ouest Mexique): localisation et évolution de 13 Ma à l'actuel: *Compte Rendue Académie des Sciences du Paris*, v. 312, p. 1359–1365.
- MICHAUD, F., MERCIER DE LEPINAY, B., SAINT-MARC, P., SOSSON, M., VILLENEUVE, M., BOURGOIS, J., CALMUS, T., 1995, Neogene subsidence event along the Acapulco trench off Manzanillo, (Mexico 18–198N): *Eos (Transactions, American Geophysical Union)*, v. 76, no. 46, p. 535.
- MINSTER, J.B., JORDAN, T.H., 1978, Present-day plate motions: *Journal of Geophysical Research*, v. 83, p.5331-5354
- NIXON G.T., 1982. The relationship between Quaternary volcanism in central Mexico and the seismicity and structure of subducted ocean lithosphere: *Geological Society of America Bulletin*, v. 93, p.514-523.

- NÚÑEZ-CORNÚ, F.J., MARTA R.L., NAVA P. F.A., REYES-DÁVILA G., SUÁREZ-PLASCENCIA C., 2002. Characteristics of seismicity in the coast and north of Jalisco Block, Mexico. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 132, p.141–155
- NÚÑEZ-CORNÚ, F.J., PROL-LEDESMA, R.M., CUPUL-MAGAÑA, A., SUÁREZ-PLASCENCIA, C., 2000. Near shore submarine hydrothermal activity in Bahía de Banderas, western Mexico. *Geofísica Internacional* 39 (2), 171–178.
- PACHECO J.F., SYKES L.R., 1992. Seismic moment catalog of large shallow earthquakes, 1990 to 1989: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 82, p. 1306-1349.
- RIGHTER, K., I.S.E. CARMICHEAL, 1992. Hawaiiites and related lavas in the Atenguillo graben, western Mexican volcanic belt. *Geological Society of America Bulletin*, 104, 1592-1607
- ROSAS-ELGUERA, J., FERRARI, L., GARDUÑO-MONROY, V., URRUTIA-FUCUGAUCHI, J., 1996. Continental boundaries of the Jalisco Block in the Pliocene—quaternary kinematics of western Mexico. *Geology* 24 (10), 921–924.
- SABINS, F., F., Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews* 14. USA, 1999.
- SABINS, F., F. Remote sensing. Principles and interpretation. *JR, W. H. Freeman and Company, Segunda edición*. U.S.A. 1987.
- SCHAAF, P., MORAN-ZENTENO, D., HERNANDEZ-BERNAL, M., SOLIS PICHARDO, G., TOLSON, G., KÖHLER, H., 1995, Paleogene continental margin truncation in southwestern Mexico: Geochronological evidence: *Tectonics*, v. 14, p. 1339–1350.
- SCLATER, J.G, ANDERSON, R. N, BEIL, M.L., 1971. The elevation of the central eastern Pacific. *Journal of Geophysical Research*, v.76, p.888-915
- SERPA, L., S. SMITH, C. KATZ, C. SKIDMORE, R. SLOAN, T. PAVLIS, 1992. A geophysical investigation of the southern Jalisco block in the state of Colima, Mexico. *Geofísica Internacional*, 31, 475-492.
- WALLACE, P., CARMICHAEL, I. S. E., 1989, Minette lavas and associated leucitites from the western front of the MVB: petrology, chemistry and origin:
- STOCK, J. M., HODGES, K. V., 1989, Pre-Pleistocene extension around the Gulf of California and the transfer of Baja California to the Pacific Plate: *Tectonics*, 8, 99-115.
- NIETO-OBREGÓN, J., DELGADO-ARGOTE, L., DAMON, P. E., 1985, Geochronologic, petrologic, and structural data related to large morphologic features between the Sierra Madre Occidental and the Mexican volcanic belt: *Geofísica Internacional*, 24, 623-663.

Referencias electronicas

- <http://www.sahara.it/bm/saharaThree/tecnica/navigazione/landsat-tm-landsat-etm.shtml>
- <http://pubs.nrc-cnrc.gc.ca/cjrs/cjrs.html>
- <http://ww.plata.uda.cl/minas/apuntes/Geologia/EXPLORAC/TEXT/02026satélite.html>
- Universidad de Valladolid
<http://caece.edu.ar/tea/Apuntes/landsat-analisis-visual.pdf>
- http://www.sbg.ac.at/geo/idrisi/wwwtutor/s_tools3.htm
- Union Geofisica Mexicana
--<http://www.ugm.org.mx/pdf/geos01-3/GET01-3.pdf#search=%22jorge%20nieto%20obregon%20bloque%20jalisco%22>
--<http://www.ugm.org.mx/pdf/geos00-1/Escalona-Alcazar00-1.pdf>
- Rial, P., E., y González, L. MANUAL DE PRACTICAS CON IDRISI. Laboratorio de Teledetección y S.I.G., E.E.A. Santa Cruz. Convenio INTA-UNPA-CAP, 1999
<http://www.inta.gov.ar/santacruz/info/documentos/teledet/ldrisi.pdf#search=%22hard%20classifiers%22>
- Departamento de Electrónica y Sistemas - Facultad de Informática de A Coruña
<http://www.des.udc.es/~adriana/TercerCiclo/CursoImagen/curso/web/Indice.html>
- Analisis de Componentes principales. Autor: **Autor:** Manuel Terrádez Gurrea (mterradez@uoc.edu).
http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Componentes_principales.pdf
- Satellite imaging corporation.
<http://www.satimagingcorp.es/svc/imaging.html>