

TESIS DEFENDIDA POR
José Juan Chanes Martínez
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITE

Dr. Mario González Escobar
Director del Comité

Dra. Joann Miriam Stock
Miembro del Comité

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
Miembro del Comité

Dr. Jesús Arturo Martín Barajas
Miembro del Comité

Dr. Marco Antonio Pérez Flores
Miembro del Comité

M. en C. Alejandro Hinojosa Corona
Miembro del Comité

Dr. Antonio González Fernández
*Coordinador del programa de posgrado
en Ciencias de la Tierra*

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
Director de Estudios de Posgrado

07 de Junio de 2012

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**Características estructurales y sismoestratigráficas en un sector del delta
del Río Colorado, noroeste de México, a partir de Sísmica de Reflexión**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

JOSÉ JUAN CHANES MARTÍNEZ

Ensenada, Baja California, México, Junio de 2012.

RESUMEN de la tesis de **José Juan Chanes Martínez**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en CIENCIAS DE LA TIERRA con orientación en Geofísica Aplicada. Ensenada, Baja California, México, Junio 2012.

CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES Y SISMOESTRATIGRÁFICAS EN UN SECTOR DEL DELTA DEL RÍO COLORADO, NOROESTE DE MÉXICO, A PARTIR DE SÍSMICA DE REFLEXIÓN.

Resumen aprobado por:

Dr. Mario González Escobar
Director de Tesis

El procesado e interpretación de datos de sísmica de reflexión, auxiliados con información geofísica complementaria, permitió interpretar la estructura y estratigrafía del sector SW del delta del Río Colorado. Este estudio cubre un sector de la falla transformante Cerro Prieto, que es la frontera activa entre las placas tectónicas del Pacífico y Norteamérica. El acceso a información propiedad de Petróleos Mexicanos, hizo posible este trabajo. Los objetivos consistieron en el proceso, interpretación de las fallas principales y de los límites de secuencias sísmoestratigráficas. Los resultados muestran una gran densidad de fallas en la zona de falla Cerro Prieto, en donde la mayoría están sepultadas por sedimentos. Una de las principales estructuras observadas y ya conocida es la falla Cerro Prieto. Su interpretación al SE coincide con el trazo ya reportado en la literatura, mientras al norte se intercepta con otra estructura de rumbo 20° al NW que en éste trabajo se denomina falla Palmas. En la zona de falla Cerro Prieto se identificaron las fallas mayores: Palmas, Mesa, Indiviso-S y Pangas Viejas todas estas desconocidas hasta ahora y localizadas al oeste de la falla Cerro Prieto. Al oeste de la zona de falla Cerro Prieto se localiza un depocentro que se denomina cuenca Las Tinajas y que está controlado por las fallas Dunas y Saldaña. 24 km al este de la falla Cerro Prieto se identificó la falla Desierto en la cuenca de Altar. La zona de deformación en el límite de placas tiene un ancho de 18 km entre las fallas Cerro Prieto al este y Pangas Viejas al oeste. La orientación de las fallas contenidas en ésta zona es N-NE y se proyectan hacia la parte sur de la Sierra Cucapah. Hacia el sur, las fallas tienden a unirse al trazo de la falla Cerro Prieto, El basamento acústico indica que las cuencas en el delta del Río Colorado tienen profundidades mayores de 5000 m. Se ubicó otro depocentro al SE de la zona de estudio denominado cuenca Montague. Finalmente, la región estudiada presentó la mayor actividad sísmica (réplicas) y subsidencia co-sísmica y pos-sísmica debida al sismo del 4 de abril de 2010 (M_w 7.2). Antes de éste evento la actividad sísmica era muy escasa y no se sabía de estructuras en la zona. En éste trabajo se demuestra que existen al menos siete fallas principales que pueden representar un alto peligro sísmico.

Palabras Clave: delta del Río Colorado, sísmica de reflexión, basamento acústico

ABSTRACT of the thesis by **José Juan Chanes Martínez**, as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCES degree in EARTH SCIENCES. Ensenada, Baja California, México, Jun 2012.

STRUCTURAL AND SEISMIC STRATIGRAPHIC CHARACTERISTICS IN A SECTION OF THE COLORADO RIVER DELTA, NORTHWESTERN MEXICO, FROM SEISMIC REFLECTION.

The processing and interpretation of seismic reflection data, assisted with complementary geophysical data, allow interpreting the structure and seismostratigraphic of the SW sector of the Colorado River delta. This study covers an area of the Cerro Prieto transform fault which is the active boundary between the Pacific and North American tectonic plates. Access to information owned by Petroleos Mexicanos, made this work possible. The objectives were: process the reflection seismic data, interpret and define the seismostratigraphic sequence limits. The results show a high density of faults within the Cerro Prieto fault zone, where most of them are buried by sediments. One of the main structures observed is known as the Cerro Prieto fault. The identification coincides with the SE sector previously reported in the literature, whereas to the north the Cerro Prieto fault intercepts other structure with strike N20°W, here called Palmas Fault. In the Cerro Prieto fault zone we identified major faults such as: Palmas, Mesa, Indiviso-S and Pangas Viejas these new unknown faults are located west of the Cerro Prieto fault. West of the Cerro Prieto fault zone is located a depocenter called Las Tinajas basin which is controlled by the faults, Dunes and Saldaña. 24 km east of the Cerro Prieto fault another major fault was identified within the Altar Desert basin. The deformation zone along the plate boundary is 18 km wide; this is from the trace of the Cerro Prieto fault to east to the Pangas Viejas fault to the west. The orientation of the faults in this area is N-NE and project to the south of the Sierra Cucapah. To the south, the faults tend to join the trace of the Cerro Prieto fault. The acoustic basement indicates that the basins in the Colorado River delta are deeper than 5000 m. Another depocenter was located southeast of the study area called Montague basin. Finally, the study region had the highest seismic activity (aftershocks) and co-seismic subsidence and post-seismic earthquake due to the April 4, 2010 (Mw 7.2). Before this event seismic activity was very low and it was unclear the amount of structures in the zone. In this paper we demonstrate that there are at least seven major faults that may pose a high seismic hazard for the region.

Keywords: Colorado River delta, seismic reflection, acoustic basement.

Dedicatorias

A Dios por permitirme llegar a ésta etapa de la vida y hacer posible lograr un sueño más.

A mis padres José R. Chanes y Candelaria Martínez por sus consejos, cariño, pero sobre todo por animarme a seguir adelante en esos momentos que más los necesite. A ustedes les debo todo lo que tengo y lo que soy.

A mi hermana Nancy N. Chanes por su cariño, buen humor y forma fácil de ver las cosas.

Los Quiero Mucho

Agradecimientos

Agradezco principalmente a CONACYT por el apoyo económico en el desarrollo de mi maestría con número de registro 295113. A CICESE por haber sido aceptado en su programa de posgrado y por el uso de sus instalaciones. A PEMEX por proporcionar los datos sísmicos de reflexión que hicieron posible este proyecto. Así como también a Halliburton y OpendTect por el uso de sus programas para el procesado de datos y el Grant académico que mantienen con CICESE.

A mi director de tesis Dr. Mario González Escobar por sus consejos desde que ingrese a CICESE, el haberme aceptado como su estudiante, apoyo y paciencia para el desarrollo de éste trabajo.

A mis sinodales Dra. Joann Miriam Stock, Dr. Jesús Arturo Martin Barajas, Dr. Marco Antonio Pérez Flores, M. en C. Alejandro Hinojosa Corona y Dr. David Hilario Covarrubias Rosales por dedicarme su valioso tiempo en las recomendaciones y sugerencias en el manuscrito de la tesis.

Un agradecimiento especial a Dania Isaura Pasillas Pasillas por estar conmigo la mayor parte del tiempo de mi estancia en Ensenada, por soportarme en mis buenos y malos momentos y por tantas cosas más que hiciste por mí. Sigue siendo la persona noble que para mi te caracteriza.

A Sergio Arregui por el apoyo y asesorías en los problemas de cómputo que se presentaron durante el procesado de datos.

A Ramón Mendoza por reforzar el manuscrito de la tesis con sus sugerencias y por su experiencia en campo al momento de reconocer al área de estudio.

A Martin Pacheco por su ayuda y sugerencias en la interpretación de los datos geológicos.

A mis amigos Clemente Gallardo, Teresa Rosales, Favio Cruz, Jessica Salas, Néstor Ramírez, Usama Yarbuh, Cristina Sánchez por ser como una familia para mi durante todo este tiempo y a todo mis compañeros de Ciencias de la Tierra.

Además quiero hacer un reconocimiento al personal del departamento de Ciencias de la Tierra por el buen trato y el soporte de Martha Barrera, Bárbara Uribe y Guadalupe Martínez.

CONTENIDO

	<i>Página</i>
Resumen español	i
Resumen inglés	ii
Dedicatorias	iii
Agradecimientos	iv
Contenido	v
Lista de Figuras	vii
Lista de Tablas	xvi
Lista de Ecuaciones	xvi
Capítulo I. Introducción	1
I.1 Marco Geológico y Tectónico Regional.....	5
I.1.1 Principales estructuras activas en la región.....	9
I.2 Delta del Río Colorado.....	14
I.3 Objetivos y metas.....	19
Capítulo II. Metodología	21
II.1 Exploración Sísmica.....	21
II.2 Sísmica de Reflexión.....	22
II.2.1 Adquisición Sísmica.....	24
II.3 Procesamiento de datos sísmicos.....	24
II.3.1 Procesamiento Pre-Apilamiento.....	25
II.3.1.1 Cintas de campo.....	26
II.3.1.2 Asignación de geometría.....	26
II.3.1.3 Edición de registros.....	27
II.3.1.4 Estáticas por elevación.....	28
II.3.1.5 Estáticas de refracción.....	29
II.3.1.6 Atenuación de la onda directa.....	32
II.3.1.7 Atenuación de "ground roll".....	32
II.3.1.8 Deconvolución.....	34
II.3.1.9 Filtro F-K.....	34
II.3.2 Procesamiento Apilamiento.....	36
II.3.2.1 Ordenar trazas por CDP (Common Depth Point).....	36
II.3.2.2 Análisis de Velocidad.....	37
II.3.2.3 Corrección por NMO (Normal Move Out).....	38
II.3.2.4 Apilamiento.....	39
II.3.3 Procesamiento Post-Apilamiento.....	40
II.3.3.1 Corrección de Amplitud.....	40
II.3.3.2 Filtro variable en tiempo.....	41
II.3.3.3 Control Automático de Ganancia (AGC).....	41
II.3.3.4 Conversión a profundidad.....	41
II.3.3.5 Migración.....	42

CONTENIDO (continuación)

	<i>Página</i>
Capítulo III. Resultados	44
III.1 Secciones sísmicas.....	46
III.1.1 Sección 4985.....	47
III.1.2 Sección 4983.....	53
III.1.3 Sección 4981.....	59
III.1.4 Sección 4979_b1 y b2.....	63
III.1.5 Sección 31.....	66
III.2 Mapas de anomalías gravimétricas.....	68
III.2.1 Anomalía Gravimétrica.....	68
III.2.2 Correlación de fallas.....	71
III.2.2.1 Falla Desierto.....	75
III.2.2.2 Falla Cerro Prieto.....	75
III.2.2.3 Falla Palmas.....	76
III.2.2.4 Falla Mesa.....	76
III.2.2.5 Falla Indiviso-S.....	77
III.2.2.6 Falla Pangas Viejas.....	77
III.2.2.7 Falla Dunas.....	78
III.2.2.8 Falla Saldaña.....	79
III.3 Estructura anticlinal rollover.....	79
III.4 Basamento Acústico.....	79
III.5 Horizontes estratigráficos.....	82
Capítulo IV. Discusión	86
IV.1 Fallas de Carácter regional.....	86
IV.2 Unidades sismoestratigráficas y delimitación de depocentros.....	95
IV.3 Modelo estructural e implicaciones tectónicas.....	98
Capítulo V. Conclusiones	104
Literatura Citada	107

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura</i>	Página
1 Mapa estructural del Golfo de California. Área de estudio en color amarillo. Se muestra el sistema de fallas (líneas rojas) en la Provincia Extensional del Golfo (línea verde) y SE de la Provincia de Cuencas y Cordilleras (Basin and Ranges). En color amarillo al norte, se muestra la región del delta del Río Colorado. Las principales estructuras en el norte del Golfo son; Cuenca Wagner; Consag; Delfín y Tiburón; E= Ensenada, CSL = Cabo San Lucas, PVT = Puerto Vallarta.....	6
2 Marco tectónico propuesto por Lomnitz et al., (1970), que consiste en un patrón simple de fallas transformantes que son las fallas Imperial y Cerro Prieto y la difusión de los centros de dispersión Cerro Prieto (CDCP) y Wagner (CDW). El centro de dispersión Panga de Abajo (CDPDA) y la falla transformante que está en líneas punteadas fueron propuestos por de La Fuente y Sumner (1974). Las líneas de color rojo están delimitando la geometría de la cuenca Wagner (González-Escobar et al., 2010). FI Falla Imperial; FCP Falla Cerro Prieto; FC Falla Consag; FW Falla Wagner; SEM Sierra El Mayor; SC Sierra Cucapah; SLP Sierra Las Pintas. Figura modificada de García-Abdeslem y López-Guzmán (2009).....	8
3 Principales estructuras activas. a) Ubicación Geografía del delta del Río Colorado y Cuenca de Altar (tomado de Pacheco, 2004), líneas negras rectas corresponden a líneas sísmicas interpretadas, falla Altar es inferida. b) Estructuras interpretadas a partir de perfiles de sísmica de reflexión por Aguilar-Campos (2007); González-Escobar et al., (2009) (líneas en gris en el norte del Golfo de California), y Pérez-Tinajero (2007) (líneas blancas en la Cuenca de Altar). Note la diferencia en las estructuras reportadas para los dos mapas, lo cual es debido a la incorporación de información de perfiles sísmicos.....	9

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
4	Epicentro del sismo del 4 de abril de 2010, M_w 7.2 (estrella) y sismicidad histórica compilada por Ellsworth, 1990 (círculos rojos), indicando año y magnitud. Círculos negros representan Ciudades y poblaciones en la región, FCP: Falla Cerro Prieto tomada de Fonseca-López, 1982.....	10
5	Sismicidad reportada por RESNOM de 1979 al 3 de abril de 2010. Se incluye el epicentro de sismo del 4 de abril de 2010 y sismicidad histórica (círculos rojos). Líneas rojas, representan la zona de falla Cerro Prieto. En amarillo están representadas las carreteras. El recuadro superior se muestra la Mesa de Andrade. W-3 y W-4 pozos exploratorios de PEMEX, indicando su profundidad entre paréntesis.....	11
6	a. Imagen de Pixel-Tracking elaborada por Fielding (2011) de NASA JPL (comunicación escrita), mostrando la zona de ruptura del sismo de Abril de 2010. b. Réplicas del sismo del 4 de Abril de 2010, los círculos y triángulos azules corresponden a sus epicentros y estaciones utilizadas para su localización (Castro et al., 2011). Se incluye la sismicidad histórica (círculos rojos).....	13
7	Localización geográfica del delta del Río Colorado. FCP; falla Cerro Prieto. (modificado de Alles, 2011 y Nelson et al., 2012).....	15
8	Mapa de ambientes sedimentarios y litofacies en el delta del Río Colorado, el cual está dominado por las mareas. La línea roja en la figura superior, representa el perfil de la figura inferior (tomada de Jaillard, 1993).....	16
9	Efecto del peso de los sedimentos deltaicos. 1: Si la subsidencia es menor que la sedimentación aumenta la progradación. 2: Si la subsidencia aumenta y es mayor o igual que la sedimentación se produce agradación vertical. 3: Las fallas de crecimiento crean zonas de mayor subsidencia local y secuencias engrosadas en abanico.....	17

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
10	Principales deformaciones sinsedimentarias debidas a la pendiente, el sobrepeso y la subcompactación de las arcillas en un delta (modifica de Jaillard, 1993).....	18
11	Perfiles sísmicos de reflexión, propiedad de PEMEX (líneas en negro), procesados e interpretados en el presente trabajo (4985, 4983, 4981, 4949_b1, 4979_b2, 31). FCP: Falla Cerro Prieto, epicentros históricos (círculos rojos). Estrella en amarillo, epicentro del sismo del 4 de abril de 2010 (M_w 7.2). Círculos cafés, actividad sísmica hasta antes del sismo. Réplicas (círculos azules), tomadas de Castro et al. (2011). W-3 y W-4 pozos exploratorios de PEMEX.....	19
12	Geometría de adquisición sísmica terrestre con fuente dinamita.....	23
13	Muestra de manera general la secuencia de procesamiento usada en éste trabajo para sísmica de reflexión 2D multicanal.....	25
14	Edición de Registros. (a) muestra los gathers sin proceso alguno. (b) registro al que ya se le aplico las dos herramientas antes descritas.....	28
15	Estáticas de elevación (modificado de Regueiro, 1997). Esta capa, que usualmente tiene de 4 a 50 m de espesor, se caracteriza por velocidades sísmicas que no sólo son bajas (por lo general, entre 250 y 1000 m/s) sino a veces altamente variables.....	29
16	Picking de los primeros arribos.....	30
17	Esquema general de la configuración de los elementos necesarios para realizar la corrección por estática (tomada y modificada de ProMAX®).....	31
18	Atenuación de ground roll. (a) registro con ground roll, (b) aplicando surgical mute, (c) registro con ground roll atenuado.....	33

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
19	Filtro F-K. (a) Se diseña un polígono en forma de trapecio y todas las frecuencias que contenga dentro es lo que dejara pasar. (b) Respuesta del filtro.....	35
20	Análisis de velocidad. (a) Espectro de semblanza, (b) Registro ordenado por CDP, (c) Corrección por NMO, (d) Método de velocidad constante.....	38
21	Apilamiento por CDP's. Esta imagen aun no es la definitiva, faltan algunos procesos más como son Corrección de amplitud, Filtro variable en tiempo, Control Automático de ganancia, Conversión a profundidad y Migración.....	39
22	Migración. (a) Sección sísmica migrada en tiempo, (b) Análisis de velocidad utilizado para el objetivo de la migración.....	43
23	a) Perfil K-05 de sísmica de reflexión en la parte norte del mar Muerto, Israel, mostrando la falla transformante (EMF), depresión cursi (KD), falla Almagor (AF) y falla marginal occidental (WMF) (tomada de Hurwitz et al., 2002). b) Perfil número 5011 de sísmica de reflexión en el alto Gofo de California mostrando la falla transformante Cerro Prieto enmarcada por el lóbulo negro, (tomada de Aguilar-Campos, 2007). En esta última, note el espesor de sedimentos del lado SW de la falla Cerro Prieto (>4000 milisegundos, tiempo doble de viaje, los cuales corresponden a ~5000 metros de profundidad).....	45
24	Perfil A-B de la línea 4985 SW-NE. Líneas en rojo representan las fallas menores interpretadas. Las líneas en amarillo y naranja representan los sismorefltores de un límite de secuencia y del basamento cristalino, respectivamente. De NE a SW se presentan las fallas mayores: Desierto (FDE), Cerro Prieto (FCP), Mesa (FM), Indiviso-S (FI-S), Pangas Viejas (FPV), las cuales también se observan en los perfiles al norte, excepto la falla Desierto que es en el único perfil observada. El cauce moderno del Río Colorado (CRC) se ubica sobre un depocentro local. Los recuadros en negro representan un	

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
24	acercamiento mostrado en las figuras 26 y 27. Se incluye mapa de ubicación de éste perfil, la línea en rojo indica la ubicación de la falla Cerro Prieto, tomada de (Fonseca-López, 1982).....	48
25	a) Rollover observado en la sección sísmica 4985 y su rollover anticlinal (flexión antitética) ocurre cuando una falla lítrica se colapsa. b) Esquema de una falla lítrica con una flexura antitética (rollover). La falla Cerro Prieto acomoda principalmente cizalla lateral y posiblemente corta a la falla lítrica a profundidad.....	50
26	Esquema de una falla lítrica separando bloques rígidos, la continua sedimentación durante el desplazamiento de la falla produce una secuencia en forma de abanico y el anticlinal rollover. Se incluyen las fallas: FCP: Cerro Prieto; FM: Mesa; FI-S: Indiviso-S; FPV: Pangas Viejas.....	51
27	Acercamiento en un sector de la línea 4985. Se muestran las fallas mayores: Desierto (FDE), Cerro Prieto (FCP), Mesa (FM), Indiviso-S (FI-S) y Pangas Viejas (FPV).....	52
28	Perfil A-B de la línea 4983 SW-NE. Líneas en rojo representan las fallas menores interpretadas. Los horizontes amarillo y naranja representan los sismorelectores de un límite de secuencia y del basamento acústico respectivamente. Fallas mayores: Cerro Prieto (FCP), Mesa (FM), Indiviso-S (FI-S), Pangas Viejas (FPV), Dunas (FDU), Saldaña (FS). Los recuadros negros presentan un acercamiento mostrado en la figura 29. CRC y lóbulo, representan el cauce moderno del Rio Colorado. Se presenta la columna litología del pozo W-3 tomado de Pacheco et al. (2006) y Helenes et al. (2009) y el mapa de ubicación de éste perfil, en el mapa la línea en rojo indica la ubicación de la falla Cerro Prieto.....	54

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
29	Acercamiento del perfil 4983. a) sector SW y b) sector NE. En el sector SW se observa el depocentro Las Tinajas. Las líneas de color rojo representan las fallas menores interpretadas. Las líneas en amarillo y naranja representan los sismorelectores de un límite de secuencia y del basamento cristalino, respectivamente. Se muestran las fallas mayores: Cerro Prieto (FCP), Mesa (FM), Indiviso-S (FI-S) y Pangas Viejas (FPV). W-3 Pozo exploratorio y su columna litológica, tomada de Pacheco et al. (2006).....	57
30	Perfil A-B de la línea 4981 SW-NE. Líneas en rojo representan las fallas menores interpretadas. La línea en naranja representa el sismorelector interpretado. Fallas mayores: Cerro Prieto (FCP), Mesa (FM), Pangas Viejas (FPV), Dunas (FDU) y Saldaña (FS). Los recuadros negros presentan un acercamiento mostrados en la figura 31. Se incluye mapa de ubicación del perfil, en éste mapa la línea en rojo indica la ubicación de la falla Cerro Prieto, tomada de Fonseca-López (1982).....	60
31	Acercamiento del perfil 4981. a) sector SW y b) sector NE. En el Sector SW del perfil se observa la forma de un depocentro, así como las fallas mayores: Saldaña (FS) y Dunas (FDU). En el sector NE del perfil se muestran las fallas mayores: Cerro Prieto (FCP), Mesa (FM) y Pangas Viejas (FPV). Obsérvese la gran cantidad de fallas en el sector NE de FCP y que corresponde al inicio de la región del Desierto de Altar. En color naranja se representa el basamento acústico.....	62
32	Perfil A-B de la línea 4979_b1. Se muestra la falla Dunas (FDU), que también está presente en los perfiles 4981 y 4983 localizados al sur.....	63
33	Perfil A-B de la línea 4979_b2. Se muestran las fallas mayores: Cerro Prieto (FCP) y Mesa (FM), que también están presentes en los perfiles 4981, 4983 y 4985, localizados al sur.....	65

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
34	Perfil A-B de la línea 31, sin y con interpretación. Se muestran las fallas mayores: Palmas (FP) vista por primera vez en éste perfil y las fallas, Mesa (FM), Indiviso-S (FI-S) y Pangas Viejas (FPV), las cuales son observadas en los perfiles: 4979_b2, 4981, 4983 y 4985, localizados al sur.....	67
35	Mapa de anomalía de Bouguer para el NW de México. Los colores azules representan valores bajos (-80 mgal) y los rojos altos gravimétricos (-20 mgal). FCP: falla Cerro Prieto (línea roja) tomada de (Fonseca-López, 1982), FA: falla Altar tomada de (Pacheco et al., 2006), los perfiles sísmicos aquí interpretados (líneas negras). La estrella representa el epicentro del sismo del 4 de abril de 2010. W-3 y W-4 pozos exploratorios indicando la profundidad. Datos propiedad de PEMEX.....	70
36	Panel 3D muestra la correlación de las principales fallas entre los perfiles sísmicos procesados e interpretados en ésta tesis. De oeste a este fallas: Saldaña (FS), Dunas (FDU), Pangas Viejas (FPV), Indiviso-S (FI-S), Mesa (FM), Palmas (FP), Cerro Prieto (FCP) y Desierto (FDE).....	72
37	a. Mapa estructural de la región. El mapa incluye las fallas de SW a NE: Saldaña (FS), Dunas (FDU), Pangas Viejas (FPV), Indiviso-S (FIS), Mesa (FM), Palmas (FP), Cerro Prieto (FCP) y Desierto, (FDE). El trazo rojo indica la falla Cerro Prieto (Fonseca-López, 1982) b. Mapa de anomalía gravimétrica de Bouger en la región de estudio. Se indican las diferentes sierras: Sierra Cucapah (SC), Sierra El Mayor (SEM), Sierra Las Pintas (SLP). La estrella representa el sismo del 4 de abril de 2010, círculos azules réplicas de éste evento hasta el 8 de mayo de 2010 (Castro et al., 2011), círculos cafés réplicas del sismo de abril de 2010 hasta mayo de 2012 tomadas del catalogo de RESNOM.....	74

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
38	Configuración del anticlinal rollover formado entre las fallas Pangas Viejas al oeste y Cerro Prieto al este. Se interpreta que ésta estructura es producida por la pequeña componente de extensión que tiene la zona de falla Cerro Prieto. De oeste a este fallas: Saldaña (FS), Dunas (FDU), Pangas Viejas (FPV), Mesa (FM), Palmas (FP), Cerro Prieto (FCP).....	80
39	Mapa de configuración del basamento acústico. Se muestran las fallas: Cerro Prieto (FCP) y Palmas (FP).....	81
40	Columna litológica del pozo W-3 perforados por PEMEX en la zona del delta del Río Colorado (Pacheco et al., 2006)....	83
41	Interpretación del perfil sísmico 4983, resumiendo sus características. W-3 Pozo exploratorio con su litología (Pacheco et al., 2006). De oeste a este se tienen las fallas: Saldaña (FS), Dunas (FDU), Pangas Viejas (FPV), Indiviso-S (FI-S), Mesa (FM) y Cerro Prieto (FCP). CRC representa el cauce moderno del Río Colorado.....	88
42	Perspectiva de la estructura en la región del delta del Río Colorado. La superficie fue trabajada en Global Mapper 11 con una exageración vertical de 5. La escala en la vertical y horizontal de los perfiles sísmicos es indicada. Se indican las fallas: Saldaña (FS), Dunas (FDU), Pangas Viejas (FPV), Indiviso-S (FI-S), Mesa (FM), Palmas (FP), Cerro Prieto (FCP) y Desierto (FDE). Los horizontes sísmicos; H1 (Pleistoceno), H2 (Mioceno Tardío). El naranja representa el basamento acústico.....	89
43	a) Actividad sísmica reportada por (Castro et al., 2010), para el período del 6 de abril al 8 de mayo de 2010, en círculos azules, círculos amarillos actividad sísmica reportada por RESNOM, para el mismo intervalo de tiempo. b) Actividad sísmica reportada por RESNOM del 9 de abril del 2010 al 5 de mayo del 2012 (círculos rojos), incluida la sismicidad reportada en la figura a). c) InSar deformación post-sísmica (comunicación escrita E. Fielding, 2012), incluida falla Cerro Prieto (rojo y línea negra punteada), así	

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
43	como las fallas interpretadas en éste trabajo. Línea blanca falla El Indiviso, CSC: Ciénaga de Santa Clara, SCS: Estero Santa Clara, FC: Campo Pesquero La Bocana, SB: Barra de arena de marea (y modificado de Nelson et al., 2012).....	93
44	a. Fracturas en el dique del lago Vulcano hechas por el sismo del 20 de noviembre de 1915 (M_w 7.1) (tomado de BSSA, 1916). b. Fracturas hechas por el sismo del 4 de abril de 2010 (M_w 7.2) (En la foto Tito Valdez, fotografía proporcionada por Luis Munguía, 2012).....	95
45	Formación de un transtensional strike-slip duplex en una curvatura (bend) extensional. a. sistema de falla lateral derecha strike-slip (tomado de Woodcock and Fischer, 1986).....	102
46	Esquema estructural de la región de estudio. En color rojo continuo la falla Cerro Prieto, rojo punteado el trazo inferido de la falla Cerro Prieto. Se muestran las fallas: Palmas (FP), Mesa (FM), Indiviso-S (FI-S), Pangas Viejas (FPV), Dunas (FDU) y Saldaña (FS). Se incluyen las fallas Indiviso (FI) (tomada de Fielding, comunicación escrita), Cucapah (FC), Pescadores (FP), Borrego (FB). La estrella representa el sismo del 4 de abril de 2010 (M_w 7.2) (González-García et al., 2010; Fletcher y Spelz (2009); Oskin et al., 2012).....	103

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla</i>		Página
I	Parámetros de adquisición de los datos de sísmica de reflexión del prospecto delta del Río Colorado, adquiridos por PEMEX a finales de los 70's y principios de los 80's....	24

LISTA DE ECUACIONES

<i>Ecuación</i>		Página
I	Ecuación de Anomalía de Bouguer.....	69

Capítulo I

Introducción

La región que comprende el delta del Río Colorado, que incluye el Valle de Mexicali, en el norte de Baja California, y la Depresión del Salton, en el sur de California (Alles, 2011, Nelson et al., 2012), viene a ser la zona de transición entre el sistema transforme continental de San Andrés, al norte, y el sistema acoplado de fallas transformes y dorsales oceánicas en el Golfo de California, al sur (Frez-Cárdenas y González-García, 1989; Suárez-Vidal et al., 2007, 2008; Axen y Fletcher, 1998; Plattner et al., 2007); Armstrong, 2010; Wei et al., 2011; Oskin et al., 2012, entre otros). A través del sistema de fallas que atraviesan la región se acomoda la mayor parte (~80-90%) del movimiento relativo entre las placas de Norteamérica y Pacífico a ésta latitud (Suárez-Vidal et al., 2007; Bennett et al., 1996; Dixon et al., 2002).

La falla Cerro Prieto, atraviesa la región del delta y ha sido parte de la frontera de las placas del Pacífico y Norteamérica durante los últimos 6-7 Ma (Oskin et al., 2001). La tasa promedio de deslizamiento, en forma oblicua al delta, se estima en 46 mm por año (González-García et al., 2003). Se considera que las fallas transformes de Cerro Prieto e Imperial son las estructuras principales de éste sistema y a través de las cuales se transfiere la mayor cantidad de movimiento en el límite de placas en esta latitud (por ejemplo, Frez-Cárdenas y González-García, 1989; Suárez-Vidal et al., 2007; García-Abdeslem y López-Guzmán, 2009; entre otros). Generalmente, cuando se habla del marco estructural en éste sector de la frontera de placas, se recurre a un modelo simple de fallas de rumbo dextrales,

con escalonamiento derecho, en el que las fallas del modelo interactúan (las fallas de Cerro Prieto e Imperial, por ejemplo), desarrollando cuencas tipo “*pull-apart*” en las zonas de traslape de los segmentos involucrados (por ejemplo, la cuenca de Cerro Prieto) (Lomnitz et al., 1970; Elders et al., 1984; Lippman et al., 1984; Frez-Cárdenas y González-García, 1989; Glowacka et al., 1999; González-García et al., 2003; Suárez-Vidal et al., 2007, 2008, García-Abdeslem y López-Guzmán, 2009; Sarychikhina et al., 2011; entre otros).

El temblor del 4 de abril de 2010 (M_w 7.2) El Mayor-Cucapah, ocurrió fuera del considerado “sistema principal” (Hauksson et al., 2010), además de estar vinculado a un grupo de fallas menores en las que no se tenía documentada deformación cuaternaria ni actividad sísmica importante, y de las cuales no se esperaba que fueran capaces de generar un sismo de tal magnitud, que diera como resultado una ruptura superficial de ~120 km de longitud y la licuefacción intensiva del terreno en una superficie de ~6,150 km² (por ejemplo, Wei et al., 2011). Sin duda, a raíz de este sismo, la comunidad científica se ha visto obligada a reevaluar el modelo estructural de la zona de falla Cerro Prieto y como se transmite la deformación hacia otras zonas de falla entre el escarpe principal del Golfo de California y la región estable del NW de Sonora y SW de Arizona

La necesidad de conocer con mayor certidumbre el marco estructural de la región, no solo por las implicaciones académico-científicas que esto tiene, sino también por el impacto social que conlleva en términos de riesgo sísmico, justifica el estudio de toda información geológica y geofísica disponible. Estudiar éste tipo de regiones tiene otras relevancias sociales como: el exhume de rocas del basamento cristalino que contienen importantes depósitos minerales, crea grandes valles que proveen tierras fértiles para la agricultura (Cunningham y Mann, 2007), pero la actividad sísmica la afecta ya que destruye el sistema de irrigación, además el Valle Mexicali-Imperial contiene zonas con alto flujo de calor

que proveen energía geotérmica (Puente y De la Peña, 2003; Glowacka et al., 1999), como es el campo geotérmico de Cerro Prieto.

La importancia es identificar fallas sepultadas debajo de los sedimentos del delta del Río Colorado y cuál es el peligro potencial que representan. Sobre estos puntos surgen varias interrogantes que hay que dar respuesta: ¿Realmente existen fallas sepultadas por los sedimentos y en qué cantidad?, ¿La falla Indiviso ya existía y estaba sepultada o se generó a raíz del sismo del 4 de abril de 2010?, ¿Las fallas que están sepultadas (si es que existen) cortan basamento?, ¿Qué tan profundas son las cuencas?, etc. Obviamente la respuesta a éstas y otras interrogantes representa un reto mayor, entre otras razones porque todas las estructuras principales que cortan el delta, se encuentran sepultadas bajo varios km de sedimentos que han sido aportados y siguen siendo aportados por el Río Colorado (Pacheco et al., 2006; Dorsey, 2010).

Con el fin de mejorar nuestro conocimiento en la estructura interna en un sector al SW del delta del Río Colorado, en esta tesis se presenta un estudio de procesamiento e interpretación de seis perfiles sísmicos de reflexión apoyada con información geofísica complementaria. El objetivo es interpretar los perfiles a través de la zona de falla Cerro Prieto en la parte sur de la planicie deltaica para un mejor entendimiento de su evolución tectónica. El análisis de los datos sísmicos arroja nueva información de la tectónica en la región, principalmente con estructuras de carácter regional en la vecindad y de la falla transformante Cerro Prieto, hasta ahora desconocidas debido a que están sepultadas por sedimentos y a la poca actividad sísmica en el área. Los resultados tienen implicaciones para el entendimiento regional de la cinemática de la frontera de placas, la cual está sujeta a considerable debate, incrementado a raíz del sismo del 4 de abril de 2010 (M_w 7.2), el cual ocurrió en un sector en donde no se esperaba un evento de ésta magnitud, y en donde se presentaba una aparente tranquilidad sísmica, la cual se localiza al NW del área aquí estudiada (González et al., 2010; Hauksson et al.,

2010, Wie et al., 2011; Castro et al., 2011; Oskin et al., 2012, entre otros). También se tienen implicaciones de riesgo, ya que con lo aprendido del sismo de abril de 2010, se tiene al SE de la región de estudio una zona con poca actividad sísmica cubierta por una serie de estructuras sepultadas que podrían ser activadas en cualquier momento por un sismo.

En este primer capítulo se hace una introducción general al trabajo, se presentan los objetivos generales y se realiza una descripción del área de estudio, así como del marco tectónico, estructuras activas en la región y características del delta del Río Colorado. El capítulo dos describe la metodología, que contempla el método sísmico de reflexión, la adquisición y procesamiento de los datos sísmicos. El capítulo tres contiene la interpretación y explicación de los resultados obtenidos de los datos procesados. El capítulo cuatro presenta la discusión general del trabajo. Finalmente en el capítulo cinco se presentan las conclusiones de éste.

El presente trabajo, fue posible gracias a la información de sísmica de reflexión propiedad de Petróleos Mexicanos, tomados con fines de exploración petrolera. Los perfiles sísmicos procesados e interpretados en esta tesis, tomados a finales de los 70's y principios de los 80's no se habían analizado bajo ningún esquema.

I.1 Marco Geológico y Tectónico Regional

La región de extensión continental neogénica alrededor del Golfo de California se conoce como Provincia Extensional del Golfo (PEG). El patrón estructural de ésta provincia está sobrepuesto al patrón estructural de Provincia de Cuencas y Sierras del SW de Estados Unidos y NW de México (Figura 1), donde la mayor parte de la deformación es más antigua (~32-27 Ma) (Henry y Aranda Gómez, 1992). La evolución de la PEG está asociada a un cambio de régimen de subducción al desarrollo de un rift continental y a un rift oceánico con transferencia de la Península de Baja California a la placa Pacífico durante el Mioceno Tardío-Plioceno (<12 Ma) (Martín-Barajas, 2000), lo que provocó la configuración actual del límite de placas Pacífico-Norteamericana (Stock y Hodges, 1989). Este límite de placas tiene una componente de cizalla lateral derecha dominante y solo un 30% del desplazamiento relativo corresponde a extensión.

Para explicar el marco estructural en éste sector de la frontera de placas, se recurre a un modelo simple de fallas de rumbo dextrales, con escalonamiento derecho, en el que las fallas del modelo interactúan (las fallas de Cerro Prieto e Imperial, por ejemplo), desarrollando cuencas tipo "*pull-apart*" en las zonas de traslape de los segmentos involucrados (ejemplo, la cuenca de Cerro Prieto) (Lomnitz et al., 1970); Elders et al., 1984; Lippman et al., 1984; Frez-Cárdenas y González-García, 1989, Glowacka et al., 1999, 2005; González-García et al., 2003; Suárez-Vidal et al., 2007, 2008, García-Abdeslem y López-Guzmán, 2009; Sarychikhina et al., 2011; entre otros). La falla Cerro Prieto ha sido parte de la frontera de la placa del Pacífico y Norteamérica durante los últimos 6-7 Ma (Oskin et al., 2001), y la tasa promedio de deslizamiento, en forma oblicua al delta, se estima en 46 mm por año (González-García et al., 2003).

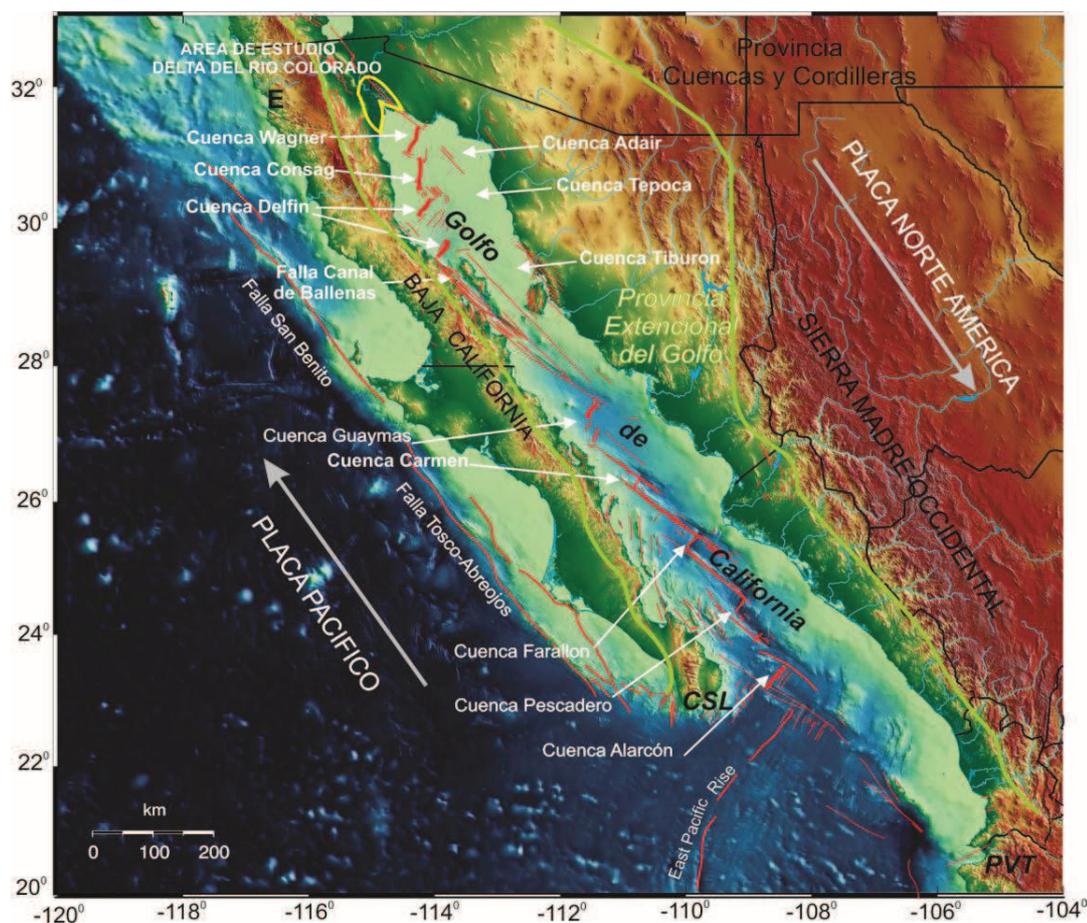


Figura 1. Mapa estructural del Golfo de California. Área de estudio en color amarillo. Se muestra el sistema de fallas (líneas rojas) en la Provincia Extensional del Golfo (línea verde) y SE de la Provincia de Cuencas y Cordilleras (Basin and Ranges). En color amarillo al norte, se muestra la región del delta del Río Colorado. Las principales estructuras en el norte del Golfo son; Cuenca Wagner; Consag; Delfín y Tiburón; E= Ensenada, CSL = Cabo San Lucas, PVT = Puerto Vallarta.

En el área de estudio y en la vecindad del epicentro del sismo del 4 de abril de 2010, de La Fuente y Sumner (1974), discuten la existencia de un centro de dispersión abortado al cual llamaron Pangas de Abajo. Este centro de dispersión estaría conectado hacia al sur con una falla transforme de la cual no dan nombre y que une a éste con el centro de dispersión de Wagner localizado en el alto Golfo de California (Figura 2). Dicho centro de dispersión lo interpretan en base a una gran anomalía magnética.

Posteriormente García-Abdeslem y López-Guzmán (2009), realizaron una inversión de polaridad geomagnética sobre dicha anomalía magnética, donde sugieren que las anomalías magnéticas Pangas de Abajo son causadas por una intrusión volcánica máfica de una posible composición andesítica o basáltica, invadiendo la columna sedimentaria alrededor de 1500 m de profundidad.

Los afloramientos de basamento cristalino de la Sierra el Mayor (Figura 2), corresponden a una granodiorita del Cretácico Tardío (~65 Ma) (Axen et al., 2000). Afloramientos volcánicos del Terciario de composición basáltica se encuentran en Sierra Las Pintas, a unos 20 km al sur de la aldea de Pangas de Abajo (Quintanilla-Montoya y Suárez-Vidal, 1994), (Figura 2). Varios pozos en la región muestran secuencias sedimentarias que se depositaron inicialmente durante las incursiones marinas en el Golfo de California y más tarde por el influjo del Río Colorado (Pacheco et al., 2006).

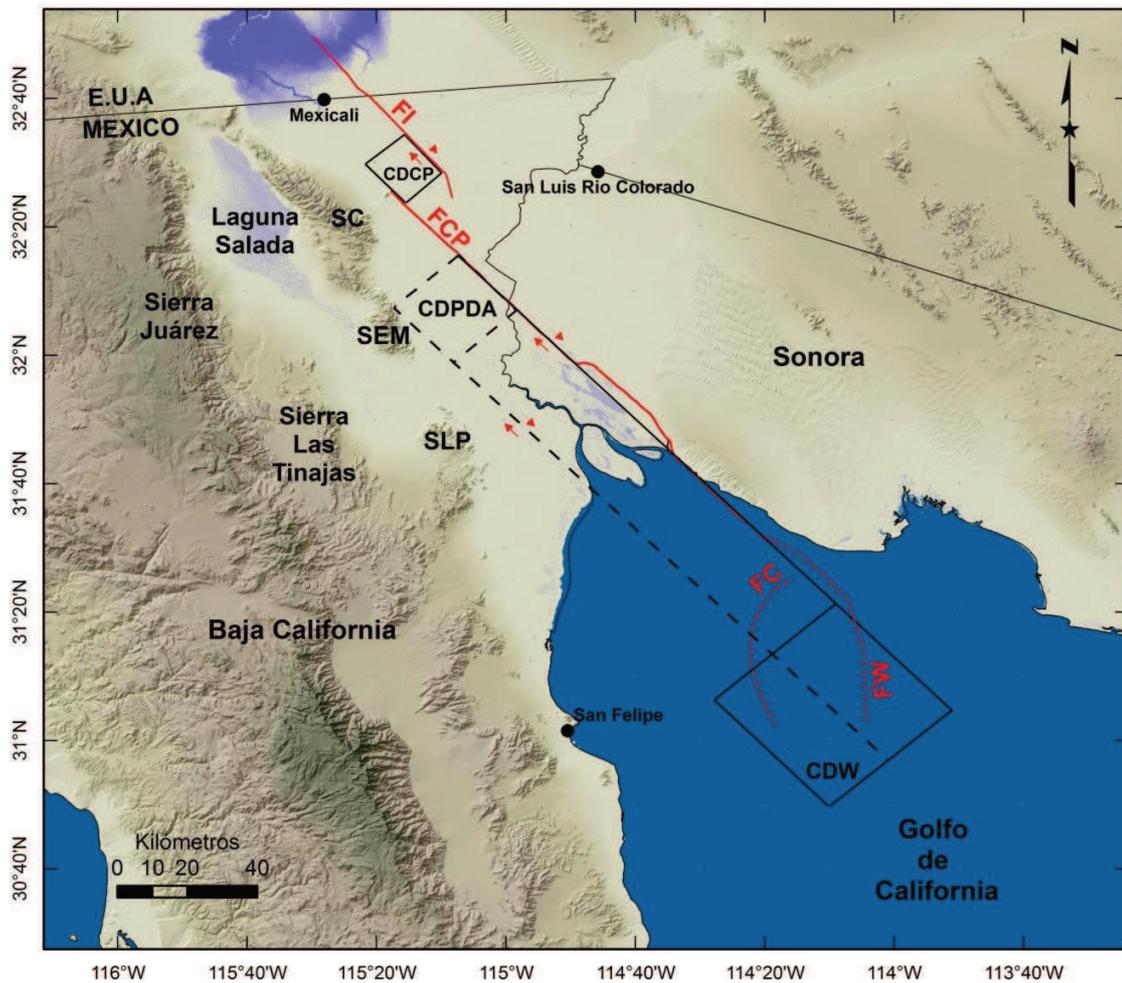


Figura 2. Marco tectónico propuesto por Lomnitz et al., (1970), que consiste en un patrón simple de fallas transformantes que son las fallas Imperial y Cerro Prieto y la difusión de los centros de dispersión Cerro Prieto (CDCP) y Wagner (CDW). El centro de dispersión Panga de Abajo (CDPDA) y la falla transformante que está en líneas punteadas fueron propuestos por de La Fuente y Sumner (1974). Las líneas de color rojo están delimitando la geometría de la cuenca Wagner (González-Escobar et al., 2010). FI Falla Imperial; FCP Falla Cerro Prieto; FC Falla Consag; FW Falla Wagner; SEM Sierra El Mayor; SC Sierra Cucapah; SLP Sierra Las Pintas. Figura modificada de García-Abdeslem y López-Guzmán (2009).

I.1.1 Principales estructuras activas en la región

La falla Cerro Prieto es la única falla activa reportada en la literatura que acomoda la cizalla lateral a través del delta del Río Colorado (Figura 3) (Lomnitz et al., 1972; Fonseca-López, 1982; Frez-Cárdenas y González-García, 1991). En el desierto de Altar las fallas reportadas están inactivas y esa cuenca registra inversión o levantamiento (Pacheco et al., 2006; Pérez-Tinajero, 2007; Ortlieb, 1991) y la mayor subsidencia actual ocurre al oeste de la falla Cerro Prieto.

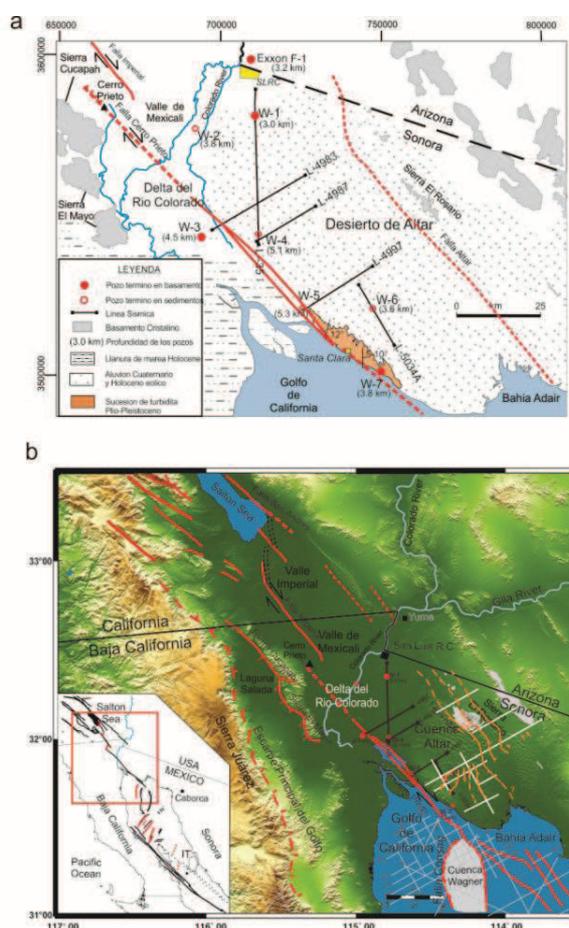


Figura 3. Principales estructuras activas. a) Ubicación Geografía del delta del Río Colorado y Cuenca de Altar (tomado de Pacheco, 2004), líneas negras rectas corresponden a líneas sísmicas interpretadas, falla Altar es inferida. b) Estructuras interpretadas a partir de perfiles de sísmica de reflexión por Aguilar-Campos (2007); González-Escobar et al., (2009) (líneas en gris en el norte del Golfo de California), y Pérez-Tinajero (2007) (líneas blancas en la Cuenca de Altar). Note la diferencia en las estructuras reportadas para los dos mapas, lo cual es debido a la incorporación de información de perfiles sísmicos.

La sismicidad histórica en la región del delta del Río Colorado (Ellsworth, 1990, Felzer y Cao, 2008) muestra la ausencia de sismos fuertes históricos en la vecindad del epicentro del sismo del 4 de abril de 2010 (Figura 4), el cual se localiza al oeste de la falla Cerro Prieto. En la misma figura, en el pueblo de Indiviso se ubican dos eventos históricos (1891, M_w 6.0 y 1915, M_w 7.1). El evento de 1915 es reportado por BSSA, 1916 y Ellsworth, 1990, sin dar mayor detalle de como se realizó su localización epicentral, mientras que Felzer y Cao (2008), mencionan que puede existir un error epicentral de hasta 50 km y colocan una interrogación de si ocurrió sobre la falla Cerro Prieto, por lo que para dicho evento existe una gran incertidumbre en su ubicación. Los poblados Pangas Viejas y Dunas son referencias que se usaran más adelante.

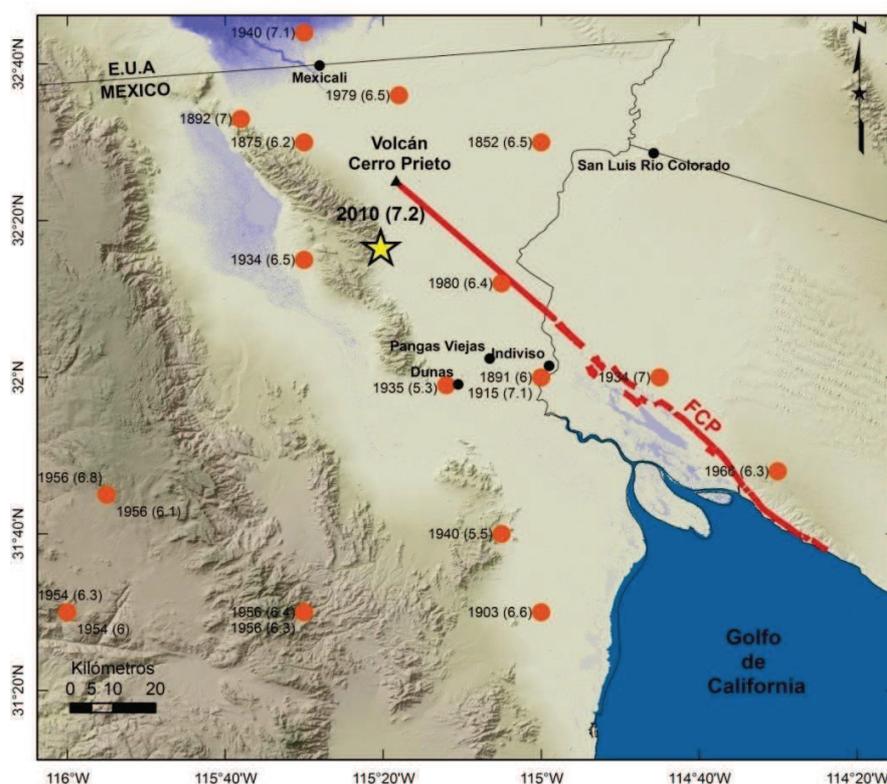


Figura 4. Epicentro del sismo del 4 de abril de 2010, M_w 7.2 (estrella) y sismicidad histórica compilada por Ellsworth, 1990 (círculos rojos), indicando año y magnitud. Círculos negros representan Ciudades y poblaciones en la región, FCP: Falla Cerro Prieto tomada de Fonseca-López, 1982.

La actividad sísmica reportada por la Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM-CICESE), de 1979 hasta un día antes del sismo del 4 de abril de 2010, (Figura 5). Se observa que existe poca y en algunos sectores nula sismicidad al SW de la falla Cerro Prieto, salvo los sismos históricos de 1891(M_w 6.0) y 1935(M_w 5.3). En ese sector los datos de pozos de PEMEX indican espesores de hasta 5000 m de sedimento (Pacheco et al., 2006) pero se desconocen los detalles de la estructura del basamento y de fallas al este y al sur de la Sierra El Mayor en la transición de la planicie de mareas y la parte emergida del delta (Figura 5).

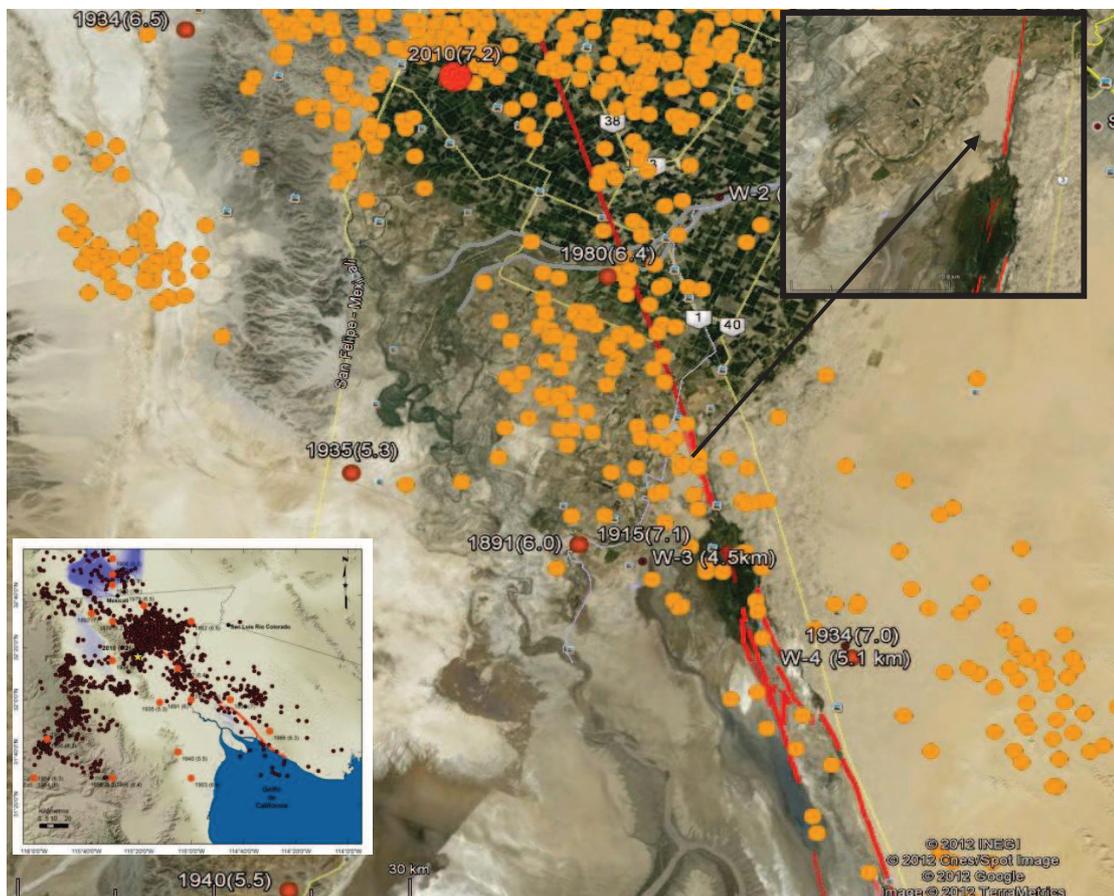
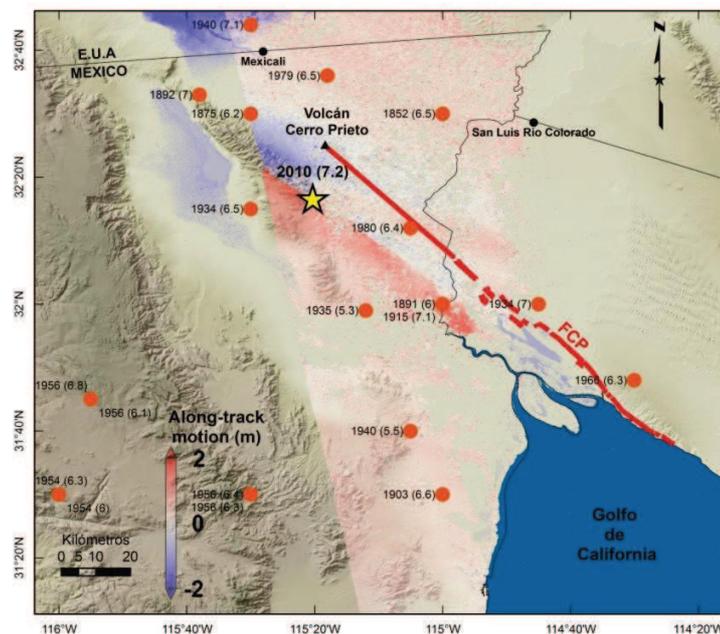


Figura 5. Sismicidad reportada por RESNOM de 1979 al 3 de abril de 2010. Se incluye el epicentro del sismo del 4 de abril de 2010 y sismicidad histórica (círculos rojos). Líneas rojas, representan la zona de falla Cerro Prieto. En amarillo están representadas las carreteras. El recuadro superior se muestra la Mesa de Andrade. W-3 y W-4 pozos exploratorios de PEMEX, indicando su profundidad entre paréntesis.

A raíz del temblor del 4 de abril de 2010 (M_w 7.2), se postuló la existencia de la falla Indiviso (González-García et al., 2010), que rompió hacia el SE cortando de forma oblicua la región distal del delta (Figuras 6a y 6b). La secuencia inició con pre-shocks en marzo de 2010 y una secuencia de 15 temblores de $M_w > 2$ y hasta M_w 4.4 se produjeron a lo largo de una tendencia norte-sur, cerca del epicentro del sismo principal (Hauksson et al., 2010). La zona de réplicas tiene una longitud de más de 120 km y se extiende desde el extremo sur de la zona de falla Elsinore, California en la frontera México-Estados Unidos hasta llegar casi a la costa del Golfo de California. El análisis del desplazamiento finito indica que el sismo provocó un deslizamiento lateral derecho de aproximadamente 2 m en promedio (Hauksson et al., 2010; Castro et al., 2011; Wei et al., 2011). Castro et al., 2011 muestra que para el intervalo de tiempo que ellos estudiaron (6 de abril al 8 de mayo de 2010), la mayoría de los eventos son someros (profundidad < 15 km), y la mayoría (60%) tiende a concentrarse a profundidades entre los 5 y 10 km, particularmente aquellos de mayor magnitud (~ 4.5) (Figura 6b). Las réplicas de mayor magnitud tienden a concentrarse en tres grupos: uno cerca al epicentro del evento principal, donde la ruptura inició; un segundo grupo cerca a la frontera internacional México-Estados Unidos; y un tercer grupo más al sur, cerca del final de la ruptura al SE. La figura 6a y 6b también incluye una imagen de Pixel-Tracking elaborada por Eric Fielding de Jet Propulsion Laboratory (JPL) y proporcionada por la Dra. J.M. Stock de California Institute of Technology (CALTECH) (Figura 6a y 6b). Los epicentros han sido tomados de la página Web de la Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM), U.S. Geological Survey (USGS) y de Castro et al. (2011).

a



b

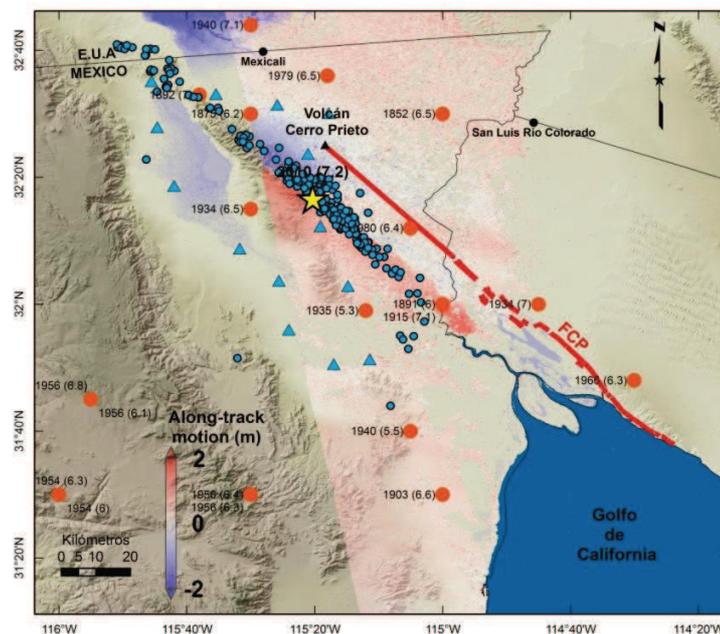


Figura 6. a. Imagen de Pixel-Tracking elaborada por Fielding (2011) de NASA JPL (comunicación escrita), mostrando la zona de ruptura del sismo del 4 de abril de 2010. **b.** Réplicas del sismo del 4 de abril de 2010, los círculos y triángulos azules corresponden a sus epicentros y estaciones utilizadas para su localización (Castro et al., 2011). Se incluye la sismicidad histórica (círculos rojos).

I.2 Delta del Río Colorado

El delta del Río Colorado es cortado por el sistema transformante San Andrés-Golfo de California y seguramente contiene el registro del pasado reciente de la evolución de dicho sistema y que se considera está entre los últimos 5-6 millones de años (Dorsey et al., 2007), por lo que su evolución está directamente vinculado a los cambios geométricos del límite de placas (Hurwitz et al., 2002).

El delta del Río Colorado forma un cono deltaico muy alargado en dirección N-NW (Jaillard, 1993) (Figuras 7, 8, 9). El ápice del delta, se ubica en Yuma, Arizona, donde el Río Colorado entra a la Depresión de Salton. Al oeste el delta está limitado por las sierras Juárez, Las Tinajas y Las Pintas, mientras que al este el delta moderno termina contra el escarpe de la mesa de San Luís Río Colorado en Sonora (Colletta y Ortlieb, 1984, Alles, 2011; Nelson et al., 2012) (Figura 7). El delta abarca un área de $\sim 8600 \text{ km}^2$ y se ubica entre los límites de las placas Pacífico y de Norteamérica (Elders et al., 1972; Lonsdale, 1989, Dorsey, 2010).

Reportes de cálculos realizados indican que en la región del delta en promedio, la profundidad del basamento es de 5.6 km y contiene más de 40,000 kilómetros cúbicos de sedimentos del Río Colorado que fueron depositados en los últimos 5 a 6 Ma (Jenning y Thompson 1986; Dorsey et al., 2005; Dorsey, 2010). Los sedimentos depositados por el Río Colorado han sido tectónicamente trasladados en dirección NW-SE con respecto a la placa de Norteamérica a lo largo de las fallas del sistema San Andrés (Winkler y Kidwell, 1986), para después ser rápidamente sepultados, calentados y mezclados con intrusiones en las cuencas profundas (Schmitt y Vázquez, 2006; Elders et al., 1988); por ésta razón, se cree que se ha estado formando una nueva generación de corteza reciclada a lo largo del límite de placa activo (Dorsey, 2010).

Se ha calculado un volumen de sedimentos derivados del Río Colorado de aproximadamente $2.2-3.4 \times 10^5 \text{ Km}^3$, cantidad que es muy similar al volumen de roca que probablemente fue erosionada de la cuenca hidrográfica del Río Colorado (con un área de captación de aproximadamente $630,000 \text{ km}^2$) durante los últimos 5-6 Ma. La tasa de crecimiento volumétrico de la corteza por sedimentación es de aproximadamente $80-130 \text{ km}^3/\text{Ma.}/\text{km}$ (Dorsey, 2010). El rápido flujo de sedimentos hacia estas cuencas ejerce una fuerte influencia en el estilo de deformación, reología de la corteza, magmatismo syn-rift y la arquitectura del rift-oblicuo (Moore, 1973; Fuis et al., 1984; Persaud et al., 2003; González-Fernández et al., 2005; Lizarralde et al., 2007; Bialas y Buck, 2009). Los millones de metros cúbicos de sedimentos observados en el delta, solo pueden ser explicados por una subsidencia activa y un continuo aporte de sedimento, que puede estar ligada a la tectónica o por simple carga litostática.

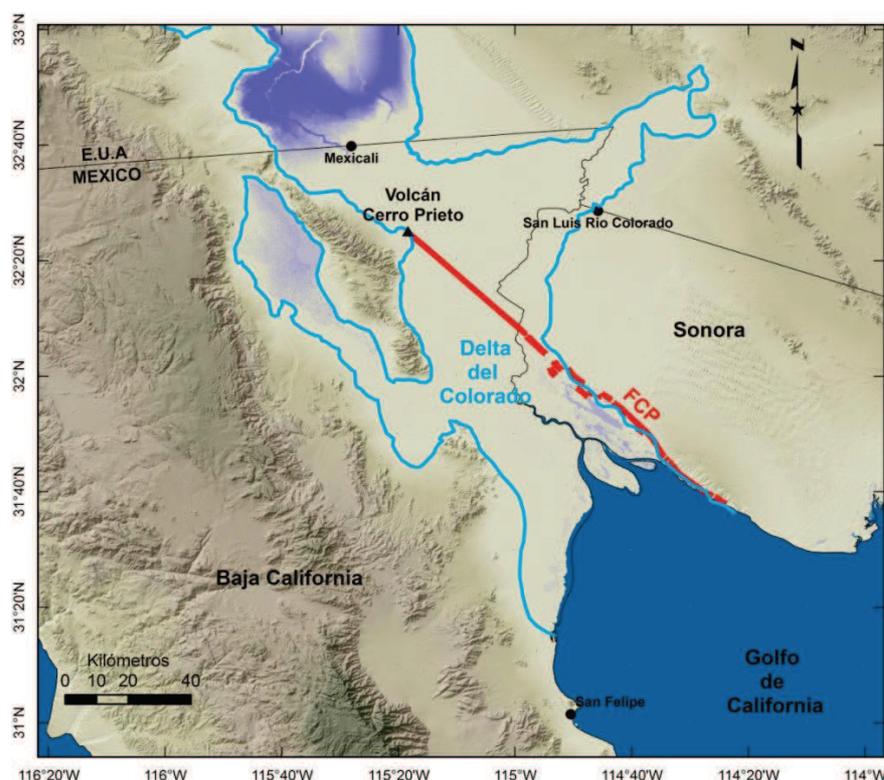


Figura 7. Localización geográfica del delta del Río Colorado. FCP; falla Cerro Prieto. (modificado de Alles, 2011 y Nelson et al., 2012).

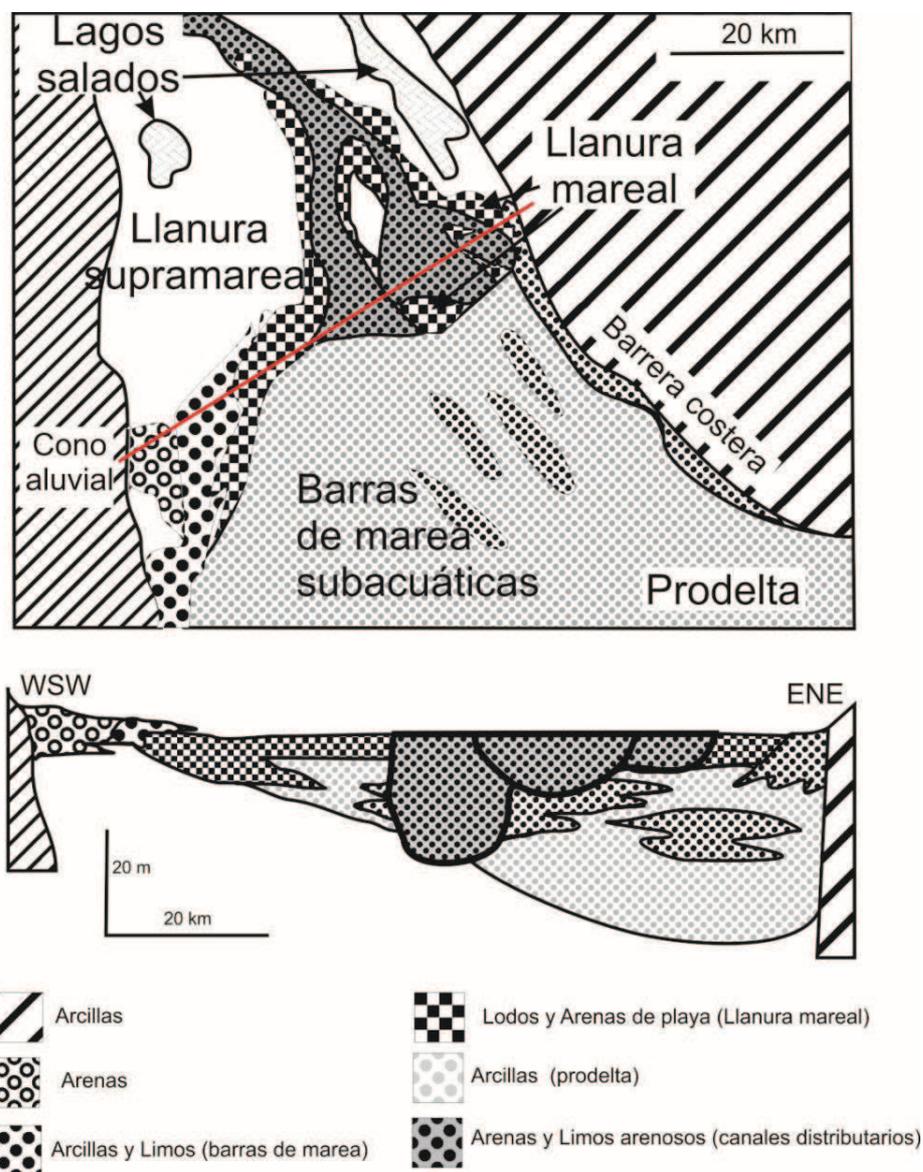
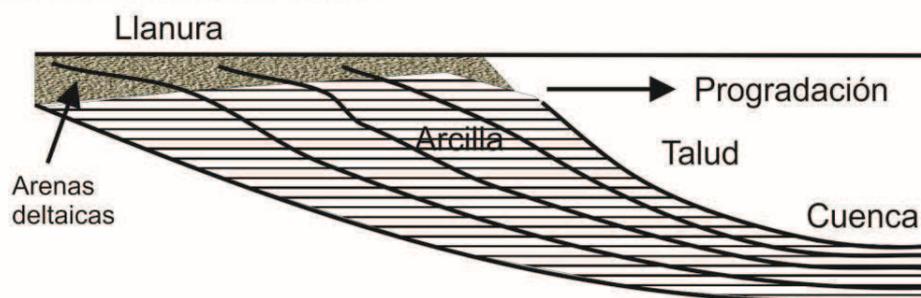
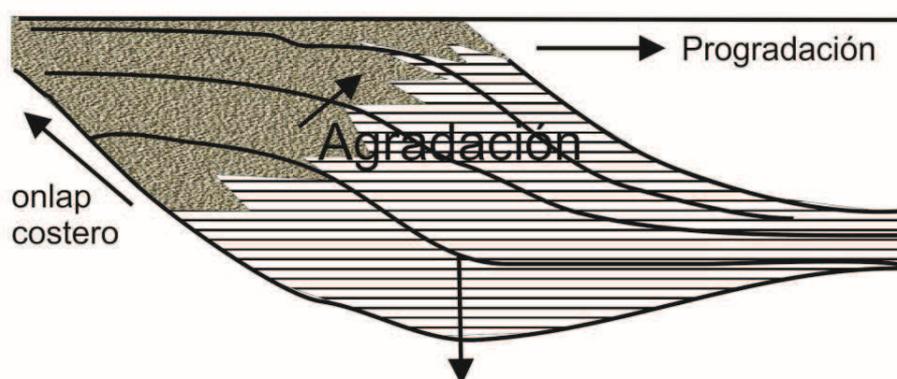


Figura 8. Mapa de ambientes sedimentarios y litofacies en el delta del Río Colorado, el cual está dominado por las mareas. La línea roja en la figura superior, representa el perfil de la figura inferior (tomada de Jaillard, 1993).

1. Subsistencia nula



2. Subsistencia importante



3. Fallas de crecimiento

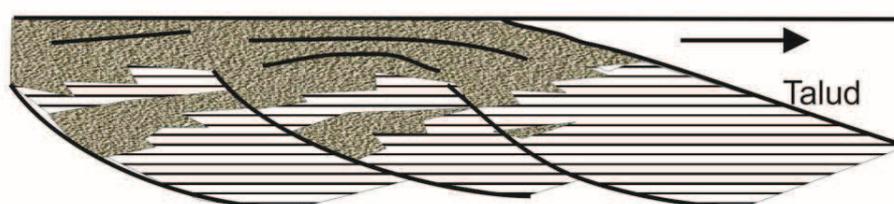


Figura 9. Efecto del peso de los sedimentos deltaicos. 1: Si la subsidencia es menor que la sedimentación aumenta la progradación. 2: Si la subsidencia aumenta y es mayor o igual que la sedimentación se produce agradación vertical. 3: Las fallas de crecimiento crean zonas de mayor subsidencia local y secuencias engrosadas en abanico.

Las deformaciones sinsedimentarias se originan por una acumulación importante de sedimento depositado en el prodelta y sobre el talud continental. El proceso de generación de estas estructuras sedimentarias es por la acción combinada del sobrepeso y de la pendiente, lo cual llevan a la formación de domos, separados por depocentros locales que en ocasiones presentan alta subsidencia local (Figura 10).

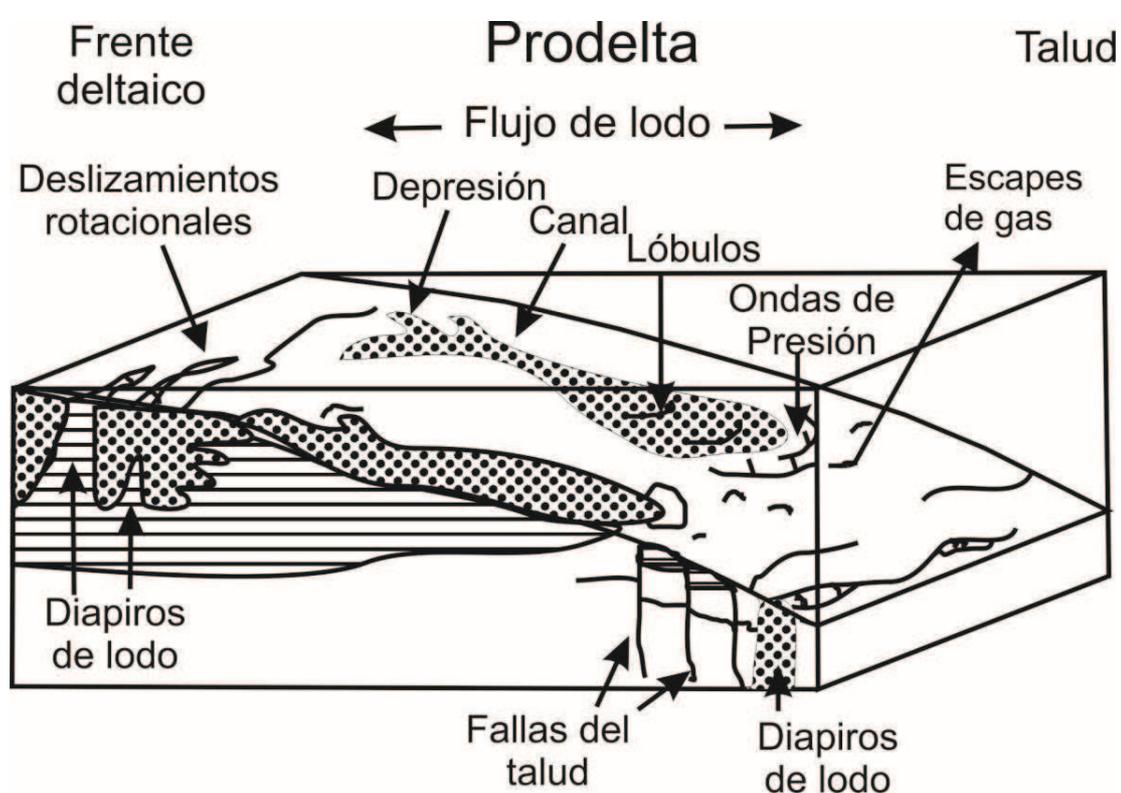


Figura 10. Principales deformaciones sinsedimentarias debidas a la pendiente, el sobrepeso y la subcompactación de las arcillas en un delta (modifica de Jaillard, 1993).

I.3 Objetivos y metas

El convenio de colaboración entre PEMEX Exploración y Producción (PEP) y CICESE, permitió el acceso a datos de sísmica de reflexión en el NW de México. En esa base de datos se ubicaron seis perfiles sísmicos con orientación SW-NE y un perfil con orientación sur-norte al SE del epicentro del sismo del 4 de abril de 2010 (Figura 11). Los datos sísmicos de PEMEX se colectaron a finales de los 70's principio de los 80's.

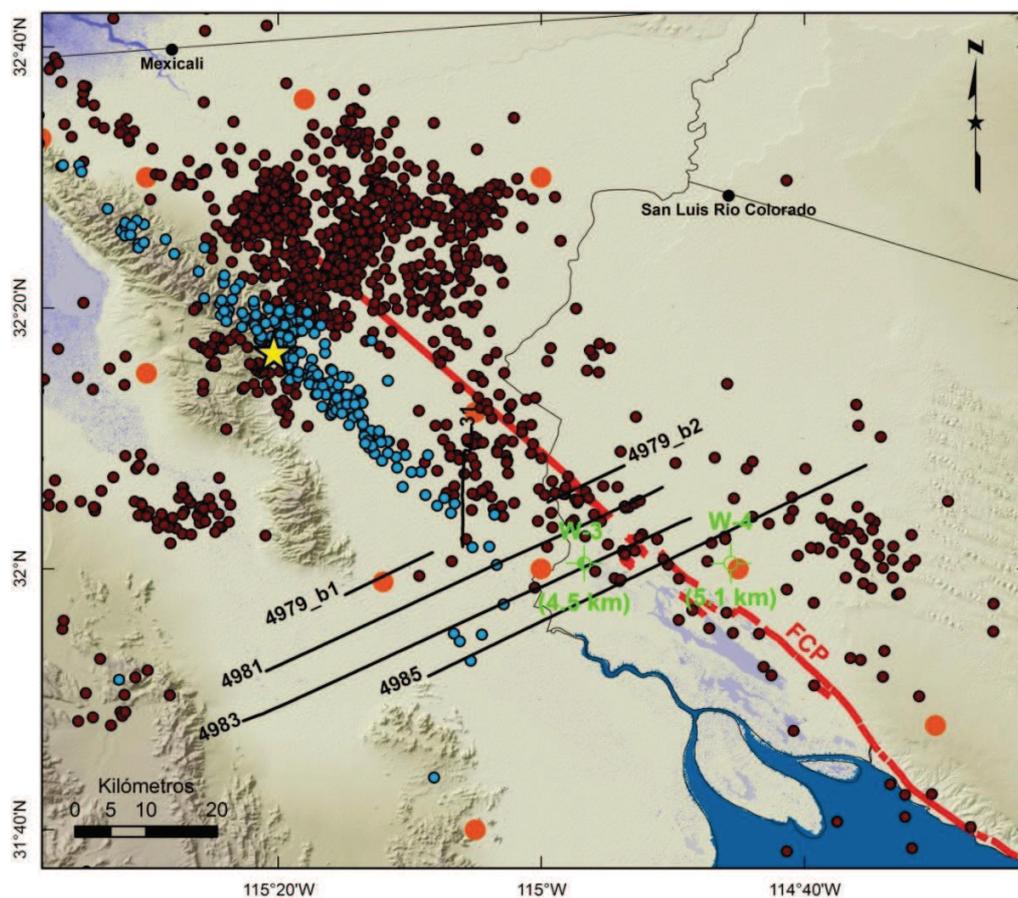


Figura 11. Perfiles sísmicos de reflexión, propiedad de PEMEX (líneas en negro), procesados e interpretados en el presente trabajo (4985, 4983, 4981, 4949_b1, 4979_b2, 31). FCP: Falla Cerro Prieto, epicentros históricos (círculos rojos). Estrella en amarillo, epicentro del sismo del 4 de abril de 2010 (M_w 7.2). Círculos cafés, actividad sísmica hasta antes del sismo. Réplicas (círculos azules), tomadas de Castro et al. (2011). W-3 y W-4 pozos exploratorios de PEMEX.

El objetivo del presente trabajo es procesar e interpretar seis perfiles para identificar las fallas geológicas, la geometría de las secuencias sismoestratigráficas, la configuración del basamento acústico (si está presente) en el sector sur del delta del Río Colorado. Un objetivo particular es ubicar estructuras que pudieran representar riesgo a la población como la "Falla Indiviso", que rompió con el temblor Cucapah-El Mayor, el 4 de abril de 2010 (M_w 7.2) (González-García et al., 2010; Hauksson et al., 2010; Wei et al., 2011).

El análisis de los datos sísmicos arrojará nueva información de la tectónica en la región, principalmente con estructuras en la vecindad de la zona de falla transformante Cerro Prieto, hasta ahora desconocidas debido a que están sepultadas por sedimentos, no han tenido actividad sísmica en tiempos recientes ya que del pasado se ignora. Los resultados de éste trabajo tienen implicaciones para el entendimiento regional de la cinemática de la deformación en la frontera de placas tectónicas.

Capítulo II

Metodología

La sísmica de reflexión es el método geofísico más utilizado para estudiar las estructuras del subsuelo y la geometría de las cuencas en 2D y 3D, en la industria petrolera. Este trabajo de tesis inicia con la búsqueda de los datos crudos de perfiles sísmicos que atraviesan la parte sur de la planicie deltaica del Río Colorado. En ésta sección se describe la metodología utilizada para el procesado e interpretación sísmica de estos perfiles.

II.1 Exploración Sísmica

Se basa en la detección de los tiempos de llegada de ondas elásticas producidas por una fuente artificial, ya sea vibradores, explosivos (para ambiente terrestre) o bien pistola de aire (ambiente marino). Estas ondas se propagan a través del subsuelo y se detectan en la superficie mediante un agrupamiento de sensores conocidos como geófonos e hidrófonos (sensores marinos) una vez reflejadas o refractadas en las distintas formaciones geológicas.

Se puede obtener imágenes aproximadas basadas en las discontinuidades sísmicas, generalmente estas coinciden con las discontinuidades estratigráficas, es decir se obtienen una interpretación del terreno basada en las propiedades elásticas de los estratos sedimentarios.

II.2 Sísmica de Reflexión

Su principio está basado en las reflexiones del frente de onda sísmicas sobre las distintas interfases del subsuelo. Estas interfases responden, al igual que en la sísmica de refracción, a contrastes de impedancia acústica¹ que después se relacionan con las distintas capas sedimentarias. Las reflexiones son detectadas por los geófonos que se ubican en superficie y que están alineados con la fuente emisora.

Cuando una onda sísmica encuentra un cambio de propiedades elásticas entre dos capas geológicas, parte de la energía sigue en el mismo medio, parte se refleja y el resto se transmite a la otra capa con cambios en la velocidad y dirección de propagación.

Dado que las distancias entre la fuente y los geófonos son pequeñas respecto a la profundidad de penetración que se alcanza, el método permite que se esté operando en pequeño ángulo, asegurando así la obtención de reflexiones y, distinguiéndose de la sísmica de refracción o de gran ángulo.

El objetivo de esta técnica es describir la estratigrafía del subsuelo, utilizando una imagen o sección sísmica en donde se aprecia la geometría de las estructuras geológicas (Figura 12).

¹ impedancia acústica es una propiedad intrínseca de las rocas y se define como el producto entre la densidad (ρ) de las rocas del subsuelo y la velocidad (V) de las ondas acústicas cuando se propagan a través de ellas, matemáticamente esto es: $Z = (\rho) (V)$ (Sheriff, 2002).

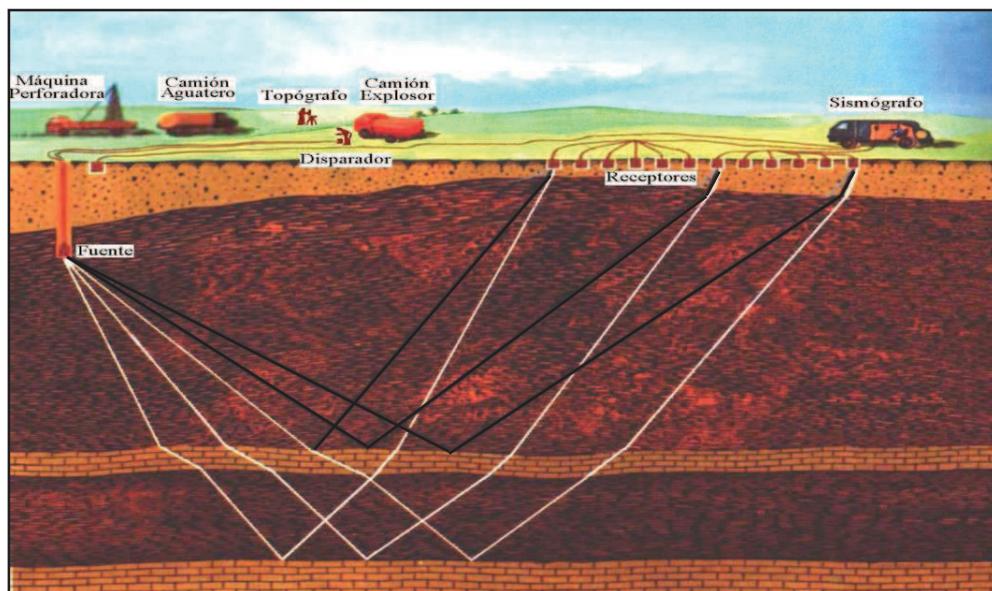


Figura 12. Geometría de adquisición sísmica terrestre con fuente dinamita.

II.2.1 Adquisición Sísmica

Tabla I. Parámetros de adquisición de los datos de sísmica de reflexión del prospecto delta del Río Colorado, adquiridos por PEMEX a finales de los 70's y principios de los 80's.

PARAMETROS	VALORES
Región	Norte
Área	San Felipe
Prospecto	delta del Río Colorado
Nº de línea	4983
Nº canales	48
Tiempo de grabación	6 seg.
Intervalo de muestreo	2 ms.
Filtro bajo	12 Hz.
Filtro alto	128 Hz.
Fuente de energía	Dinamita
Detectores por traza	24
Distancia entre detectores	8 m.
Distancia entre estaciones	50 m.
Distancia entre punto de tiro	100 m.
Patrón de tiro	1150-300-0-300-1150

II.3 Procesamiento de datos sísmicos

El objetivo es destacar la señal con respecto al ruido para generar secciones que muestren una imagen lo más real posible, libre de ruido tanto coherente (*ground roll*) como no coherente (*ruido ambiental*), del subsuelo.

II.3.1 Procesamiento Pre-Apilamiento

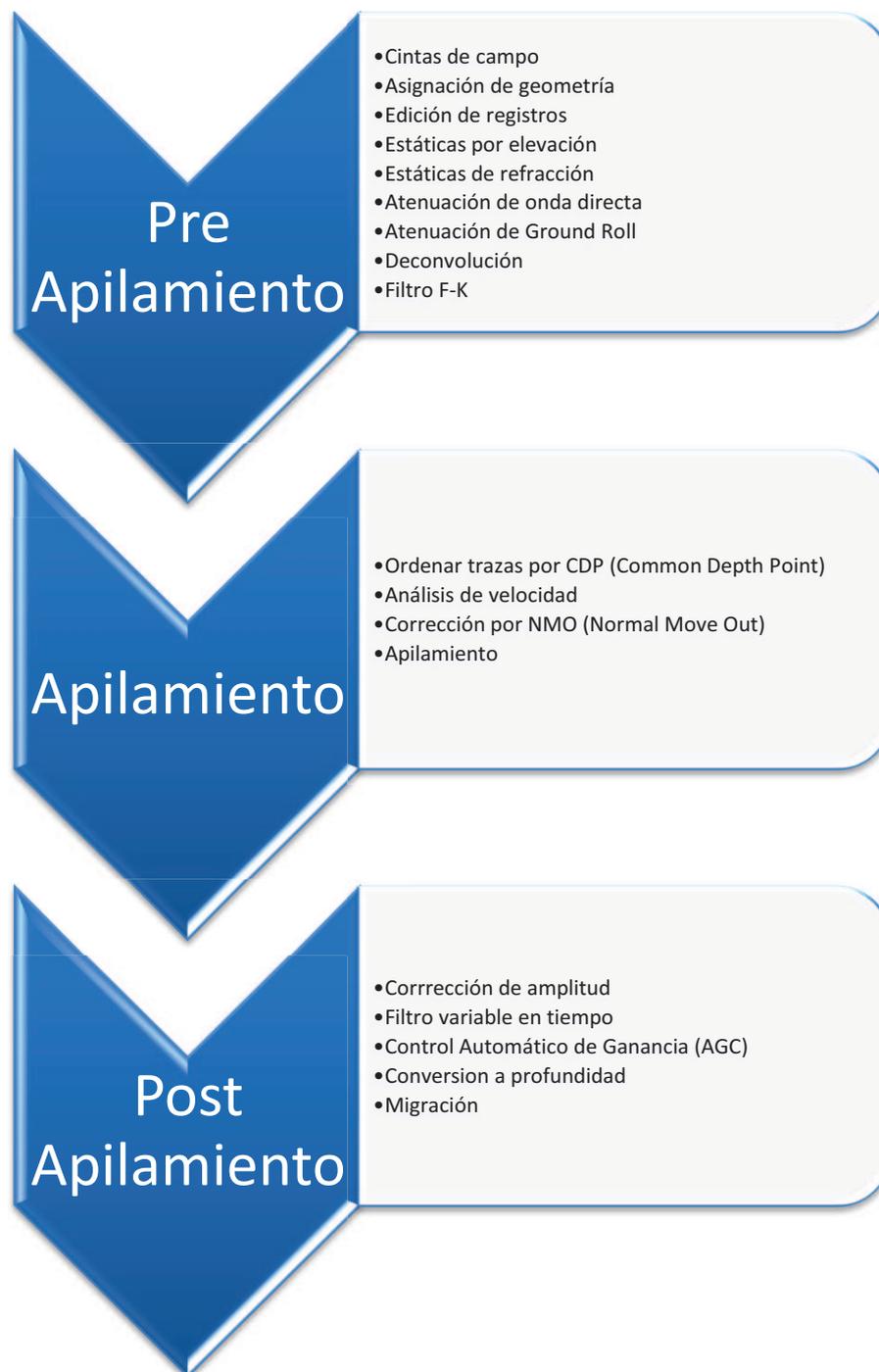


Figura 13. Muestra de manera general la secuencia de procesamiento usada en éste trabajo para sísmica de reflexión 2D multicanal.

II.3.1.1 Cintas de campo

Los datos adquiridos en el campo tienen un formato de grabación SEG-C (Formato C de la *Society of Exploration Geophysicists* por sus siglas en inglés), secuencia de proceso aplicada SEG-C → SEG-Y (Formato Y de la *Society of Exploration Geophysicists*, por sus siglas en inglés), ya que éste es un formato estándar para los datos adquiridos con sismica, el cual es compatible con el paquete comercial de software ProMAX® de *Landmark Graphics Corporation*, utilizado en CICESE para su proceso.

II.3.1.2 Asignación de geometría

En virtud de que no se cuenta con las bitácoras de campo del observador ni del topógrafo, es necesario georeferenciar el mapa en donde se tienen ubicadas las líneas sísmicas, digitizarlas y posteriormente se utiliza un modelo de elevación para asignar, tanto las coordenadas como la altura de los puntos de tiro y de las estaciones receptoras. El modelo de elevación utilizado es el SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) (Farr et al., 2007; Rodríguez et al., 2005), con errores en la horizontal de ~3 m y en la vertical de ~3 m.

<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/srtmBibliography.html>;

http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/error_abs.jpg;

http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/error_random.jpg

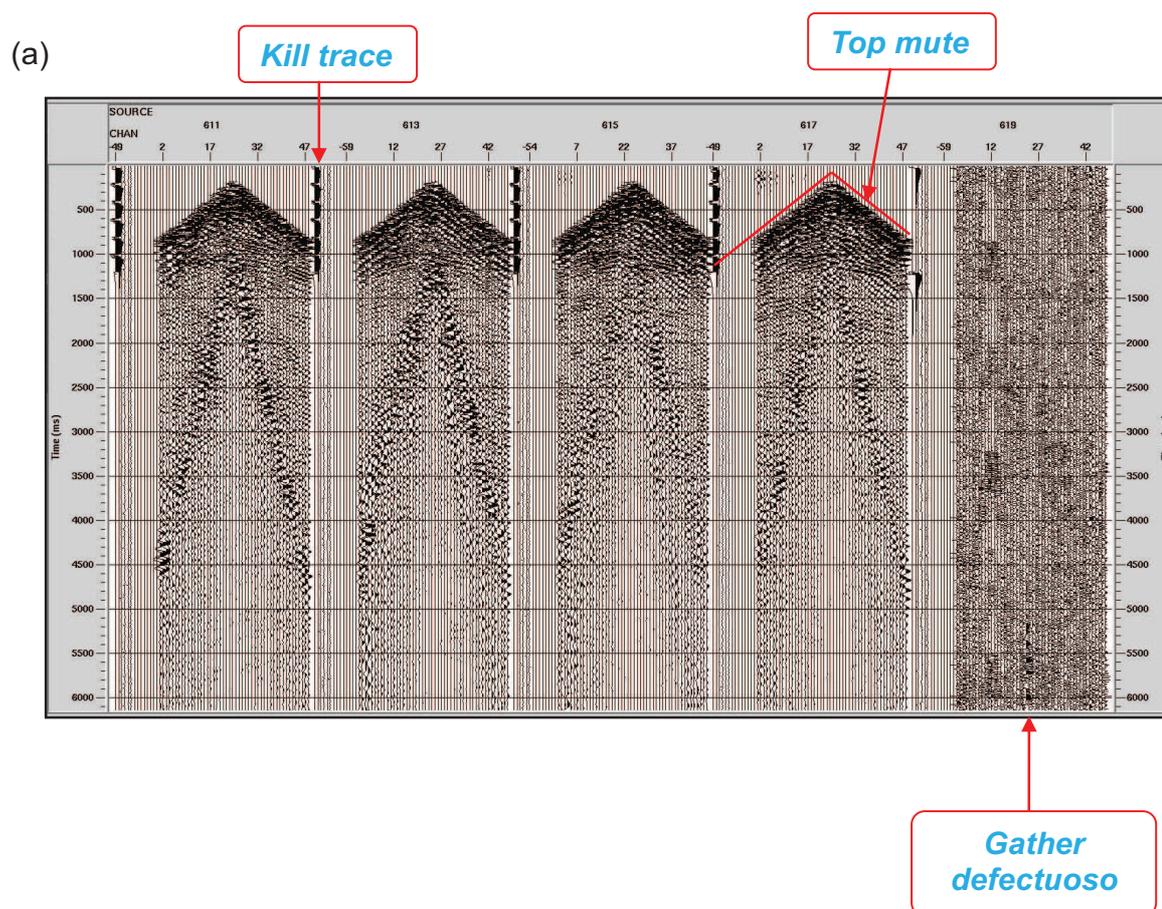
También en ésta etapa del proceso se definirá el patrón de tiro, la distancia entre fuentes, distancia entre receptores y distancia entre fuente-receptor, así como un estudio adicional llamado *Up-hole*².

² Es el estudio adicional que se realiza para determinar el tiempo que tarda en llegar a la superficie la onda de una detonación, en un pozo a una determinada profundidad, es decir, nos permite medir la velocidad de llegada de la onda directa a una capa. La finalidad es determinar el espesor y velocidad de la capa meteorizada y sub-meteorizada.

II.3.1.3 Edición de registros

Se realiza una visualización de los registros de todos los receptores por cada tiro "gather". El objetivo es eliminar aquellas trazas que presentan un alto nivel de ruido no coherente, éste ruido puede ser ocasionado por falsos contactos, mal plantado de geófonos o por cualquier otro tipo de ruido ambiental o cultural, una característica es que podría repetirse en todos los tiros, o simplemente ausencia de señal en un tiro. Para ello se utilizó la herramienta "kill trace", la cual iguala a cero la traza seleccionada.

Adicionalmente se utiliza otra herramienta "top mute", que eliminara todo ruido que no pertenece a la fuente. Este ruido se presenta antes del registro de los primeros arribos.



(b)

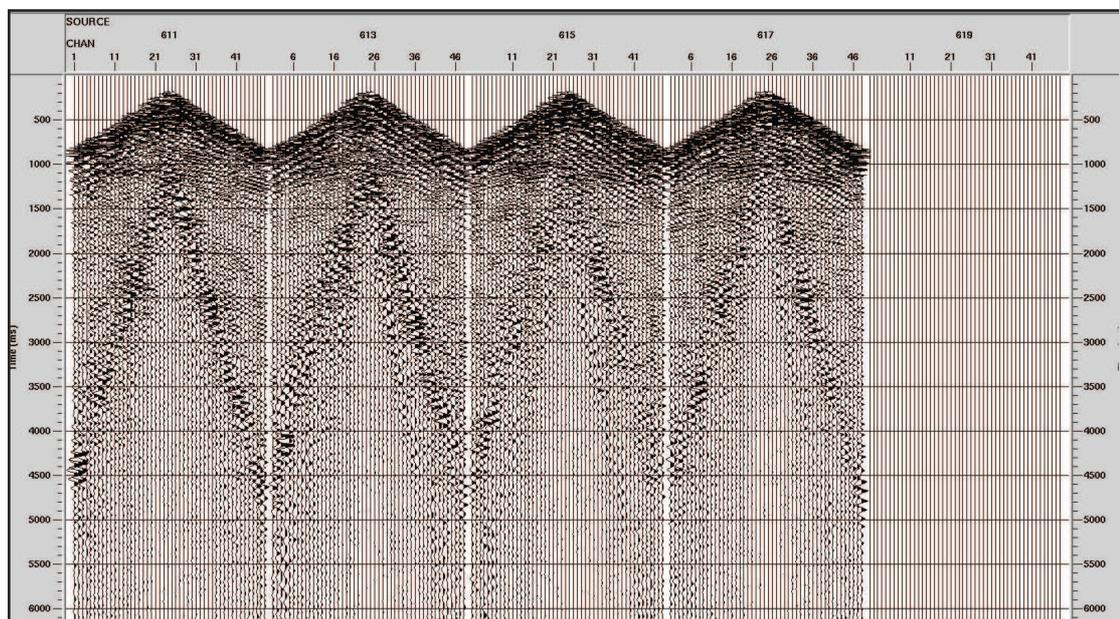


Figura 14. Edición de Registros. (a) muestra los gathers sin proceso alguno. (b) registro al que ya se le aplico las dos herramientas antes descritas.

II.3.1.4 Estáticas por elevación

Son correcciones en tiempo, debido a la topografía. El objetivo es eliminar los efectos que resultan de la variación en la elevación, espesor y velocidad de la capa meteorizada de baja velocidad o “*weathering*”, determinar cuáles serían los tiempos de llegada si las reflexiones se hubieran tomado en un plano horizontal “*datum*”, sin cambios en la capa meteorizada (Regueiro, 1997). Esta corrección se basó en datos de pozo “*Up-Hole survey*” (Figura 15).

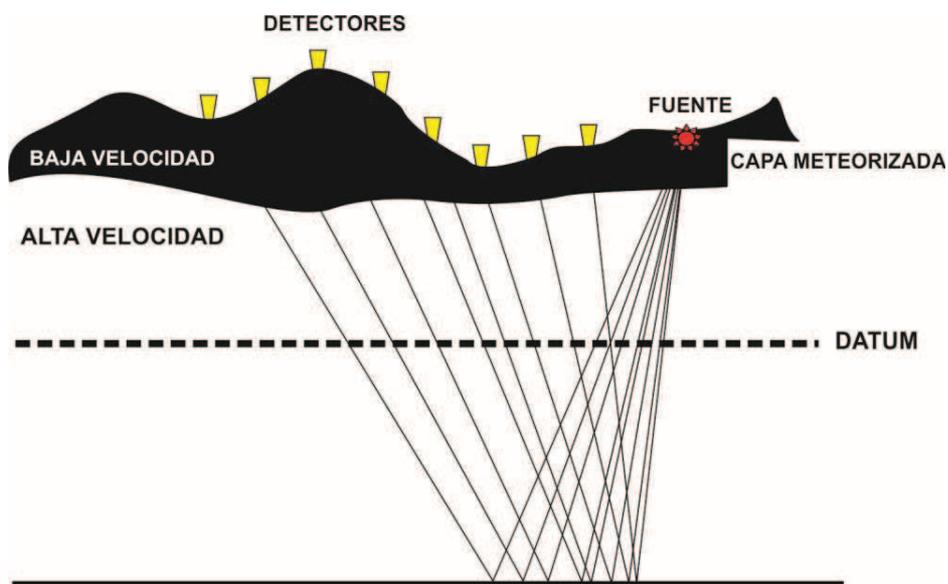


Figura 15. Estáticas de elevación (modificado de Regueiro, 1997). Esta capa, que usualmente tiene de 4 a 50 m de espesor, se caracteriza por velocidades sísmicas que no sólo son bajas (por lo general, entre 250 y 1000 m/s) sino a veces altamente variables.

II.3.1.5 Estáticas de refracción

La capa superficial de la Tierra también puede variar considerablemente en lo que respecta a su composición, pasando de sedimentos aluviales blandos a rocas duras.

La primer señal detectada después del disparo corresponde a la capa de roca dura es por eso que esta corrección se basó en el análisis de los primeros arribos, también se aplica la velocidad de la capa meteorizada y sub-meteorizada calculada a partir del registro "Up-Hole survey" (Figura 16 y 17).

No se puede esperar un buen procesado ni un resultado final correcto si el cálculo de las correcciones estáticas no ha sido rigurosamente realizado.

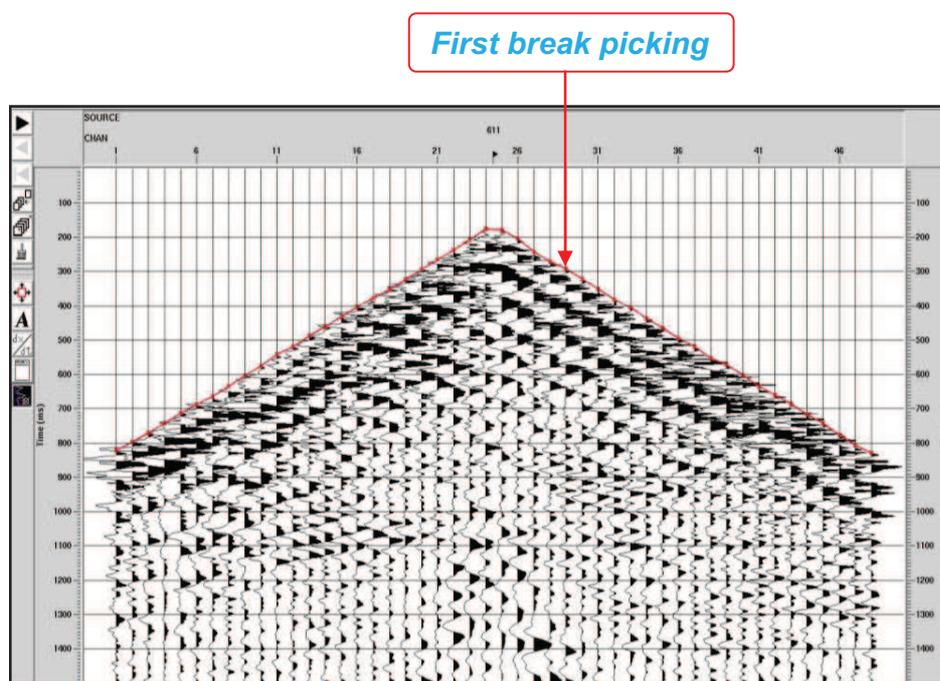


Figura 16. Picking de los primeros arribos.

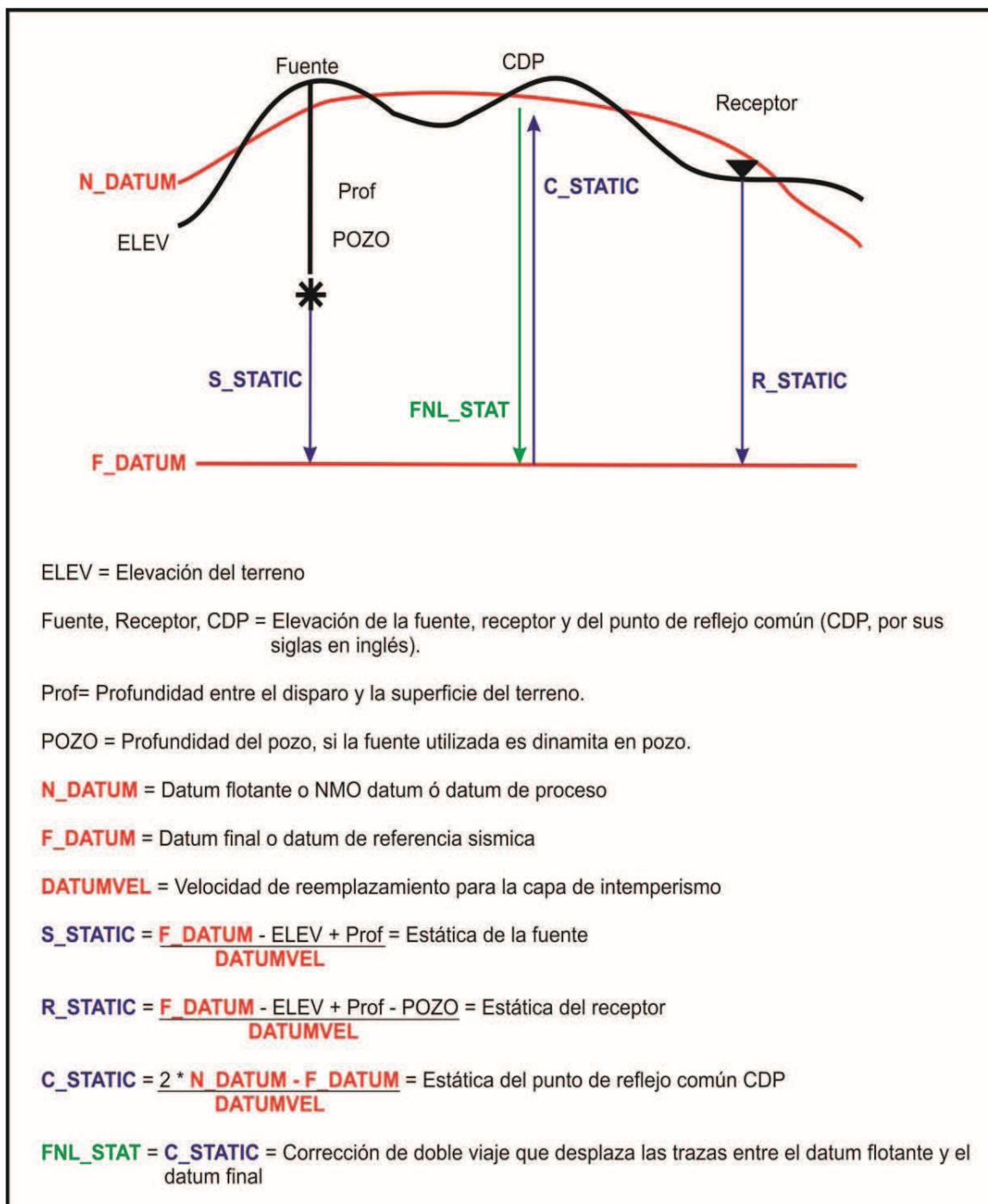


Figura 17. Esquema general de la configuración de los elementos necesarios para realizar la corrección por estática (tomada y modificada de ProMAX®).

II.3.1.6 Atenuación de la onda directa

Otro problema importante de la adquisición de datos terrestres es que las fuentes terrestres típicamente generan energía que viaja por la parte superior de la primera capa, lo que también se conoce como ondas directas, pudiéndose observar en los tiempo iniciales. La onda directa es el primer tren de ondas que genera la fuente y que es detectada en los geófonos.

La atenuación de esta onda se realizó con la herramienta "*Air Blast Attenuation*".

II.3.1.7 Atenuación de "ground roll"

Existen otros tipos de ondas superficiales, como las ondas Rayleigh y Love. Estas ondas se propagan con mayor energía a lo largo de la superficie libre de un sólido. Las ondas superficiales "*ground roll*", están conformadas por la componente vertical de las ondas Rayleigh. Lo que las caracteriza es que son ondas de baja frecuencia y baja velocidad ubicándose entre 12 y 128 Hz. (Yilmaz, 1987).

A pesar de los procesos aplicados, éste ruido coherente que generan las ondas superficiales es muy difícil de eliminar del todo y es inevitable anular éste tren de onda mediante borrado directo. Por tratarse de una zona geológica con materiales poco consolidados (delta del Río Colorado) el "*ground roll*" se superpone a todo el registro con frecuencias y velocidades cercanas a las hipérbolas de reflexión.

La herramienta utilizada en este trabajo para atenuar el "*ground roll*", fue "*surgical mute*", y no se afectaron las reflexiones que en definitiva son el objetivo principal del procesamiento.

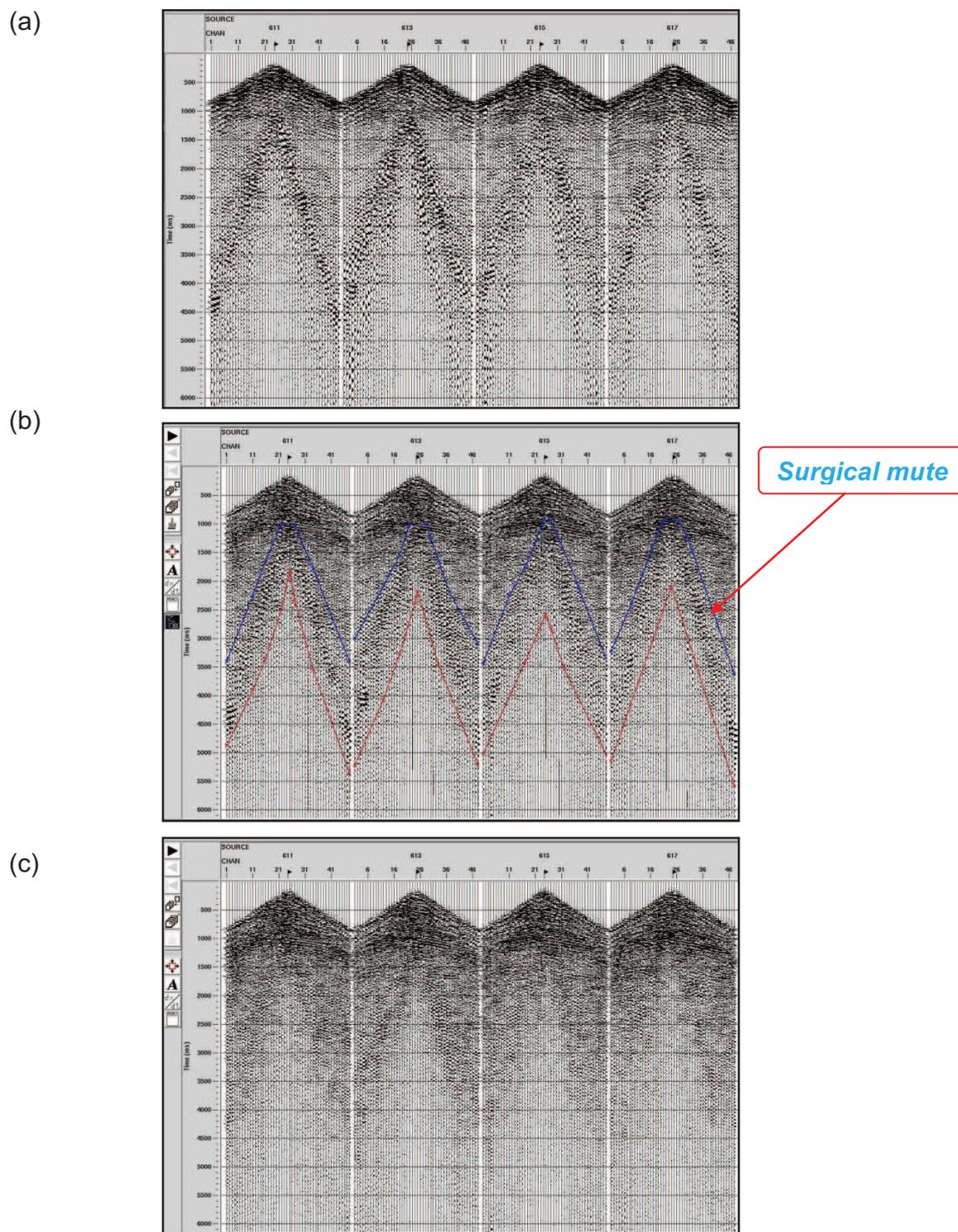


Figura 18. Atenuación de ground roll. (a) registro con ground roll, (b) aplicando surgical mute, (c) registro con ground roll atenuado.

II.3.1.8 Deconvolución

Es una de las operaciones más importantes del procesado, ya que aumenta la resolución temporal (aumento del ancho de banda de la señal) eliminando la ondícula fuente de la señal de salida para así obtener realmente la reflectividad. La deconvolución es un filtro inverso que remueve el efecto de un filtro ya aplicado a una señal. En adquisición sísmica, la señal generada por la fuente viaja a través de la Tierra, donde es filtrada por ésta última antes de llegar a los receptores. La Tierra actúa como un filtro pasa-bajas, atenuando las altas frecuencias y por ende disminuyendo el ancho de banda de la señal. Debido a esto, la señal grabada posee menor resolución que la señal de entrada (Yilmaz, 1987 y Lembang, 2003). Como en la práctica la ondícula fuente de entrada no se conoce, se utiliza la auto-correlación de las trazas sísmicas en lugar de la auto-correlación de la ondícula fuente, por poseer características similares.

El tipo de deconvolución aplicada en éste trabajo fue la deconvolución predictiva, que predice por medio de una ventana dada los eventos múltiples que pueden existir a lo largo de la traza y calcula la ondícula base de la convolución para que los múltiples sean atenuados.

II.3.1.9 Filtro F-K

Los eventos sísmicos que tienen una pendiente en el dominio tiempo-distancia (T-X), pueden ser separados en un dominio de frecuencia-número de onda (F-K). Este procedimiento es útil para eliminar el ruido coherente que presenta una tendencia lineal. El espectro F-K también permite identificar problemas de alias espacial ocasionados por un muestreo espacial insuficiente durante la etapa de adquisición de datos sísmicos (Yilmaz, 1987).

La utilización del filtro F-K se puede hacer antes y/o después del apilamiento y permitirán la eliminación de restos de "ground roll".

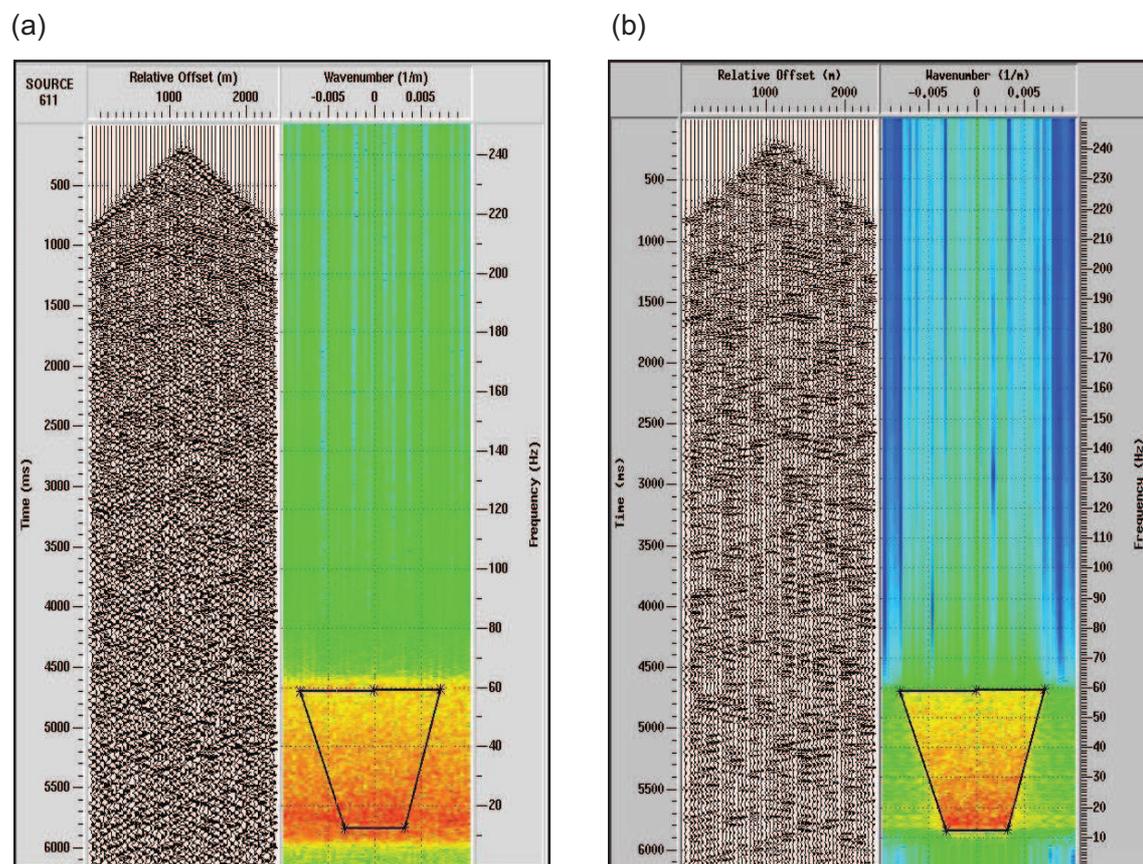


Figura 19. Filtro F-K. (a) Se diseña un polígono en forma de trapecio y todas las frecuencias que contenga dentro es lo que dejara pasar. (b) Respuesta del filtro.

II.3.2 Procesamiento Apilamiento

II.3.2.1 Ordenar trazas por CDP (Common Depth Point)

En ésta etapa del procesamiento, las trazas son ordenadas por CDP. Los datos son grabados en campo utilizando pares de fuente-receptor, con el fin de muestrear varias veces un mismo punto en el subsuelo. Este punto se denomina CMP (*Common Mid Point* por sus siglas en inglés) en superficie, y CDP (*Common Depth Point* por sus siglas en inglés) en el subsuelo (Regueiro, 1997).

Un (bin) es un área rectangular pequeña que usualmente tiene las dimensiones, mitad del intervalo entre receptores por mitad del intervalo entre fuentes. Todos los puntos que caen dentro de esa área pertenecen a un mismo CMP (Cordsen et al., 2000).

En un CDP todas las trazas contienen información del mismo punto en profundidad, y se pueden sumar para dar una sola traza para cada punto en profundidad.

El programa de ordenamiento por CDP está diseñado para tomar las trazas de cada registro de campo y organizar éstas trazas en sus puntos comunes en profundidad, lo hace por medio de la asignación de geometría a la línea sísmica. En la geometría se indica la distancia entre fuentes, la distancia entre receptores, el número de trazas por registro y las coordenadas de cada disparo. Luego partiendo de ésta información el software construye una tabla indicando los puntos comunes en profundidad.

II.3.2.2 Análisis de velocidad

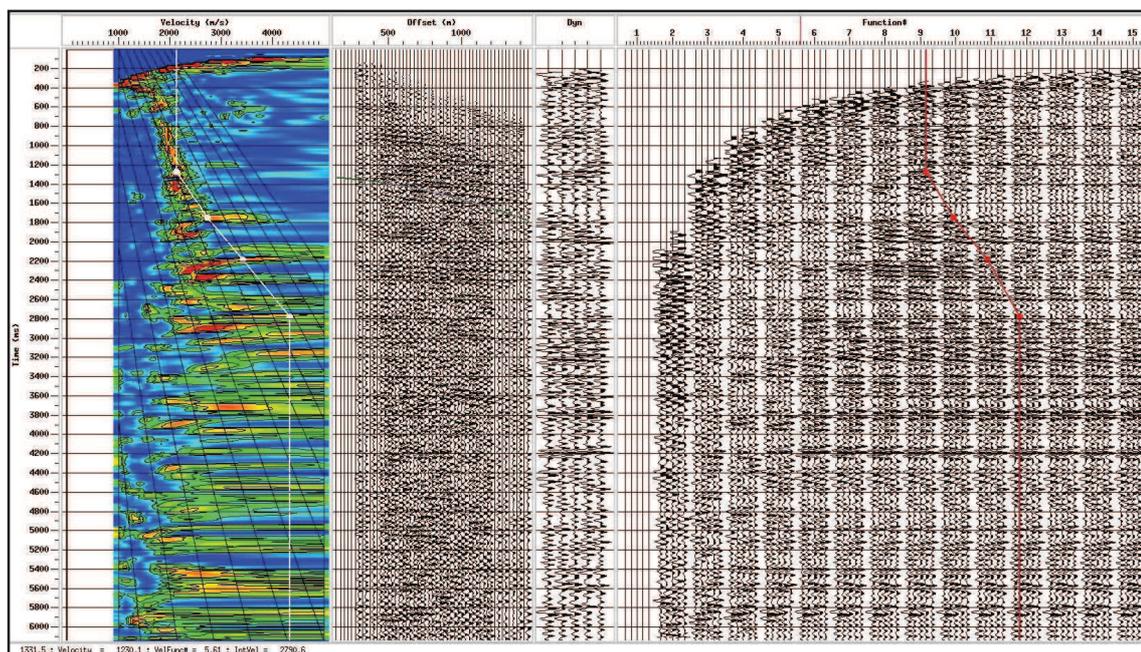
Es esencial conocer los valores del análisis de velocidad para determinar la profundidad, el echado y la ubicación horizontal de reflectores, saber si ocurren distorsiones de velocidad y cerciorarse de la naturaleza de las rocas.

El análisis de velocidad se basa en la selección de CDP "gathers" a lo largo de una línea sísmica. Existen diferentes métodos para hacer el análisis de velocidad, como por ejemplo apilar los eventos con una velocidad constante (CVS o *Constant Velocity Stack*) o hallar un campo de velocidades utilizando semblanza. CVS es el método más común, consiste en generar grupos de CDP, a cada grupo se le aplica una velocidad constante diferente para corregir por NMO.

El método de semblanza tiene como objetivo localizar las zonas de valor máximo de semblanza, que representan aquellos reflectores con mayor contraste de impedancia acústica. Este método da un buen resultado en áreas donde hay una buena relación señal-ruido, en caso contrario se vuelve complicado el análisis de velocidad en éste panel.

El análisis de velocidad es el primer paso para la eliminación de múltiples³ de largo periodo, con un buen análisis de velocidad los múltiples de largo periodo serán eliminados a la hora de realizar el apilado. Los múltiples que se logran eliminar con el proceso de deconvolución son de corto periodo (Fernández, 2005).

³ múltiples son eventos que han sufrido más de una reflexión. Como la amplitud de múltiples es proporcional al producto de los coeficientes de reflexión para cada uno de los reflectores que intervienen, y como el coeficiente de reflexión es muy pequeño para la mayoría de las interfases, sólo los mayores contrastes de impedancia generarán múltiples lo bastante fuertes para ser identificados como eventos distintivos (Sheriff, 2002).



(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 20. Análisis de velocidad. (a) Espectro de semblanza, (b) Registro ordenado por CDP, (c) Corrección por NMO, (d) Método de velocidad constante.

II.3.2.3 Corrección por NMO (Normal Move Out)

La corrección dinámica NMO es un paso central en la secuencia de procesamiento sísmico cuyo principal objetivo es horizontalizar las reflexiones agrupadas en un CDP. NMO se sustenta en una aproximación hiperbólica de la variación del tiempo de tránsito en función del apartamiento de cada reflexión en un agrupamiento de trazas del mismo CDP (Yilmaz, 2001).

Para obtener ésta corrección se utiliza el modelo de velocidad realizado en el método por semblanza. El campo de velocidades se utiliza para realizar las correcciones de sobre tiempo por distancia en las hipérbolas de reflexión NMO, de manera que éstas queden alineadas. Al sumarse constructivamente la traza CDP

resultante tiene la máxima relación señal-ruido (Sheriff, 2002). El objetivo de ésta corrección es el de simular que los sismogramas fueron adquiridos con offset igual a cero (Yilmaz, 2001).

II.3.2.4 Apilamiento

El apilamiento es el paso siguiente a la corrección NMO. El número de trazas sumadas o apiladas se denomina apilamiento, éste proceso se hace por cada CDP y generara una imagen del subsuelo. El apilamiento se hace para ver la continuidad de los reflectores a lo largo de la línea sísmica.

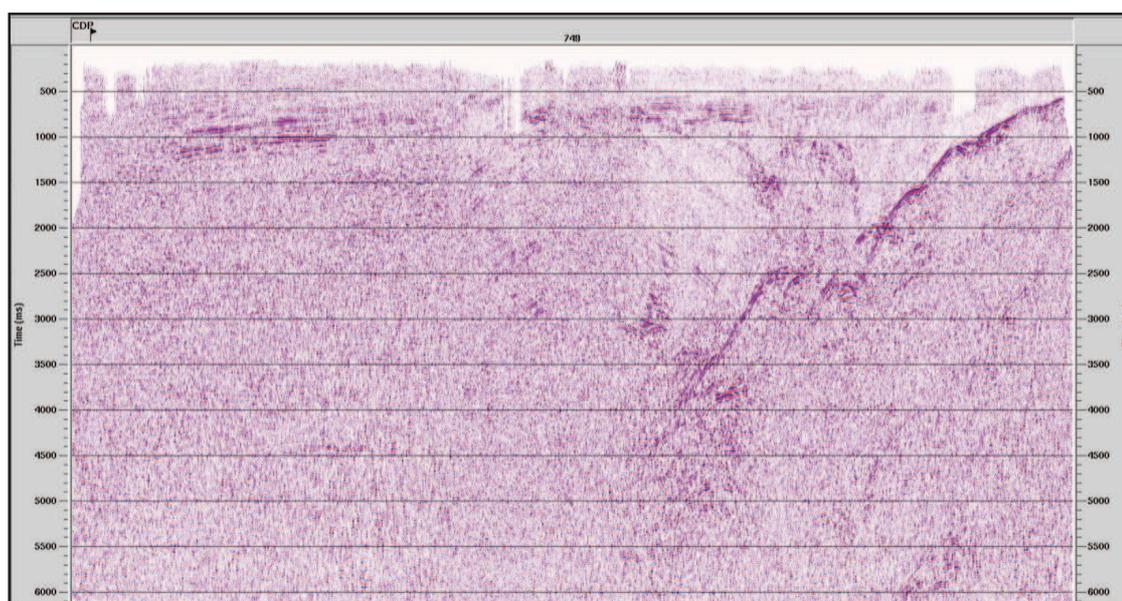


Figura 21. Apilamiento por CDP's. Esta imagen aun no es la definitiva, faltan algunos procesos más como son Corrección de amplitud, Filtro variable en tiempo, Control Automático de ganancia, Conversión a profundidad y Migración.

II.3.3 Procesamiento Post-Apilamiento

II.3.3.1 Corrección de Amplitud

Es el proceso de corrección por el efecto de la pérdida de amplitudes debido a la divergencia esférica del frente de ondas y a pérdidas de energía por el comportamiento parcialmente inelástico del subsuelo (atenuación). La energía de la onda también es atenuada por la roca en la cual se desplaza, primero son atenuadas las altas frecuencias de la onda. La cantidad de atenuación depende del tipo de roca.

El objetivo del proceso TAR "*True Amplitude Recovery*" es corregir y reconstruir las amplitudes debido a la absorción de los materiales y al decaimiento del frente de ondas con las distancia. Las ondas sísmicas superficiales decrecen en intensidad cuando viajan dentro de la Tierra debido a la dispersión geométrica, divergencia, absorción y distribución de la interfase. La divergencia es el factor más importante que influye en el cambio de intensidad en los primeros kilómetros, pero en ocasiones la absorción se vuelve predominante. La absorción aumenta aproximadamente en forma lineal con la frecuencia y, por tanto cambia la forma de la onda con la distancia. La amplitud de reflexión comparada con la amplitud de incidencia varía directamente con respecto al cambio en la impedancia acústica e inversamente proporcional con la suma de las impedancias acústicas (Sheriff, 2002).

El contenido de frecuencia de la señal inicial cambia a medida que el tiempo pasa (variante en tiempo), las frecuencias altas son absorbidas más rápido que las bajas frecuencias, debido a la atenuación intrínseca de las rocas. Para un subsuelo estratificado la amplitud decae aproximadamente por la relación $1/(time*vel**2)$ (Yilmaz, 2001). Se utilizó el modelo obtenido en el análisis de velocidad por semblanza.

II.3.3.2 Filtro variable en tiempo

Por lo general, el espectro de frecuencia de reflexiones sísmicas disminuye al aumentar el tiempo de llegada a medida que las componentes de alta frecuencia se atenúan más rápido por efectos de absorción, múltiples sucesivos y otros procesos de filtrado natural. Por lo tanto, se desea cambiar a menudo el pasa banda hacia frecuencias más bajas para partes posteriores de los registros, o sea, se desea obtener un filtrado variable en tiempo (Sheriff, 2002).

Las decisiones sobre los parámetros de filtro variable con el tiempo se basan en escoger ventanas en tiempo y aplicarle un filtro tipo pasa-banda a cada una de ellas.

II.3.3.3 Control Automático de Ganancia (AGC)

El control automático de ganancia se utiliza para mantener un nivel de señal fijo, reduciendo los efectos de las variaciones de la señal de entrada, es decir, recupera amplitud para los tiempos mayores. Es el método de ganancia más utilizado.

II.3.3.4 Conversión a profundidad

Las secciones sísmicas están en tiempo doble debido a que cada rayo reflejado ha hecho el viaje de ida (incidencia) y vuelta (reflexión). El objetivo final del procesado es proporcionar una referencia a profundidad de estas imágenes sísmicas.

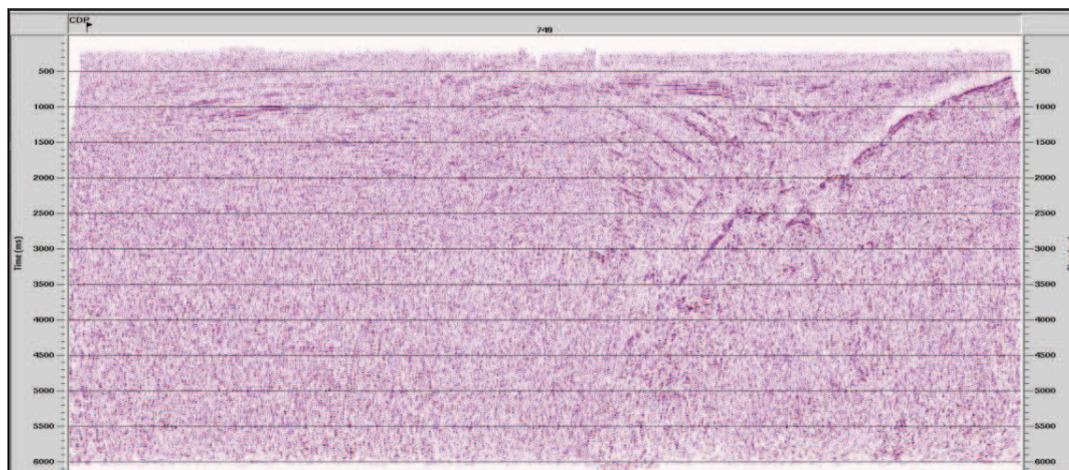
II.3.3.5 Migración

La migración puede realizarse en el dominio de tiempo o en el dominio de la profundidad. La migración en tiempo se aplica para zonas con ausencia de fuertes variaciones laterales en los valores de velocidad, a diferencia de la migración en profundidad que corrige las reflexiones en el espacio, donde se presentan abruptos e importantes variaciones laterales y verticales de la función de velocidad. Para esto se requiere conocer los valores de velocidad tanto vertical como lateral (Yilmaz, 2001). El proceso de migración lleva los eventos a su verdadera posición. La precisión de la migración depende del tipo de algoritmo usado y de la exactitud del análisis de velocidad.

El algoritmo utilizado en éste trabajo fue la migración de Stolt, ésta transforma los datos a un pseudo-dominio de profundidad para aproximar a una velocidad constante de la Tierra, luego reubica la energía en el dominio de la frecuencia-número de onda filtrando la velocidad de conversión. La migración mueve cada uno de esos puntos, llevándolos al lugar de donde en realidad proviene tal energía. Posteriormente los datos son de nuevo convertidos al dominio del tiempo y representan una imagen sísmica que puede interpretarse como sección geológica.

En éste trabajo se aplicó la conversión a profundidad y posteriormente su migración, debido a que se tienen datos de pozo que permiten acotar la profundidad.

(a)



(b)

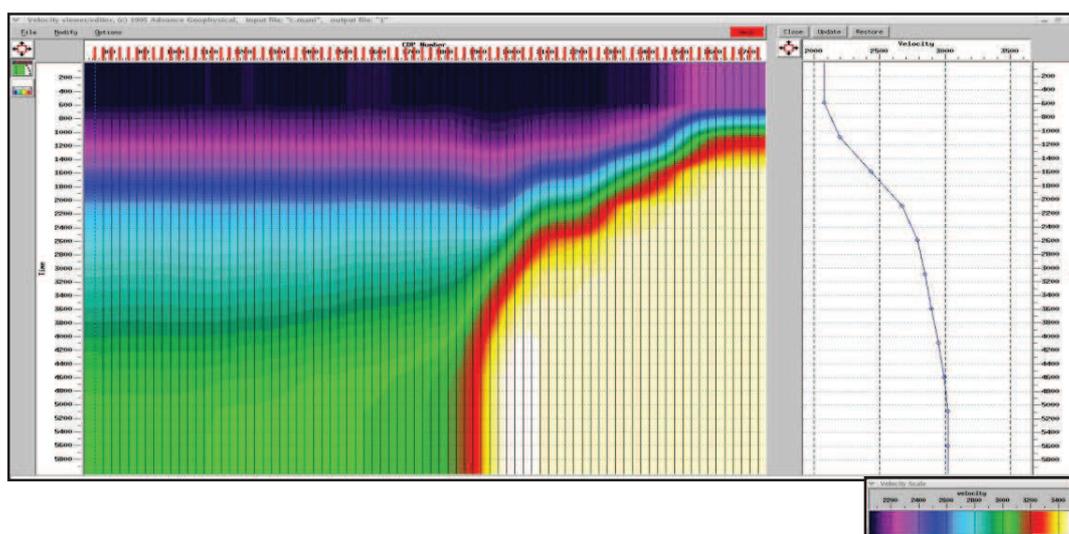


Figura 22. Migración. (a) Sección sísmica migrada en tiempo, (b) Análisis de velocidad utilizado para el objetivo de la migración.

Capítulo III

Resultados

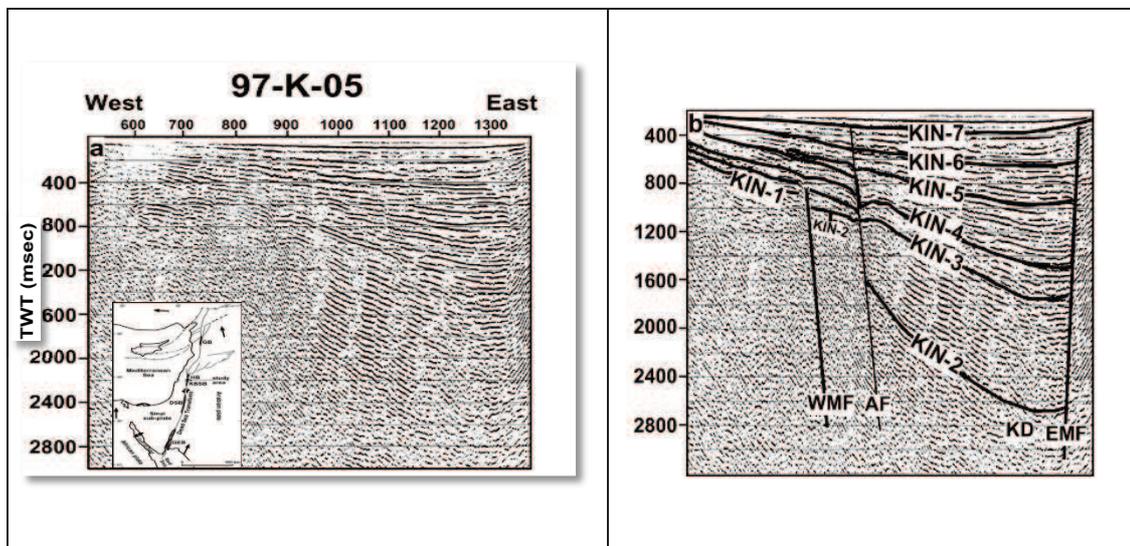
Se generaron secciones sísmicas las cuales ayudan a conocer características estructurales y sismoestratigráficas, muchas de las cuales hasta ahora desconocidas en un sector del delta del Río Colorado, a profundidades de entre 500 m y 5000 m. Los resultados son mostrados con la descripción de las secciones sísmicas, posteriormente se presenta la correlación de estructuras, la geometría del basamento acústico, finalizando con la configuración de los horizontes sismoestratigráficos interpretados en las secciones o perfiles. Estos resultados se comparan con un mapa de anomalía de Bouguer.

Perfiles sísmicos de PEMEX situados en el alto Golfo de California muestran el efecto de la deformación de la falla Cerro Prieto (Aragón-Arreola, 2006; Aguilar-Campos, 2007 y González-Escobar et al., 2009), considerada como corteza transicional y no como oceánica, debido a la ausencia de evidencia de formación de piso oceánico (Persaud et al., 2003).

Las secciones sísmicas K-05 y 5011 muestran dos ejemplos de fallas transformantes (Figura 23-a y b): Una en el mar Muerto y otra en el sector norte del Golfo de California. La sección sísmica mostrada en la figura 23-b, se localiza al SE de nuestra área de estudio. En el sector NE de dicho perfil se puede apreciar la presencia de la falla Cerro Prieto, y al SW de dicha estructura se tiene un "rollover" (ver Figura 24 y 26), estando éste sector lleno de sedimentos debido a que al moverse el bloque oeste (placa tectónica del Pacífico), se genera un

espacio que debe de ser rellenado por sedimentos.

a)



b)

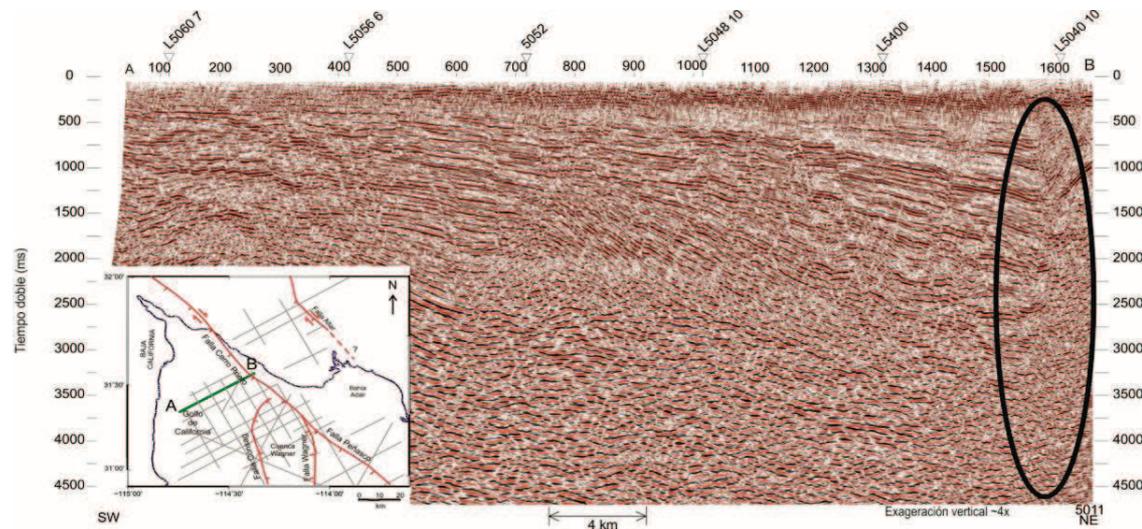


Figura 23. a) Perfil K-05 de sismica de reflexión en la parte norte del mar Muerto, Israel, mostrando la falla transformante (EMF), depresión cursi (KD), falla Almagor (AF) y falla marginal occidental (WMF) (tomada de Hurwitz et al., 2002). b) Perfil número 5011 de sismica de reflexión en el alto Gofo de California mostrando la falla transformante Cerro Prieto enmarcada por el lóbulo negro, (tomada de Aguilar-Campos, 2007). En esta última, note el espesor de sedimentos del lado SW de la falla Cerro Prieto (>4000 milisegundos, tiempo doble de viaje, los cuales corresponden a ~5000 metros de profundidad).

Con estas primicias de formas de fallas transformantes en perfiles sísmicos de reflexión, procedemos a interpretar los perfiles procesados anteriormente.

III.1 Secciones Sísmicas

La interpretación se realizó en seis líneas sísmicas, las cuales también fueron procesadas en el presente trabajo. Las líneas 4985, 4983, 4981, 4979_b1, 4979_b2 con orientación SW-NE y la línea 31 tiene orientación sur-norte aunque está localizada al norte de las líneas transversales y no permite el amarre de la interpretación de las líneas en dirección SW-NE (Figura 11). En ésta interpretación también se utilizó la línea sísmica 5011 (Figura 23-b) localizada en el extremo norte de la malla sísmica de PEMEX en el alto Golfo de California (Aguilar-Campos, 2007). La separación aproximada entre las líneas sísmicas es de 5 km. Los datos sísmicos se migraron en tiempo y se les aplicó una conversión a profundidad utilizando las velocidades de apilamiento y la profundidad del basamento de 4270 m cortado en el pozo W-3. Entre las profundidades de 700 a 5000 m es en donde los horizontes y el sistema de fallas geológicas muestran mejor resolución. Las líneas con dirección SW-NE cortan de manera perpendicular lo que *a priori* se considera el trazo de la falla Cerro Prieto.

A continuación se hace una descripción de cada una de las líneas sísmicas de sur a norte.

III.1.1 Sección 4985.

La sección 4985 se encuentra al SE de la zona de estudio, con una orientación N64°E y una longitud de 60 km. Este perfil muestra las fallas, horizontes sismoestratigráficos interpretados así como el basamento acústico (Figura 24).

Se observa que la mayor cantidad de deformación está presente al SW del perfil, debido a la gran cantidad de fallas presentes que alcanza en promedio 5 fallas por km. Muchas de las fallas sin duda están sepultadas por los sedimentos en el sector más al SW (Figura 24). Aun cuando la resolución de la sísmica en superficie no es buena, dado que el objetivo de ésta información desde el punto de vista de exploración petrolera no es analizar la parte más superficial de terreno, podemos decir que la mayoría de las fallas no cortan a superficie, por lo que una de las preguntas formuladas en la introducción y que de alguna manera era sabido, tiene respuesta: sí existen fallas sepultadas por sedimentos, pero es realmente sorprendente la gran cantidad de ellas.

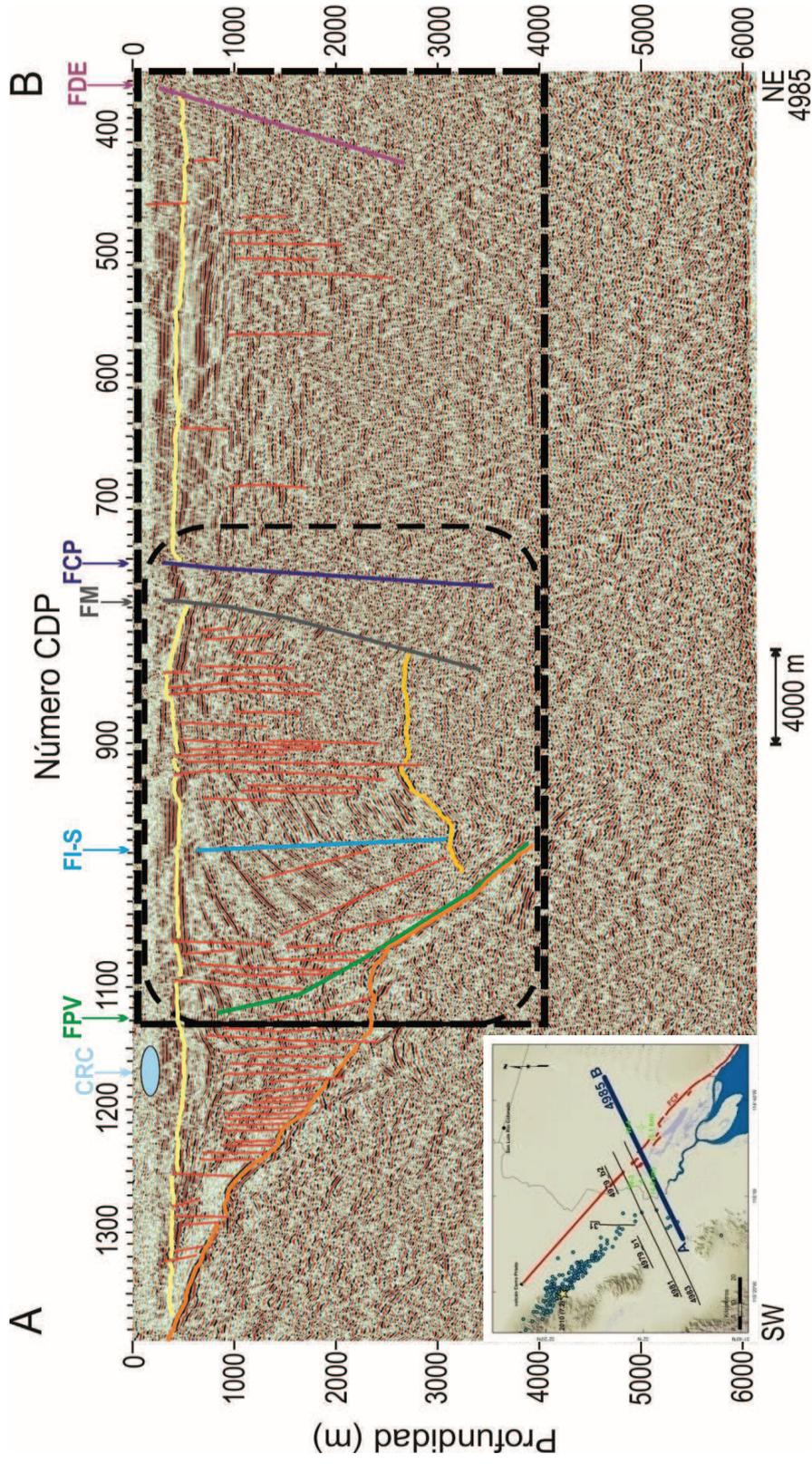


Figura 24. Perfil A-B de la línea 4985 SW-NE. Líneas en rojo representan las fallas menores interpretadas. Las líneas en amarillo y naranja representan los sismorefltores de un límite de secuencia y del basamento cristalino, respectivamente. De NE a SW se presentan las fallas mayores: Desierto (FDE), Cerro Prieto (FCP), Mesa (FM), Indiviso-S (FI-S), Pangas Viejas (FPV), las cuales también se observan en los perfiles al norte, excepto la falla Desierto que es en el único perfil observada. El cauce moderno del Río Colorado (CRC) se ubica sobre un depocentro local. Los recuadros en negro representan un acercamiento mostrado en las figuras 26 y 27. Se incluye mapa de ubicación de éste perfil, la línea en rojo indica la ubicación de la falla Cerro Prieto, tomada de (Fonseca-López, 1982).

Esta línea corta el trazo de la falla Cerro Prieto transversalmente, tal y como está reportada en la literatura (Fonseca-López, 1982), la cual se observa a la altura del CDP 750 representada de color azul en la sección interpretada (Figura 24). La falla Cerro Prieto produce una interrupción lateral de los reflectores de fuerte amplitud que se observan al oeste de la falla Cerro Prieto (Figura 24). En esta zona el desplazamiento vertical no es muy evidente y esto hace que la falla Cerro Prieto no presente una gran expresión como se esperaba. Esta falla corta un grueso paquete sedimentario y no se observa basamento acústico en su vecindad. En la parte central del perfil los reflectores a profundidad tienden a ser muy caóticos, siendo este comportamiento similar al NE, pero a menor profundidad.

El basamento acústico profundiza de oeste a este y se observa hasta la cercanía del CDP 1000 que coincide con la posición de la falla Indiviso-S (FI-S), ubicado hacia la parte central del perfil a una profundidad de ~4000 m. Al SW sube a una profundidad de ~300 m, y seguramente éste continúa subiendo fuera del perfil hasta alcanzar la superficie en la Sierra Las Pintas. Hacia el NE el reflector que identifica el basamento acústico no se observa.

La configuración de horizontes sismoestratigráficos fue compilada por la calidad regular de las imágenes sísmicas y debido a la deformación de la secuencia estratigráfica solo un horizonte de fuerte amplitud pudo ser trazado a través de todo el perfil (horizonte color amarillo claro en Figura 24) sin mayor problema a lo largo del todo el perfil a una profundidad promedio ~300 m, mientras que otro de los horizontes solo se pudo configurar en un sector muy pequeño (color amarillo oscuro), ya que al SW se tienen la frontera del basamento acústico y hacia el NE, los reflectores sísmicos son muy caóticos, lo que resulta prácticamente imposible realizar una interpretación.

Entre los CDP's 1100-1000 se puede observar una falla lítrica (falla Pangas Viejas, color verde), y se observan una serie de falla antitéticas de menor

expresión. La observación importante es que la componente normal de la falla Cerro Prieto es antitética a ésta falla lístrica y ambas tienden a unirse en profundidad, se ubica por debajo del cauce moderno del Río Colorado (Figura 24). La falla Pangas Viejas controla una estructura de tipo "rollover" y la falla Indiviso-S su "anticlinal rollover" (Figura 25). En éste sector se observa que el "rollover" que produce la falla Pangas Viejas registra una importante subsidencia (>2500 m) por debajo del reflector amarillo de posible edad Pleistoceno (Helenes et al., 2009).

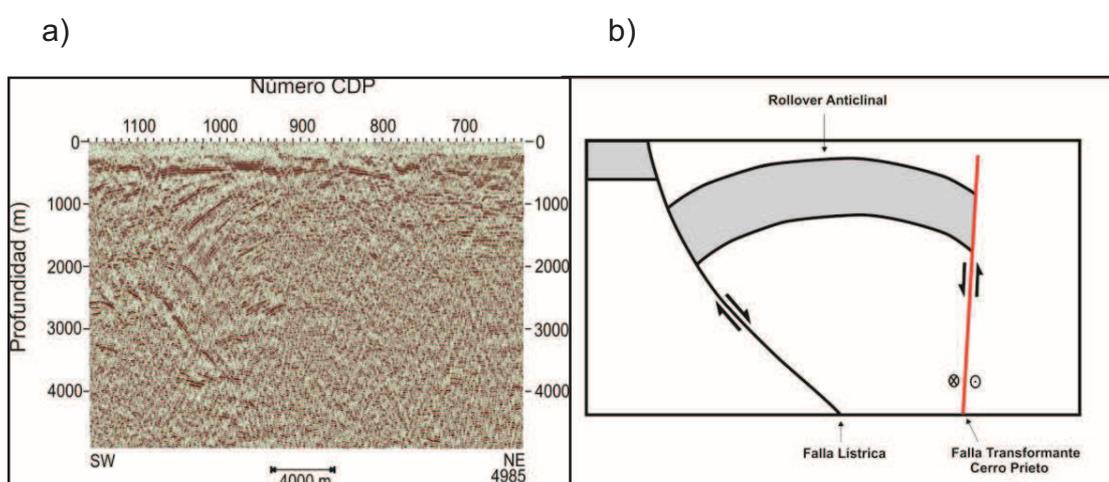


Figura 25. a) Rollover observado en la sección sísmica 4985 y su rollover anticlinal (flexión antitética) ocurre cuando una falla lístrica se colapsa. b) Esquema de una falla lístrica con una flexura antitética (rollover). La falla Cerro Prieto acomoda principalmente cizalla lateral y posiblemente corta a la falla lístrica a profundidad.

El sector marcado en el recuadro de la sección sísmica de la figura 25-a se muestra en la figura 26, ésta figura muestra la falla lístrica Pangas Viejas, lo que nos está diciendo que se tiene presente un régimen extensional. Este tipo de fallas son definidas como fallas normales curvadas en las cuales la superficie de la falla es cóncava hacia arriba; su buzamiento decrece con la profundidad. El ancho del "rollover" es de ~4 km, limitado al oeste por la falla Pangas Viejas y al este por la falla Indiviso-S. El ancho del "anticlinal rollover" es de ~10 km, limitado al oeste por la falla Pangas Viejas y al este por la falla Mesa.

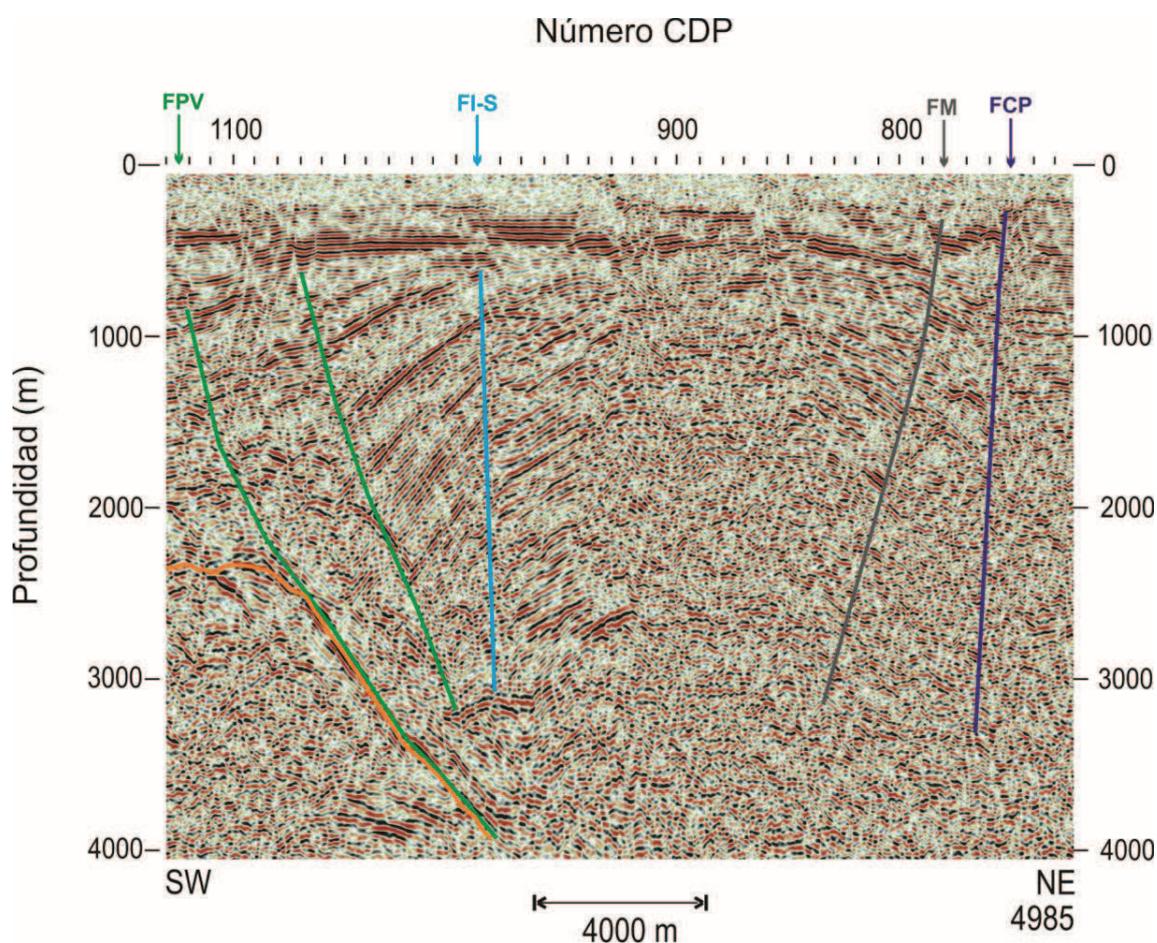


Figura 26. Esquema de una falla listrica separando bloques rígidos, la continua sedimentación durante el desplazamiento de la falla produce una secuencia en forma de abanico y el anticlinal rollover. Se incluyen las fallas: FCP: Cerro Prieto; FM: Mesa; FI-S: Indiviso-S; FPV: Pangas Viejas.

Se observa que el espesor de la secuencia sedimentaria se incrementa, hacia la falla mayor denominada Pangas Viejas (color verde), y es notable que por arriba del reflector de color amarillo claro (Plioceno), los horizontes sismoestratigráficos están menos desplazados por las fallas. Si utilizamos éste horizonte como una referencia, significa que la actividad tectónica, la subsidencia y posiblemente la actividad de la falla Pangas Viejas, ha disminuido significativamente su desplazamiento vertical desde entonces. Se visualiza poca subsidencia a la altura

de la falla mayor Pangas Viejas (color verde), la resolución de la sísmica a profundidades <300 m no fue buena, pero no se descarta la idea de que algunas fallas cortan los depósitos deltaicos hasta la superficie.

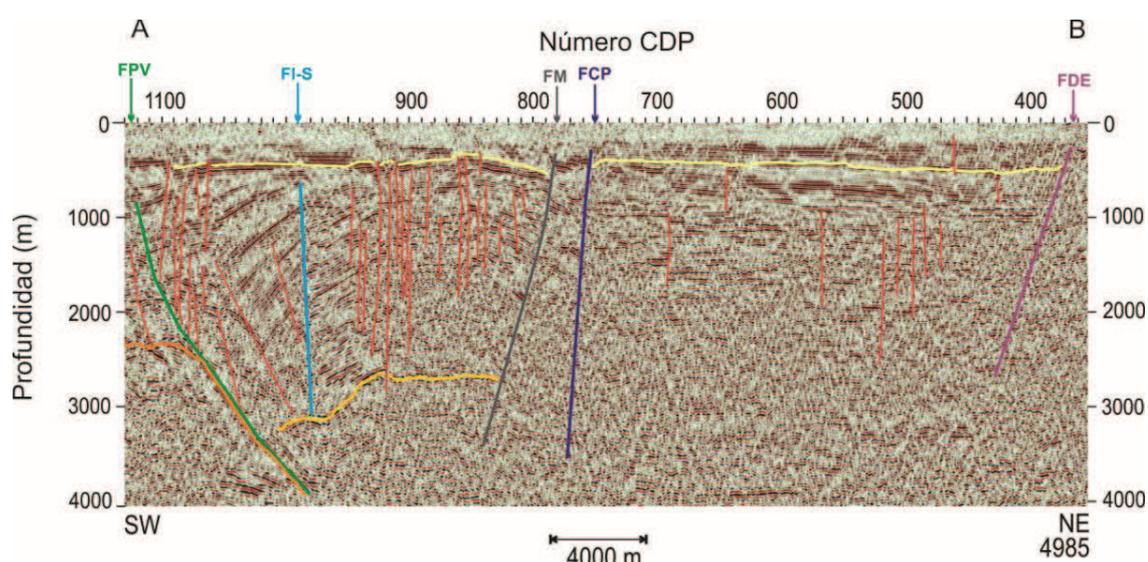


Figura 27. Acercamiento en un sector de la línea 4985. Se muestran las fallas mayores: Desierto (FDE), Cerro Prieto (FCP), Mesa (FM), Indiviso-S (FI-S) y Pangas Viejas (FPV).

En la parte central del perfil sísmico 4985 se muestra un acercamiento (Figuras 26 y 27), en donde se observa el "anticlinal rollover", cuyo eje se ubica cercano al CDP 900 y está controlado por la falla lítrica Pangas Viejas (color verde), puede verse en una manera simplificada (Figura 26). La cima de la estructura "anticlinal rollover" es somera, inicia ~300 m, entre los CDP's 1000-800 y está cortada por dos fallas mayores denominadas Indiviso-S (azul claro) y Mesa (gris) ésta última se ubica bajo la Mesa de Andrade. El "anticlinal rollover" está presente en dos líneas sísmicas que se localizan al norte del perfil 4985. El sector NE del perfil 4985 al este de la falla Cerro Prieto y bajo el Desierto de Altar se tiene poca existencia de fallas sepultadas por los sedimentos, ésta zona es considerada tectónicamente inactiva (Pacheco, et al., 2006). Casi al final de la línea al NE la falla Desierto (aquí nombrada por primera vez) (color guinda), corta a la secuencia

sedimentaria que se observa al oeste de ésta falla, mientras que al este los reflectores son caóticos, mostrando una estructura que coincide con un límite entre altos y bajos gravimétricos, como se mostrará más adelante.

III.1.2 Sección 4983

La sección 4983, se localiza al norte del perfil 4985 descrito anteriormente y también corta transversalmente a la falla Cerro Prieto un poco más al NW de la línea 4985 (Figuras 11 y 28), por lo que esta línea no proporciona información de la región NE en el Desierto de Altar, tiene una orientación N64°E y una longitud de 60 km (Figura 28). Están incluidas las fallas, horizontes sismoestratigráficos interpretados así como el basamento acústico. En éste perfil es en donde se localiza el pozo exploratorio W-3 propiedad de PEMEX, con una profundidad al basamento de 4268 m.

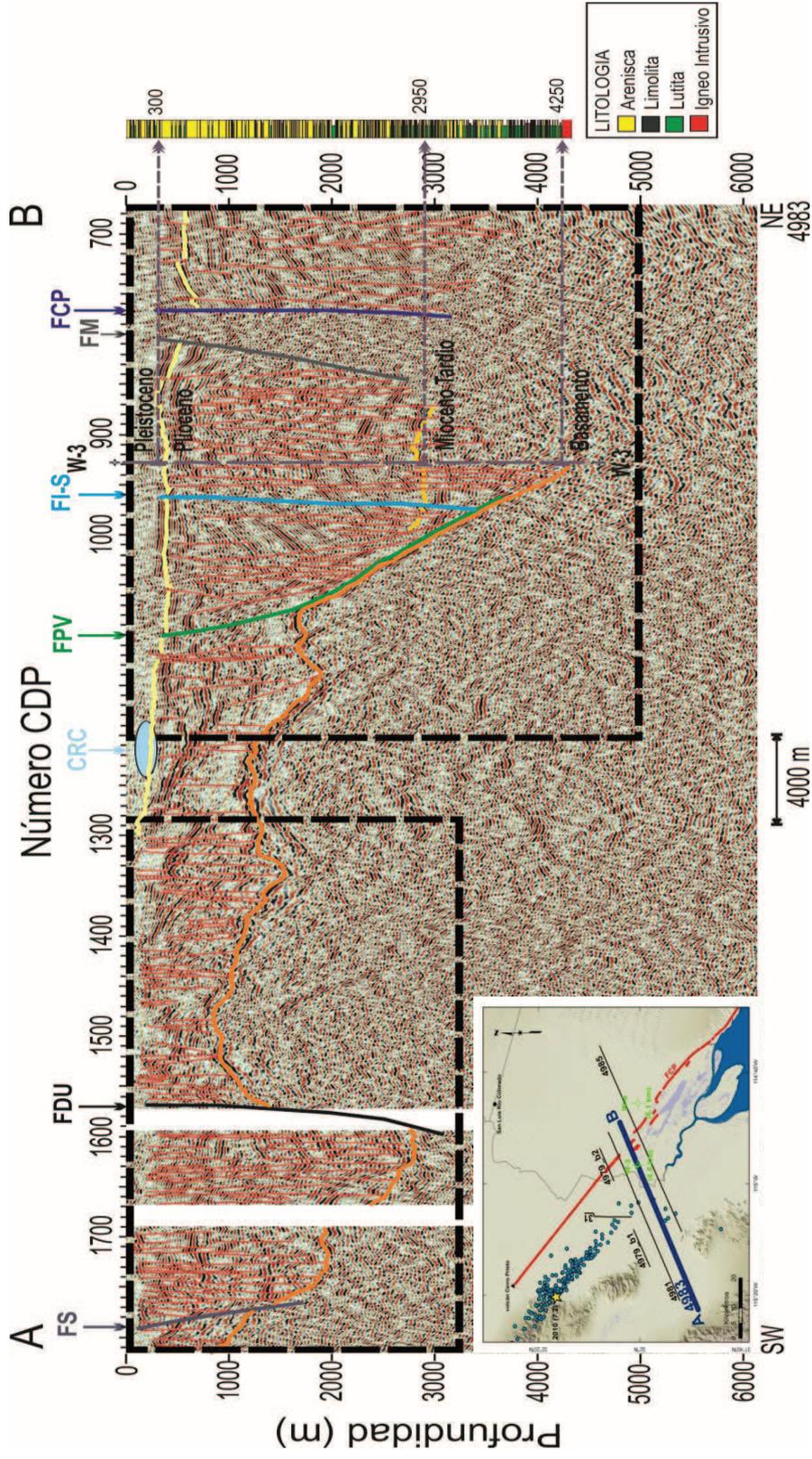


Figura 28. Perfil A-B de la línea 4983 SW-NE. Líneas en rojo representan las fallas menores interpretadas. Los horizontes amarillo y naranja representan los sismoreflectores de un límite de secuencia y del basamento acústico respectivamente. Fallas mayores: Cerro Prieto (FCP), Mesa (FM), Indiviso-S (FI-S), Pangas Viejas (FPV), Dunas (FDU), Saldaña (FS). Los recuadros negros presentan un acercamiento mostrado en la figura 29. CRC y lóbulo, representan el cauce moderno del Río Colorado. Se presenta la columna litológica del pozo W-3 tomado de Pacheco et al. (2006) y Helenes et al. (2009) y el mapa de ubicación de éste perfil, en el mapa la línea en rojo indica la ubicación de la falla Cerro Prieto.

El perfil 4983, es sorprendente la gran densidad de fallas, teniéndose ~7 fallas por km (Figura 28). La presencia de un fuerte sismorelector a casi todo lo largo del perfil es bastante claro, el cual es considerado como basamento acústico (línea naranja). En el sector NE se tiene un gran espesor de sedimentos, no observándose la posible presencia de basamento acústico. Este depocentro corresponde a lo que denominaremos cuenca Montague, mientras que en el sector SW se observa otro depocentro el cual se denominó cuenca Las Tinajas y que más adelante se comentara del porque de estos nombres.

En la línea 4983 nuevamente se observa el "rollover" y su anticlinal, controlan el depocentro de la cuenca Montague. Se observa una falla lítrica (color verde), en la cual descansa el "rollover", en donde en el bloque de piso se tiene el basamento acústico y en el bloque de techo se tiene la cubierta sedimentaria. En el extremo este del perfil se ubica el pozo W-3, se incluye su litología (Pacheco et al., 2006). Este pozo se localiza a la altura del CDP 930 y tiene una profundidad de 4530 m (Figura 28).

La cronoestratigrafía del pozo W-3 indica tres secuencias cronoestratigráficas principales (Helenes et al. 2009): 1) cima del Plioceno (1.8 millones de años) a 300 m, el cual se pudo seguir a lo largo de todo el perfil, 2) la cima del Mioceno Tardío (5.3 millones de años) a 2850 m, el cual no se puede interpretar con confianza debido a la ausencia de un reflector claro y a lo caótico de la sísmica y 3) el horizonte profundo que cortó a una profundidad de 4268 m granodiorita y constituye el basamento cristalino. De SW a NE del perfil, el basamento es somero (~1000 m), profundizando alrededor de CDP 1600, para después al SW tender a ser somero. En la cuenca Montague yendo hacia el NE, el basamento tiende a irse haciendo profundo entre los CDP 1680 y 1100, a la altura de la falla Pangas Viejas (verde claro) (Figuras 28 y 29-b), para después tener una gran caída buzando al NE pudiéndose interpretar a la altura del CDP 930 en donde se localiza el Pozo W-3. Al desplegar el pozo junto con la sísmica, vemos la gran

correlación que existe entre la profundidad reportada del basamento cristalino con lo que, desde el punto de vista de interpretación sísmica es el basamento acústico. Esta gran correlación entre lo procesado y lo "real" reportado en el pozo, nos lleva a creer que los modelos de velocidad obtenidos para estos perfiles son aceptables. Ya que los modelos de velocidades no pueden ser comparados, salvo con el modelo de velocidad que está más cerca del pozo, no es posible hacer un análisis de error y/o confianza. En este punto, también es en donde se inicia la interpretación en la sísmica de los otros dos horizontes mencionados (Mioceno Tardío y cima del Plioceno). Por otro lado podemos decir que si al este del Pozo W-3 existe basamento acústico, éste debería de ser más profundo que ~4300m.

Se muestra un acertamiento tanto del sector SW como del NE respectivamente del perfil 4983 (Figuras 29-a y b).

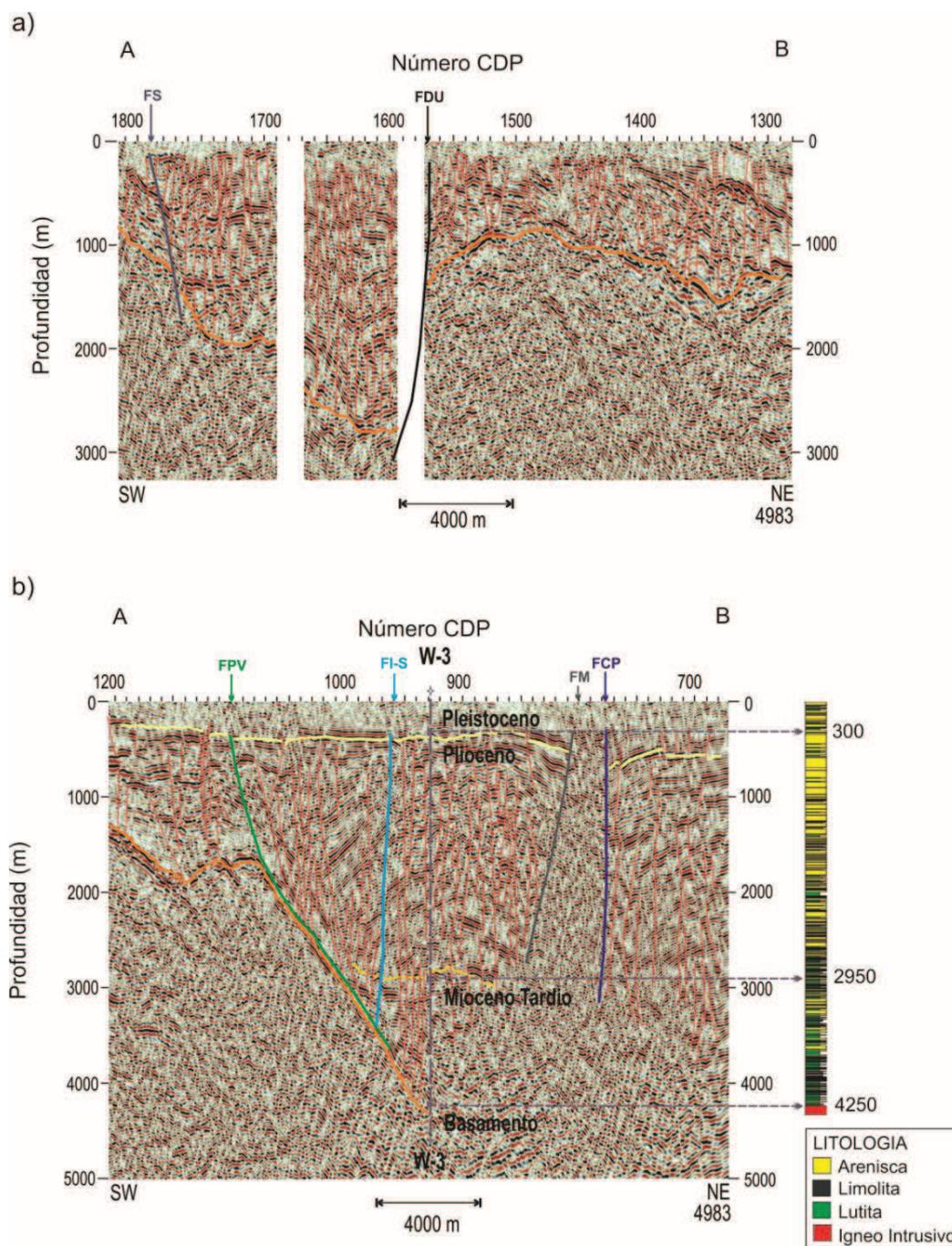


Figura 29. Acercamiento del perfil 4983. a) sector SW y b) sector NE. En el sector SW se observa el depocentro Las Tinajas. Las líneas de color rojo representan las fallas menores interpretadas. Las líneas en amarillo y naranja representan los sismorefectores de un límite de secuencia y del basamento cristalino, respectivamente. Se muestran las fallas mayores: Cerro Prieto (FCP), Mesa (FM), Indiviso-S (FI-S) y Pangas Viejas (FPV). W-3 Pozo exploratorio y su columna litológica, tomada de Pacheco et al. (2006).

El sector SW del perfil 4983 (Figura 29-a), se observa que el basamento en la parte más extrema al SW, es somero ~1000 m, mostrando una cuenca con una profundidad de entre ~1000 m y ~3000 m y con ancho de ~9000 m en superficie, se le llamó cuenca Las Tinajas. Este sector está localizado entre las sierras Las Tinajas y Las Pintas (Figura 2 y 11). Esta cuenca está limitada por dos fallas mayores: al oeste por la falla Saldaña (azul acero) y al este por la falla Dunas (en negro), (Figuras 28 y 29-a).

El sector NE del perfil 4983 (Figura 29-b), se tiene la presencia de la falla lítrica Pangas Viejas (verde claro), indicando que es la que controla la extensión en la región. La falla Indiviso-S, se ubica en el flanco oeste del "*anticlinal rollover*", cortando un gran espesor de sedimentos, mientras que su límite al este se tiene la presencia de la falla Mesa (gris). La falla Cerro Prieto (azul marino) tiene una expresión más clara y fuerte que el perfil 4985 que se localiza al sur. Se observa ~7 fallas por km en el sector este, mientras que al oeste los reflectores son caóticos, indicando quizá que ésta es la región con mayor deformación (bloque movido). Las fallas denominadas Indiviso-S y Mesa, tienen la apariencia de juntarse con la falla Pangas Viejas en profundidad y ésta última, aparentemente tiende a unirse a Cerro Prieto en profundidad, también se muestra el cauce moderno del Río Colorado (CRD), en donde podemos observar un poco de subsidencia a profundidad, mientras que hacia la superficie no es nada claro. Aunque la resolución de la sísmica en los sectores más someros no es buena, se tiene cierta apariencia de que algunas estructuras no cortan en superficie.

Al observar el comportamiento en las líneas más al norte, tenemos que el "*anticlinal rollover*" se va separando de la falla Cerro Prieto conforme nos vamos recorriendo al norte. Este anticlinal está flanqueado por dos fallas mayores falla Pangas Viejas y Mesa, las cuales cortan prácticamente toda la cubierta sedimentaria, y además indican que a profundidad se interceptan con el basamento acústico. Es de relevancia señalar que el reflector (Plioceno), no

muestra una evidencia clara de ser cortado por fallas, pero sí está claro que existe una gran cantidad de éstas, sepultadas por dicho horizonte y que el perfil sísmico 4983, corta dos cuencas: una pequeña cuenca al SW del perfil y que está al sur de Laguna Salada, la cual se denominó cuenca Las Tinajas y otra, la cuenca Montague al NE, donde desconocemos su forma en el extremo oeste.

III.1.3 Sección 4981

La sección 4981 se localiza al norte de las dos descritas anteriormente (Figura 30), tiene una orientación N64°E y una longitud de 55 km, están incluidas las fallas y el basamento acústico. El sector que se tiene en color blanco, en la parte central del perfil es debido a la ausencia de información. Se observa claramente la expresión de la falla Cerro Prieto (color azul marino), con una ligera caída al NW y es casi semiparalelo a otra la falla mayor Indiviso-S (azul claro), la cual es el límite este del "rollover" y en ésta sección es en la última donde se puede ver. Se tienen presente 4 fallas por km. Se tiene la presencia del basamento acústico, el cual no se observa al NE del perfil, y yendo al SW va siendo superficial, alcanzando una profundidad de ~500 m, para después volver a caer hasta profundidades de ~2000 m, a la altura del CDP 1650, mostrándonos la presencia de un depocentro, flanqueado por las fallas mayores; Saldaña al SW (azul acero) y Dunas al NE (Color Negro). Se observa un poco la falla Pangas Viejas (color verde).

Al este del "anticlinal rollover" se tiene la presencia de la falla Mesa (gris). La falla Cerro Prieto (azul marino), tiene una buena definición. Al SW de ésta falla los reflectores son caóticos, mientras que al NE se tiene la presencia de un fuerte paquete sedimentario cortado por muchas fallas semiparalelas entre ellas, éste último sector corresponde a la región del Desierto de Altar.

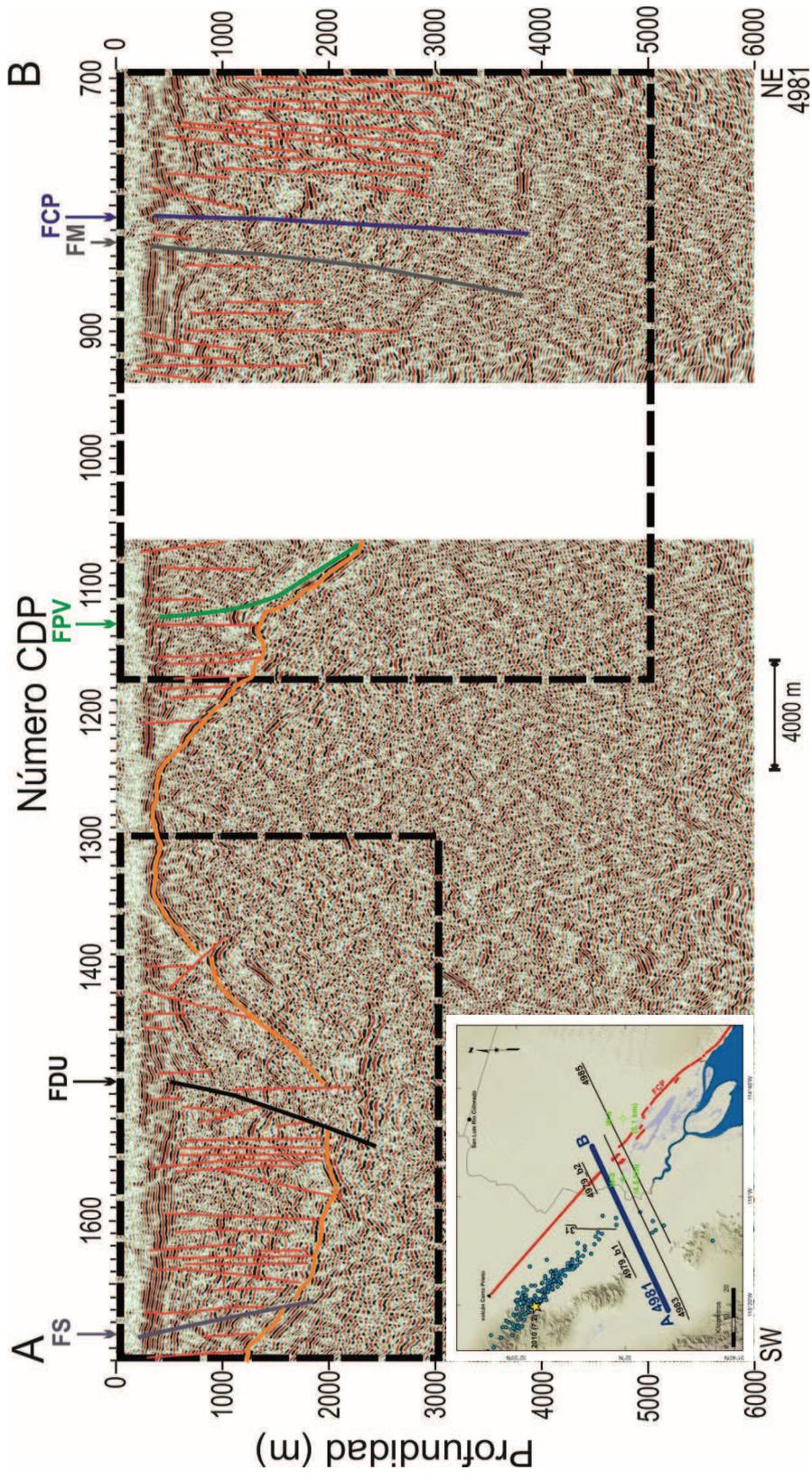


Figura 30. Perfil A-B de la línea 4981 SW-NE. Líneas en rojo representan las fallas menores interpretadas. La línea en naranja representa el sismoreflexor interpretado. Fallas mayores: Cerro Prieto (FCP), Mesa (FM), Pangas Viejas (FPV), Dunas (FDU) y Saldaña (FS). Los recuadros negros presentan un acercamiento mostrados en la figura 31. Se incluye mapa de ubicación del perfil, en éste mapa la línea en rojo indica la ubicación de la falla Cerro Prieto, tomada de Fonseca-López (1982).

El perfil 4981 muestra dos acercamientos (Figuras 31-a y b). La figura 31-a muestra el sector SW del perfil y se puede observar el depocentro el cual está flanqueado por las fallas mayores: Saldaña (azul acero) y Dunas (negro), y también se observa una gran cantidad de fallas semiparalelas que nacen y mueren en el cuerpo sedimentario. Mientras que la figura 31-b, muestra el sector NE, en donde están presente las fallas mayores: Pangas Viejas (verde claro), Mesa (gris) y Cerro Prieto (azul marino). En éste acercamiento desafortunadamente no se cuenta con un sector de información, pero no tenemos duda de que ahí se ubica la falla Indiviso-S, por lo que consideramos que ahí está presente el "rollover" y su anticlinal que se ha estado observando en las líneas anteriormente descritas. Al este de la falla Cerro Prieto se tienen ~3 fallas por km. La falla Cerro Prieto cae al SW al igual que la falla Mesa pero con un ángulo mayor. Se observan reflectores coherentes a profundidades mayores de 4000 m en algunos sectores de la vecindad de la falla Cerro Prieto.

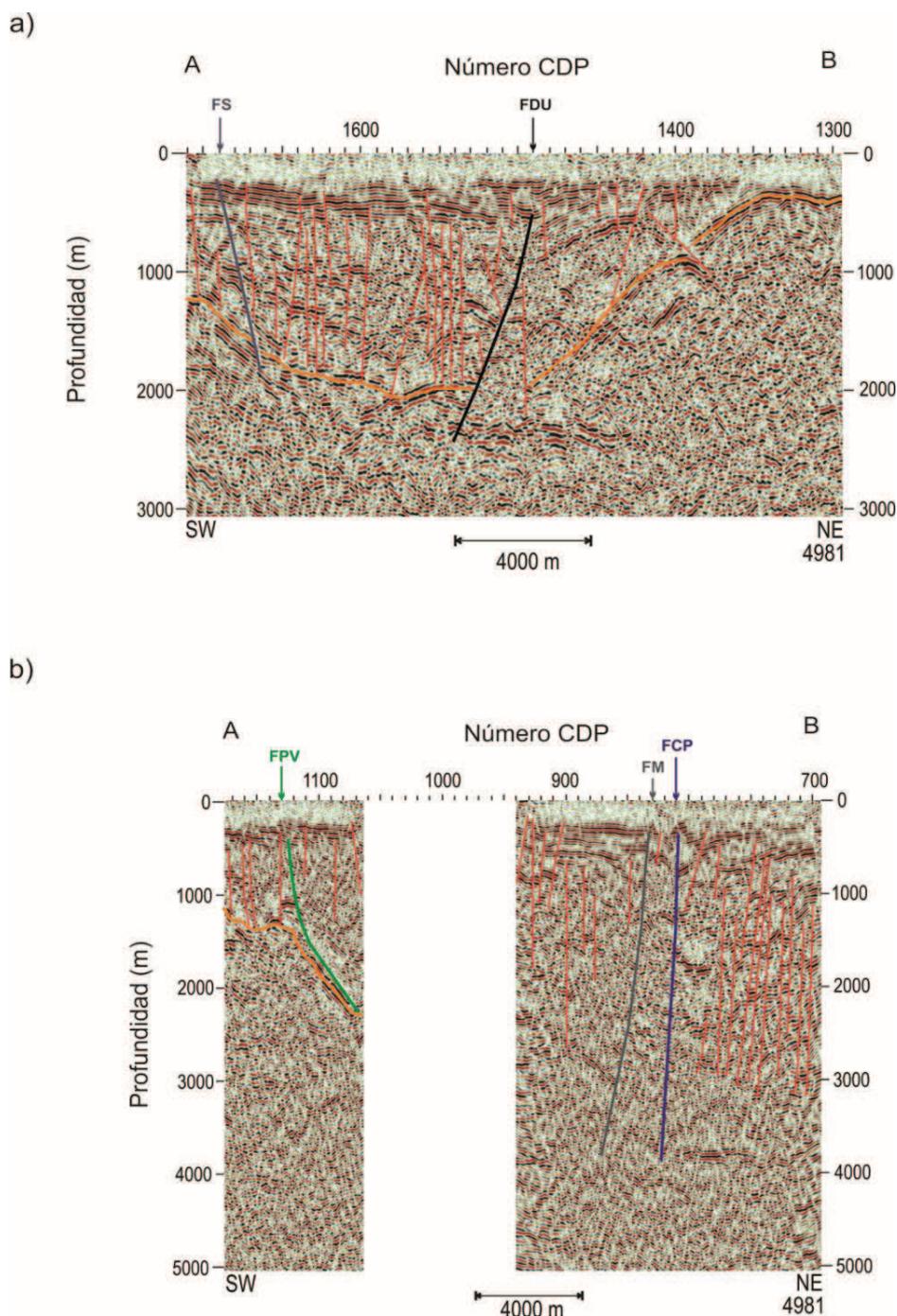


Figura 31. Acercamiento del perfil 4981. a) sector SW y b) sector NE. En el Sector SW del perfil se observa la forma de un depocentro, así como las fallas mayores: Saldaña (FS) y Dunas (FDU). En el sector NE del perfil se muestran las fallas mayores: Cerro Prieto (FCP), Mesa (FM) y Pangas Viejas (FPV). Obsérvese la gran cantidad de fallas en el sector NE de FCP y que corresponde al inicio de la región del Desierto de Altar. En color naranja se representa el basamento acústico.

III.1.4 Sección 4979 b1 y b2

La sección 4979_b1 se tiene al NW de la zona de estudio y es una de las más cortas, con una orientación N64°E y una longitud de 12 km (Figura 32), en donde están incluidas las fallas y el basamento acústico. Se tiene una falla por km, aunque este número no sea muy representativo para esta zona, debido a lo corto de la sección. El reflector sismoestratigráfico correspondiente al basamento acústico, es somero, con profundidades de entre ~200 m a 700 m. Esto es de esperarse ya que estamos en las estribaciones del sector sur de la Sierra Cucapah, y el reflector es la cima del basamento cristalino que constituye a la Sierra. Se observan pocas fallas como se indica en la interpretación, pero consideramos que la falla Dunas está presente. El espesor de la capa sedimentaria es somera al SW y es más profunda al NE, hacia el interior de la cuenca Montague.

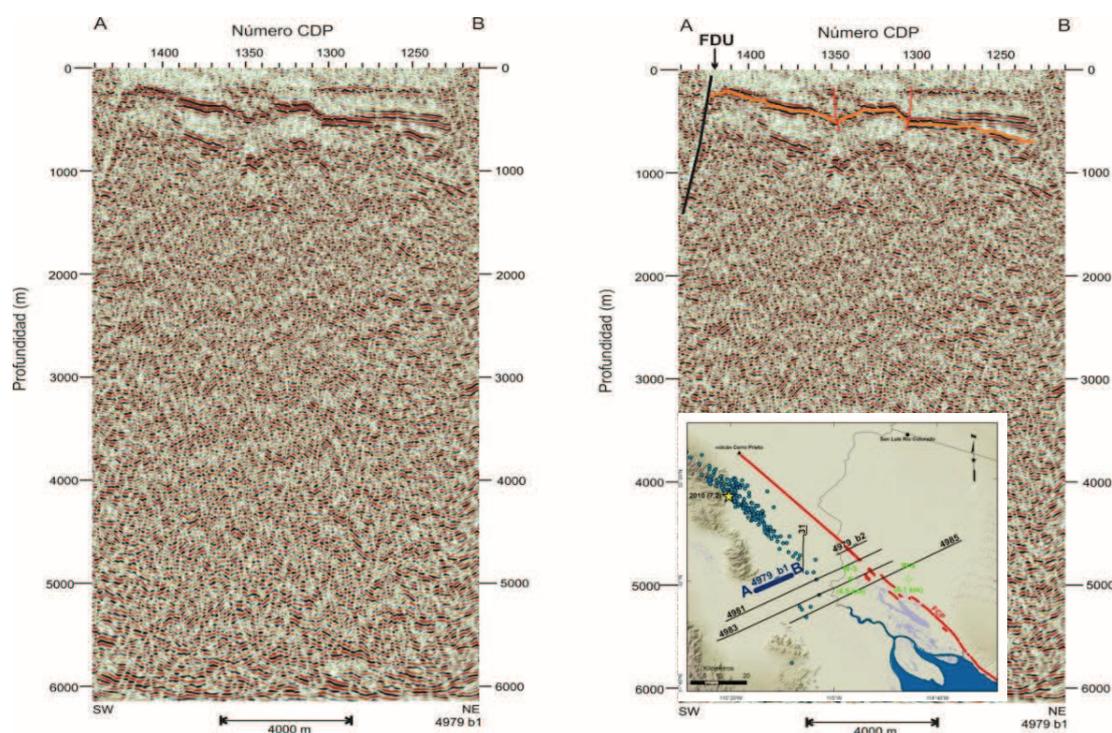


Figura 32. Perfil A-B de la línea 4979_b1. Se muestra la falla Dunas (FDU), que también está presente en los perfiles 4981 y 4983 localizados al sur.

La sección 4979_b2 se tiene al NE de la zona de estudio y es otra de las secciones más cortas, con una orientación N64°E y una longitud de 11 km (Figura 33). En éste segmento de la línea sísmica se observa la falla Cerro Prieto, en la ubicación como está reportada en la literatura (Fonseca-López 1982). Se identificaron ~3 fallas por km. Al este de ésta falla los reflectores son coherentes, mientras que en el sector oeste la sísmica tiende a ser más incoherente, podemos decir que hacia el este es el área de deformación de la falla Cerro Prieto. Al oeste de la falla Cerro Prieto se tiene la presencia de la falla Mesa (color gris). No se observa basamento acústico a lo largo de toda la sección.

Tratar de configurar los horizontes sismoestratigráficos resultaría muy aventurado debido a la lejanía del pozo, ya que no contamos con líneas transversales que nos permitan correlacionar los horizontes entre líneas. Esta sección muestra que los horizontes en el sector este de la falla Cerro Prieto buzan hacia el SW. Las fallas al parecer no cortan hasta la superficie, pero el tipo de dato no permite definir esto.

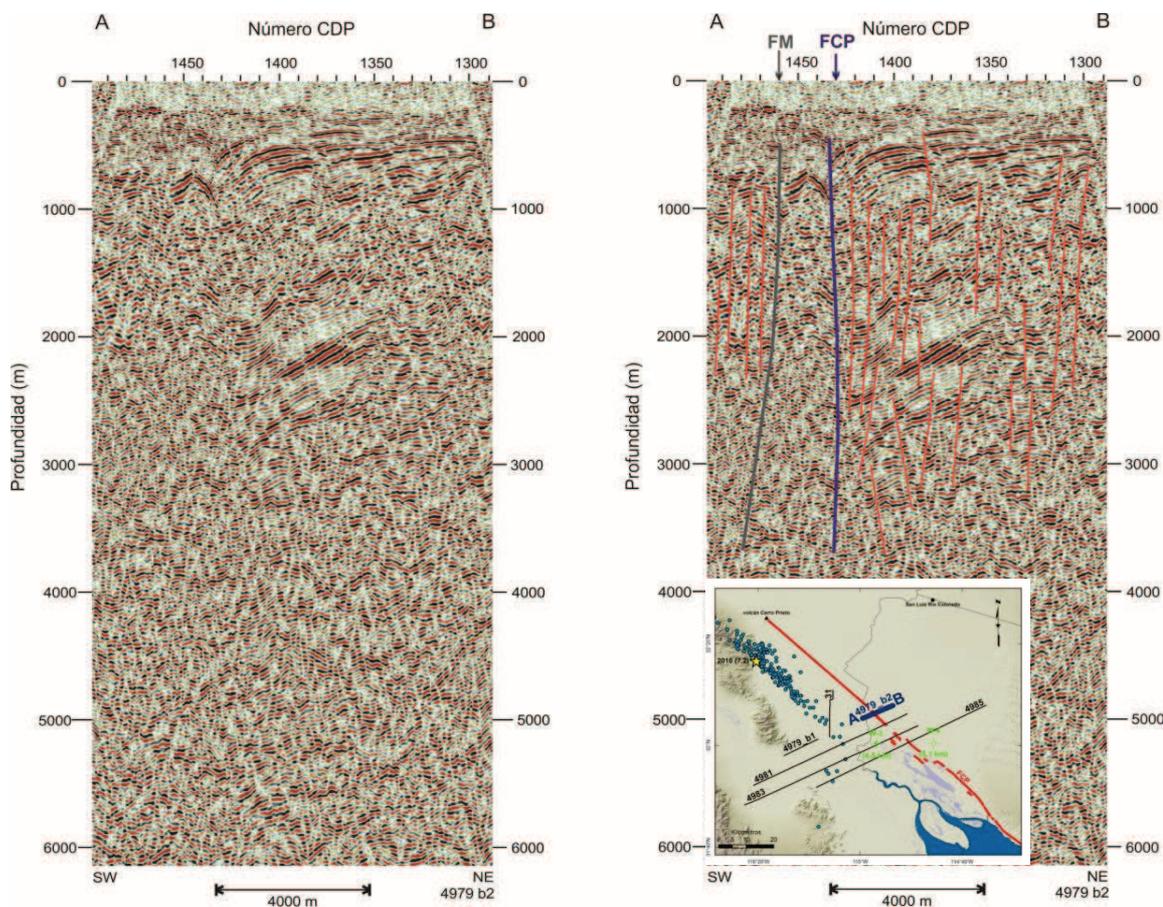


Figura 33. Perfil A-B de la línea 4979_b2. Se muestran las fallas mayores: Cerro Prieto (FCP) y Mesa (FM), que también están presentes en los perfiles 4981, 4983 y 4985, localizados al sur.

III.1.5 Sección 31

La sección 31 tiene una orientación N90°S y una longitud de 18 km (Figura 34). Este perfil se localiza al SE del área del sismo del 4 de abril de 2010 (Figura 11) y la tendencia de sus réplicas parece indicar que el perfil cruza el alineamiento de las réplicas. Se tienen presentes ~4 fallas por km.

Se pueden observar las fallas mayores: Palmas, Mesa, Indiviso-S y Pangas Viejas. Observamos un anticlinal entre las fallas Palmas y Mesa, lo que puede indicar que existen compresiones en dicho sector. Observando las líneas sísmicas 4979-b2 (Figura 33) y la 31 (Figura 34) a la este de la falla Mesa observamos un anticlinal, el hecho de que en la línea 4979_b2 se observa menos ancho que en la línea 31, es debido a la forma en que lo cortan los perfiles. Tomado en cuenta éste dato consideramos que la falla Palmas intercepta al SE a la falla de Cerro Prieto a la altura de la Mesa de Andrade, mientras que al NW tiene una tendencia hacia el sistema de fallas de la Sierra Cucapah. La continuación de la falla Cerro Prieto hacia el volcán del mismo nombre no se puede confirmar ya que no contamos información sísmica a partir de Mesa de Andrade al NW.

En la sección 31 se observan reflectores sismoestratigráficos de fuerte amplitud por arriba de lo que se considera el basamento acústico. El reflector dominante está situado ~1500 m de profundidad. El reflector interpretado como basamento acústico es somero al sur y va profundizando hacia el norte, hasta el CDP ~400, más al norte su presencia no es nada clara, pero a profundidad se observan reflectores coherentes indicándonos que existe sismorefectores a profundidades >5000 m (Figuras 34 A y B). No se observa la estructura "rollover" y su anticlinal que están presentes en las líneas sísmicas del sur, debido a la proyección del perfil, pero el buzamiento general de los sedimentos es hacia el norte, por lo que la presencia de la estructura de "rollover" en éste sector no puede definirse.

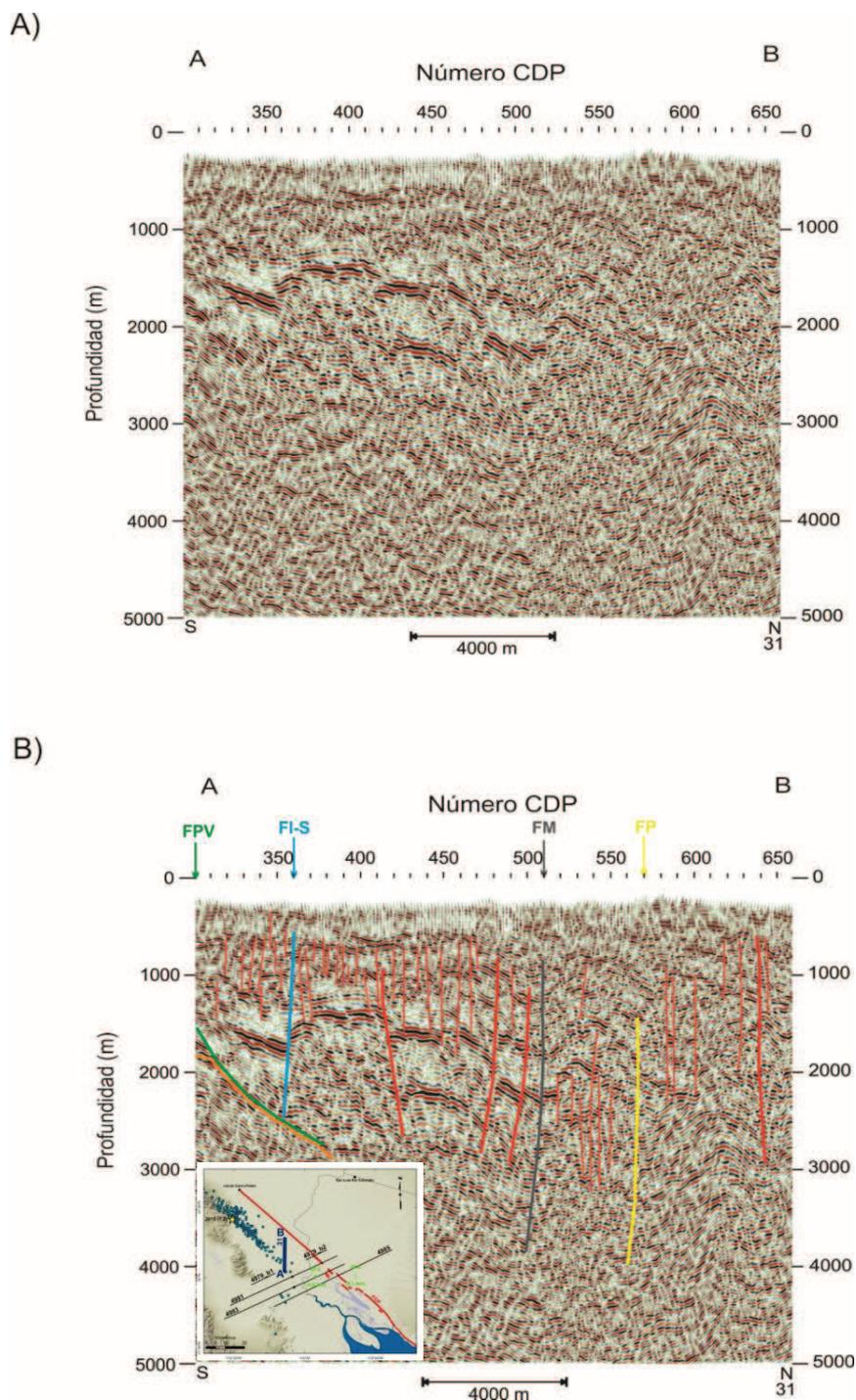


Figura 34. Perfil A-B de la línea 31, sin y con interpretación. Se muestran las fallas mayores: Palmas (FP) vista por primera vez en éste perfil y las fallas, Mesa (FM), Indiviso-S (FI-S) y Pangas Viejas (FPV), las cuales son observadas en los perfiles: 4979_b2, 4981, 4983 y 4985, localizados al sur.

III.2 Mapas de anomalías gravimétricas

Después de interpretar cada una de las líneas sísmicas, y antes de correlacionar las fallas y horizontes sísmicos entre las líneas, es útil hacer un análisis de la anomalía gravimétrica (Figuras 35 y 37-b) con la correlación de las fallas y horizontes sísmicos entre todas las líneas para configurar regionalmente aquellas estructuras que "aparecen" en más de uno de los perfiles.

III.2.1 Anomalía gravimétrica

Los datos gravimétricos de la región de estudio propiedad de Petróleos Mexicanos, fueron utilizados para correlacionar con la interpretación de estructuras identificadas en la sísmica, por lo que iniciamos mostrando el mapa de anomalía gravimétrica de Bouguer (Figura 35). Desafortunadamente no se tienen los datos originales de campo ni se menciona el tipo o tipos de corrección aplicados a esta anomalía.

La prospección gravimétrica consiste en medir la gravedad (o sus variaciones) para, a continuación, aplicar a los valores observados un cierto número de correcciones para eliminar la influencia de otros cuerpos celestes y de la rotación y forma de la Tierra, con objeto de obtener las anomalías cuyo origen se debe únicamente a variaciones de densidad en el subsuelo. Con lo anterior obtenemos una anomalía de gravedad, la cual se origina debido a variaciones en la distribución de densidades en la Tierra. Por ejemplo, un cuerpo rocoso de densidad distinta a la de las rocas adyacentes el contraste de densidad entre ellos es el responsable de una variación en la gravedad en las cercanías de esa zona, cuya extensión y magnitud depende del contraste de densidad entre el cuerpo causante y las rocas de su entorno, de su forma y la profundidad a la cual se ubica el cuerpo (Astier, 1975).

El mapa de anomalía de Bouguer conforma la base fundamental de la información gravimétrica que debe ser objeto de análisis por los intérpretes, con el fin de inferir la presencia de cuerpos o formaciones encubiertas. Efectos topográficos especiales como colinas circundantes también se pueden añadir en la ecuación.

$$\Delta g_B = g_{obs} - (g_t - 0.3086h + 0.04193\gamma h) \quad (\text{miligal}) \quad (1)$$

Δg_B = anomalía de Bouguer (mgal)

g_{obs} = gravedad observada (mgal)

g_t = gravedad teórica (mgal)

h = altura (m)

γ = (gr/cm^3)

0.3086 = por cada metro sobre la superficie la gravedad normal disminuye (mgal)

0.04193 = ajuste por exceso de masa, conduce a una atracción adicional (mgal)

Los valores de las anomalías de Bouguer son nulos, o casi nulos al nivel del mar, se convierten en valores negativos en las zonas continentales y en valores positivos en las cuencas marinas. Los valores negativos corresponden a las zonas montañosas de los continentes (Sarría, 1996). El mapa de anomalía de Bouguer constituye el documento básico de toda prospección gravimétrica y a partir de él se efectuará la interpretación.

La anomalía de Bouguer para la región del NW de México (Figura 35). Se observa la presencia de un bajo gravimétrico paralelo al trazo de la falla Cerro Prieto, tendiendo a ser mayor a lo largo de todo el sector oeste de ésta falla y que corresponde a un depocentro el cual se decidió nombrar como cuenca Montague. Lo anterior considerando que la región del delta del Río Colorado tiene presencia en toda la región, incluida la cuenca de Altar (Pacheco et al., 2006), y observando el mapa de anomalía interpretamos que la cuenca delta del Río Colorado está conformado por varios depocentros, siendo uno de ellos cuenca Montague.

En la parte central del mapa (Figura 35), se observa un alto gravimétrico que corresponde a las sierras Cucapah, El Mayor y Las Pintas. Al oeste del mapa, se observan dos bajos gravimétricos separados por un alto y que corresponden, al norte a cuenca Laguna Salada y al sur a la cuenca Las Tinajas, esta última bautizada como tal en el presente trabajo, al NE se observa un bajo gravimétrico y corresponde a la cuenca de Altar.

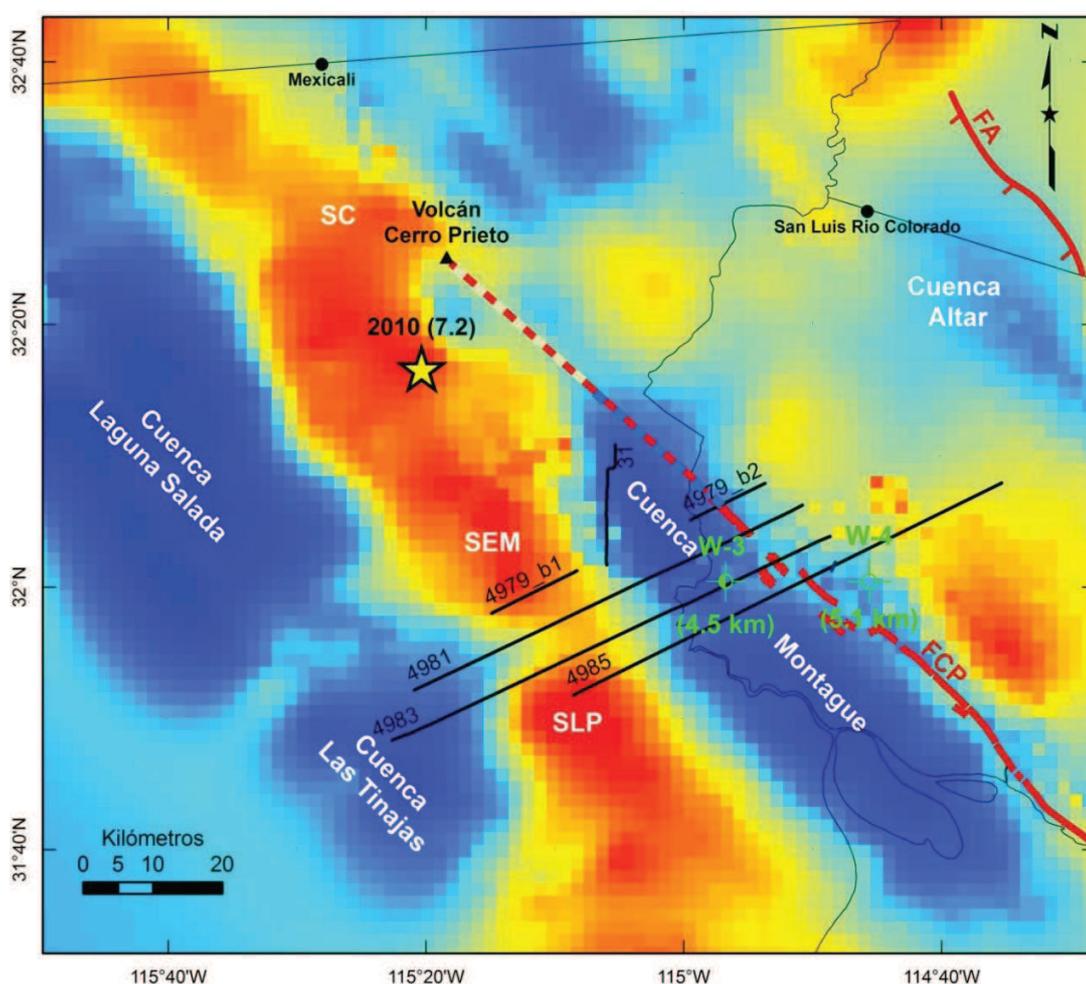


Figura 35. Mapa de anomalía de Bouguer para el NW de México. Los colores azules representan valores bajos (-80 mgal) y los rojos altos gravimétricos (-20 mgal). FCP: falla Cerro Prieto (línea roja) tomada de (Fonseca-López, 1982), FA: falla Altar tomada de (Pacheco et al., 2006), los perfiles sísmicos aquí interpretados (líneas negras). La estrella representa el epicentro del sismo del 4 de abril de 2010. W-3 y W-4 pozos exploratorios indicando la profundidad. Datos propiedad de PEMEX.

El bajo gravimétrico correspondiente a cuenca Montague, está separado por un alto gravimétrico a la altura del pozo W-3, ahí el basamento cristalino está a 4285 m de profundidad, por lo que la cuenca, al norte y sur es más profunda que ese valor.

Algo relevante es que en la línea sísmica 4985 al sur, en su sector NE tiene la presencia de un alto gravimétrico, por lo que en la sísmica se esperaría observar un basamento acústico, pero simplemente se observan reflectores caóticos al este y la falla Desierto interpretada hacia el final del perfil (Figuras 25 y 27). En ésta zona, la profundidad del Pozo W-4 es de 5.1 km y no cortó basamento, por lo que resulta desconcertante que la anomalía gravimétrica reporta un alto estructural en esa zona.

El comportamiento de las anomalías gravimétricas en el área de estudio, muestra las cuencas: Laguna Salada, Las Tinajas, Montague y Altar. De los pozos exploratorios el pozo W-4 perforó a 5.1 km y no cortó basamento, está en un flanco de la cuenca, por lo que sería de esperarse que dicha cuenca sea más profunda que 5.1 km en su parte central. La distancia entre el pozo W-3 y W-4 es de ~17 km, el primero corta basamento acústico y el segundo no.

III.2.2 Correlación de fallas

Las fallas que se pudieron correlacionar, entre las líneas sísmicas, resultaron ser siete (Figuras 36 y 37). Los nombres asignados son tomados de poblados o de acuerdo al lugar en donde se localizan. Una de las herramientas para la correlación de las estructuras y/o horizontes sismoestratigráficos es el software OpendTect versión 4.2.0 (Figuras 36, 38 y 39).

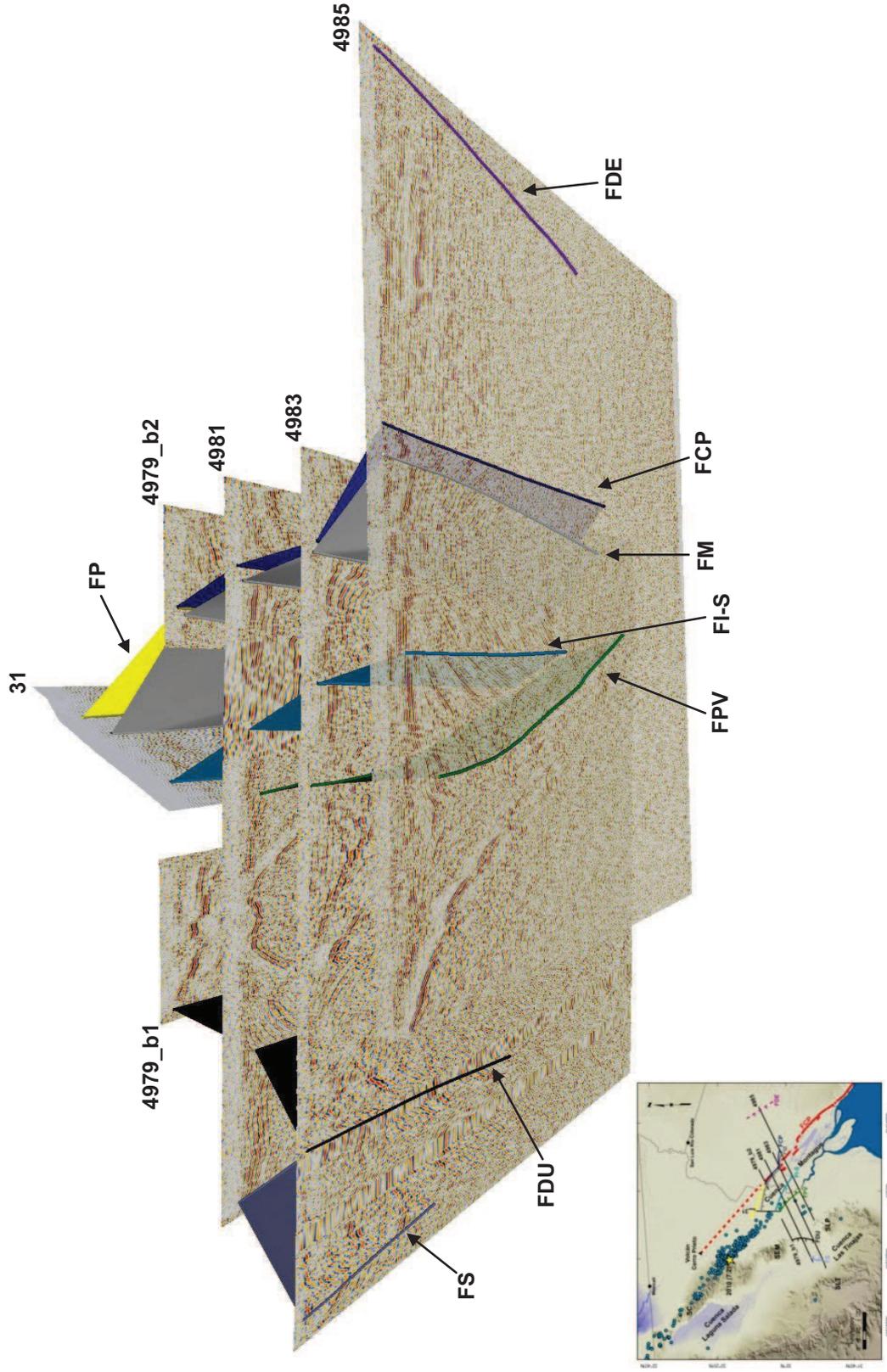


Figura 36. Panel 3D muestra la correlación de las principales fallas entre los perfiles sísmicos procesados e interpretados en ésta tesis. De oeste a este fallas: Saldaña (FS), Dunas (FDU), Pangs Viejas (FPV), Indiviso-S (FI-S), Mesa (FM), Palmas (FP), Cerro Prieto (FCP) y Desierto (FDE).

En base a la interpretación de las líneas sísmicas procesadas se correlacionaron las estructuras consideradas de mayor importancia y que acomodan la deformación en la zona de estudio, siendo estas de NE a SW: Cerro Prieto; Palmas; Mesa; Indiviso-S; Pangas Viejas; Dunas y Saldaña (Figura 37). Se incluye la actividad sísmica que ha ocurrido después del sismo del 4 de abril de 2010, hasta mayo del 2012, tomada del catalogo de RESNOM.

La descripción de las fallas será de NE a SW y el ángulo de inclinación reportado para cada una de ellas se realizó a 2 km de profundidad en los perfiles sísmicos asumiendo una velocidad sísmica de 2 km/seg.

III.2.2.1 Falla Desierto

Esta falla se observó solamente en el perfil 4985 por lo tanto no se pudo correlacionar con otros perfiles, y el nombre de falla Desierto es debido a que se localiza en el corazón del Desierto de Altar. Coincide con uno de los flancos de un alto gravimétrico en la vecindad del pozo W-4 (Figura 35, 37) y presenta un buzamiento 70° al W.

III.2.2.2 Falla Cerro Prieto

Esta estructura es la única reportada hasta ahora en la región de estudio y fue observada en todas las líneas sísmicas. La falla Cerro Prieto presenta una caída al oeste en todos los perfiles donde está presente, con una inclinación promedio de 85°. Para la región de estudio, no tiene una expresión en la vertical como era de esperarse para una falla transformante, sin embargo se observa que al oeste de ésta estructura, existe otra que acomoda extensión en la región, por lo que podemos decir que la zona de deformación de límite de placas en ésta latitud tiene un ancho de ~18 km, que es la distancia entre las fallas Cerro Prieto y Pangas Viejas. La deformación en la vecindad de la falla Cerro Prieto solo se observa del lado oeste, mientras que al este los sismorefltores no muestran mucha deformación. En el sector más al sur de la zona de estudio, aparentemente es interceptada por la falla Pangas Viejas (Figura 37). La configuración de la falla Cerro Prieto coincide en cierto sector con el trazo reportado en la literatura (Fonseca-López, 1982), pero del perfil 4979_b2 al perfil 31, esto cambia, el trazo conocido tiene dirección N50°W, mientras que en ésta zona es N70°W. Este

cambio coincide con la Mesa de Andrade, que es una pequeña meseta que sobresale en la región SE del valle. De éste sector hasta el volcán Cerro Prieto, el trazo de la falla Cerro Prieto es inferido ($N50^{\circ}W$) y no se tiene reporte alguno de evidencia en superficie (Francisco Suárez, Ramón Mendoza, comunicación personal), desafortunadamente no contamos con información sísmica más al norte en donde pudiéramos ver si en realidad la falla Cerro Prieto tiene el trazo reportado (Fonseca-López, 1982).

III.2.2.3 Falla Palmas

Esta estructura, tiene presencia solo en el perfil 31 y los rasgos sísmicos observados en dicho perfil con los de la línea 4979_b2, nos dice que al SE intercepta con falla Cerro Prieto y al NW se ignora su tendencia pero todo indica que tiene un azimut hacia la sistema de fallas de la Sierra Cucapah. Presenta un buzamiento de 85° al oeste, a la altura del CDP 580 (Figuras 34, 36 y 37).

III.2.2.4 Falla Mesa

Esta estructura es una de las más importantes y se puede observar en las líneas 4985, 4983, 4981, 4979_b2 y 31, está ubicada al oeste de la Mesa de Andrade. Aparentemente alrededor de la línea 4985 la falla Mesa está conectada con la falla Cerro Prieto, para de ahí hacia el norte, se separa flanqueando el lado este del "anticlinal rollover", mostrando una tendencia NW-SE, siguiendo la franja de la región de réplicas del sismo del 4 de abril de 2010, que se localizan al norte de la zona de estudio. El rumbo de las fallas es ligeramente oblicuo al trazo de la falla Cerro Prieto. La falla Mesa presenta un buzamiento 75° al oeste y corta solo el paquete sedimentario, a profundidad no se sabe si corta basamento acústico debido a la baja (pobre) resolución de la sísmica ($>5\text{km}$).

III.2.2.5 Falla Indiviso-S

Esta estructura se puede observar en las líneas 4985, 4983 y 31, hasta una profundidad de ~3500 m con un rumbo de N70°W (Figuras 34, 36 y 37). Se decidió el nombre de Indiviso-S, ya que aunque se considera que es Indiviso, nuestra interpretación se ha realizado exclusivamente en base a secciones sísmicas es por eso que se agregó el termino -S. Presenta un buzamiento 85° al este en el perfil 4985, mientras que en los perfiles: 4983 y 31 presenta un buzamiento de 85° al oeste y corta un paquete sedimentario de ~4 km de espesor tendiendo a interceptarse a profundidad con el basamento acústico y la falla Pangas Viejas, descrita más adelante.

Esta estructura no muestra actividad sísmica hasta antes del sismo del Abril de 2010 y resulta obvio que rompió debido éste, por lo que consideramos que es la falla Indiviso (González-García et al., 2010). Se especula si dicho sector (Indiviso-S), pudo haber roto durante el sismo de 1915 (M_w 7.1), siendo una posible razón la ausencia de actividad sísmica (BSSA, 1916; Ellsworth, 1990), hasta antes del sismo de Abril.

III.2.2.6 Falla Pangas Viejas

Esta estructura se puede observar en las líneas 4985, 4983 y 4981 (Figuras 36, 37). Consideramos que es una de las fallas más importantes, si no es que la más importante ya que es la que acomoda la mayor extensión a través de la zona de deformación, algo que hasta ahora era desconocida.

La falla Pangas Viejas es una falla lítrica con un ángulo promedio de 55° medido desde la superficie, hasta 2 km de profundidad, con buzamiento al este. Es una estructura compleja donde el deslizamiento normal de la falla disminuye el ángulo con la profundidad para crear una falla lítrica de muy bajo ángulo. Presenta una

caída del bloque superior hacia a la falla Cerro Prieto y posiblemente se conectan. El colapso gravitacional es mayor cerca de la falla de bajo ángulo creando una estructura de abanico tipo "rollover" y dando lugar a subsidencia, después de los primeros ~700 m de profundidad. Crea un espacio que permite la depositación de sedimentos aluviales y una vez más rellena la cuenca.

Las fuerzas tensionales crean un gran número de fallas sintéticas y antitéticas en el bloque colgante y se interpreta como la estructura principal de tipo extensional a través de la zona de deformación, ésta estructura se encuentra al NE limitada por la falla Indiviso en la que posiblemente converge. La falla Pangas Viejas no ha mostrado actividad sísmica reciente ni histórica (Figuras 5 y 11).

III.2.2.7 Falla Dunas

Esta estructura se observa en las líneas 4983, 4981 y 4979_b1 (Figuras 36, 37). Es una falla normal que corta principalmente sedimentos y su presencia es de lo más dominante en el oeste del área de estudio. Es una falla de tipo normal, con un buzamiento de 75° al oeste y un rumbo de N10°E. Controla el límite oriental de un depocentro (cuenca Las Tinajas) que se localiza en el flanco NW de Sierra Las Pintas. La falla Dunas tiene una dirección NE-SW y todo parece indicar que se intercepta con la falla de bajo ángulo de Cañada David al sur de la Sierra El Mayor (Siem y Gastil, 1994; Fletcher y Spelz, 2009), se considera que la falla Cañada David corresponde a otro dominio estructural, en particular a la región de Laguna Salada. Es importante mencionar que la zona en donde se identificó la falla Dunas no muestra actualmente actividad sísmica, sin embargo en el inicio de la parte norte de ésta falla se localiza un sismo de magnitud 5.3, ocurrido en 1935 (Ellsworth, 1990) (Figura 6).

III.2.2.8 Falla Saldaña

Esta estructura solo se observa en las líneas 4983 y 4981. Controla el límite oeste de la cuenca Las Tinajas y su proyección en superficie coincide con un escarpe de dirección (N15°E) que se puede observar claramente en una imagen satelital (Google Earth). Su buzamiento es de 80° el este.

III.3 Estructura anticlinal rollover

Esta estructura se observa a lo largo de las secciones sísmicas 4985, 4983 y 4981. En la parte sur el "*anticlinal rollover*" se localiza más cercano a la falla Cerro Prieto y se orienta al NW hasta interceptar la tendencia del alineamiento producido por la actividad sísmica asociada al sismo del 4 abril de 2010 conforme avanzamos al norte (Figura 38). El anticlinal está flanqueado por las fallas, Mesa al este y al oeste por Pangas Viejas. Se ignora si éste anticlinal tiene presencia al norte y sur de la región de estudio.

III.4 Basamento acústico

La interpretación del basamento acústico se hizo para todas las líneas sísmicas en profundidad (Figura 39). Es más somero al sur del área de estudio asciende a ~200 m de profundidad al SW de la línea sísmica 4985, donde termina contra el escarpe de la Sierra Las Pintas. En la línea 4983 en el sector SW el basamento profundiza hasta ~900 m en la cuenca Las Tinajas, localizada entre las sierras Las Tinajas y Las Pintas.

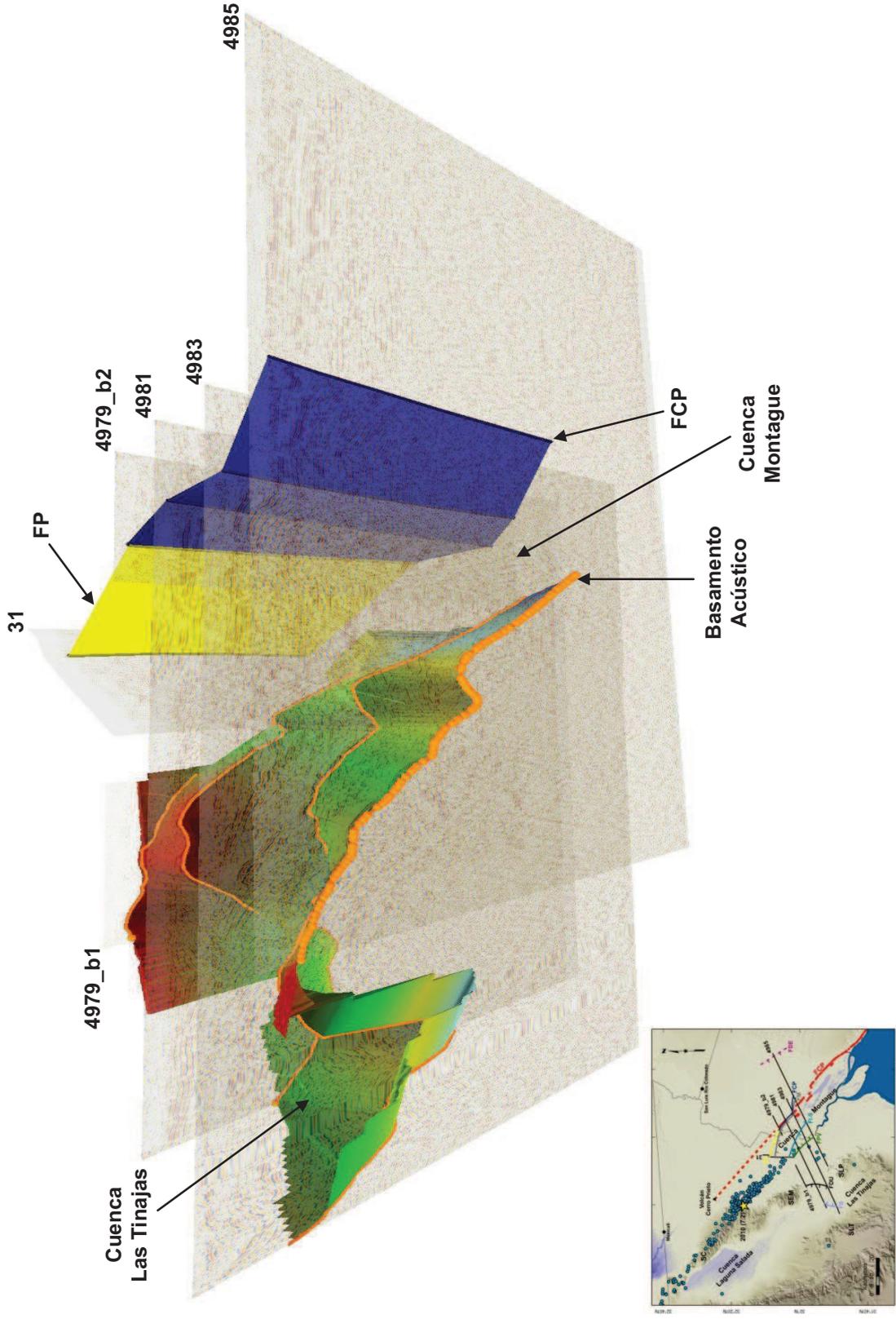


Figura 39. Mapa de configuración del basamento acústico. Se muestran las fallas: Cerro Prieto (FCP) y Palmas (FP).

En la línea 4985 el basamento acústico es definido por la proyección de una falla principal tipo lístrica (falla Pangas Viejas), la cual presenta un comportamiento similar en las línea 4983 y 4981. La línea 4979_b1 presenta un basamento somero de ~200 m de profundidad ya que se encuentra al norte de la zona de estudio cercana a la Sierra El Mayor. En la línea 31 el basamento tiene una profundidad de ~1500 m.

De acuerdo a la columna del pozo W-3 (Figura 40). El basamento granítico está en el intervalo 4268-4500 m y consiste en una roca ígnea fanerítica, compacta de color gris verdoso IMP (1984). Está compuesta de cuarzo, plagioclasa, ortoclasa, biotita cloritizada y calcita relleno de fracturas horizontales y verticales. Su composición posiblemente es ácida a intermedia y presenta una textura holocristalina, con evidencias de deformación cataclástica macro y microscopía. Esta roca se clasificó como una granodiorita y tiene una edad de 59 ± 5 Ma (K/Ar en feldespatos potásicos), según el laboratorio de geocronología del IMP (1984).

III.5 Horizontes estratigráficos

Con base en la interpretación bioestratigráfica, litológica de muestras de canal, núcleo y registros geofísicos del pozo W-3 Pacheco et al. (2006) y Helenes et al. (2009), definieron tres unidades sedimentarias principales. Los límites de las unidades son:

De la base a la cima:

- Basamento granítico (4268-4500 m)
- Mioceno Tardío. Lutita marina (2950-4268 m)
- Plioceno. Lutitas y areniscas transicionales (300-2950 m)
- Plio-Pleistoceno. Areniscas fluviales (0-300 m)

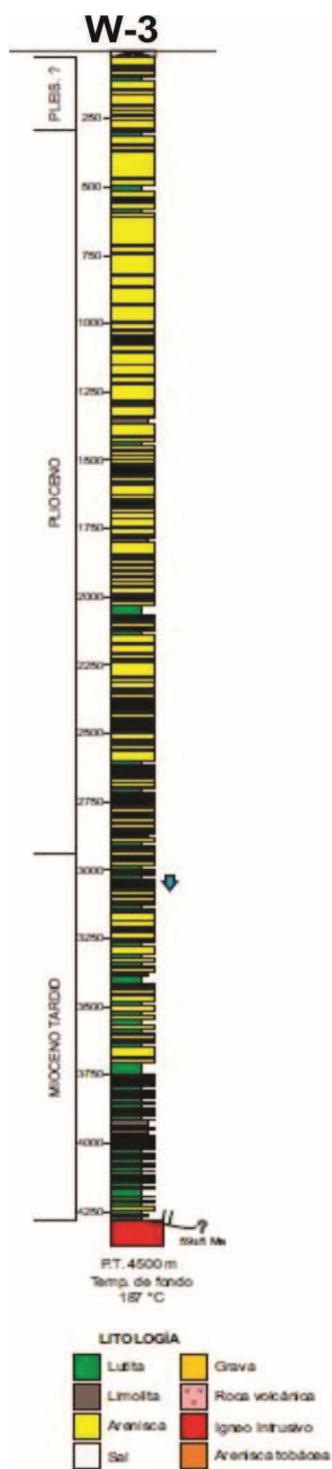


Figura 40. Columna litológica del pozo W-3 perforados por PEMEX en la zona del delta del Río Colorado (Pacheco et al., 2006).

Mioceno Tardío.

Intervalo 2950-4268 m (1318 m de espesor). Esta unidad define un ciclo transgresivo-regresivo del Mioceno Tardío, que tiene sobrepuesto el efecto de la progradación del delta del Río Colorado hacia la cuenca. La base de esta unidad consiste en 13 m de lutita de ambiente marino, que agrada a una secuencia de lutita, limolita y arenisca hacia arriba. La arenisca es más abundante hacia la cima, la cual se define por el primer paquete grueso de arenisca, lo que ocurre hacia los 3300 m de profundidad.

Plioceno.

Intervalo de 300-2950 m. Litológicamente se divide en dos partes: la parte inferior es una alternancia de gruesos paquetes de arenisca intercalados con intervalos regulares de lodolita y limolita. La parte superior se caracteriza por el claro predominio de los paquetes arenosos que contienen grava.

Plio-Pleistoceno.

Intervalo de 0-300 m. Esta unidad define los depósitos deltaicos dominados por el Río Colorado. El reporte de muestras de canal indica arenas no consolidadas con grava y lodolita subordinada.

La correlación de los límites cronoestratigráficos con las líneas sísmicas, inició en el perfil 4983, que es en donde se localiza el pozo W-3, y posteriormente se trató de extenderlo a los otros perfiles, lo cual resulta muy difícil ya que faltan perfiles transversales que permitan una configuración confiable de los horizontes en toda el área (Figuras 29 y 30). Se pudieron configurar los horizontes del basamento acústico, la cima del Mioceno Tardío y el límite Plioceno-Pleistoceno. El Mioceno Tardío solo se pudo configurar en un sector muy pequeño; de ~5 km en el perfil 4983 en forma horizontal, interceptándose al SW con el basamento acústico. Al NE se pierde debido a la presencia de la zona de falla de Cerro Prieto incluyendo a la falla Mesa en donde los reflectores son caóticos. Todo parece indicar que éste

horizonte continua hacia el NE de la falla Cerro Prieto, pero resulta difícil decidir a qué reflector corresponde. El horizonte Pleistoceno-Plioceno se tiene en un gran sector del perfil y nos dice que la mayoría de las fallas aparentemente están sepultadas por depósitos deltaicos del Pleistoceno. Este horizonte cubre a la estructura "*anticlinal rollover*" y sugiere que la actividad de las fallas Pangas Viejas e Indiviso-S disminuye por arriba de éste horizonte. El horizonte Plio-Pleistoceno si es cortado por las fallas Mesa y Cerro Prieto. Para el perfil 4985 situado al sur del perfil 4983 (Figura 24), se observa algo similar, aunque el horizonte del Mioceno Tardío tiene poca presencia, o no es claro en el resto del perfil, mientras que el Pleistoceno-Plioceno está presente en todo el perfil y es cortado por las fallas mayores: Mesa, Cerro Prieto y Desierto, mostrando el mismo comportamiento y la mayoría de las fallas son sepultadas por la capa sedimentaria del Pleistoceno. Esta observación indicaría que aparentemente la subsidencia asociada a la falla Pangas Viejas ha disminuido en el Pleistoceno ya que los reflectores no están flexionados en el "*anticlinal rollover*". Para los perfiles 4981, 479_b1, 4979_b2 y 31, no se realizó configuración de los horizontes sísmicos ya que resulta demasiado aventurado debido a la separación de las líneas sísmicas, aunado a que el sector en donde se podría tener la presencia de estos horizontes no contiene información sísmica (Figura 31, 33, 34 y 35).

Capítulo IV

Discusión

IV.1 Fallas de Carácter regional

Uno de los objetivos de este trabajo consistió en localizar en perfiles de sísmica de reflexión los principales rasgos estructurales en un sector del delta del Río Colorado, el cual se localiza al SE del área de réplicas del sismo del 4 de abril de 2010 (M_w 7.2). Los resultados muestran que en ésta región están presentes ocho fallas principales, varias de las cuales eran hasta ahora desconocidas, debido principalmente a que están sepultadas por los sedimentos y a la poca actividad sísmica.

Las estructuras más importantes observadas están presentes en la mayoría de los perfiles y todo indica que tienen extensión tanto al norte como al sur, más allá de la cobertura de los perfiles sísmicos. Las fallas Cerro Prieto, Palmas, Mesa, Indiviso-S y Pangas Viejas se ubican en el dominio estructural del sistema de falla Cerro Prieto y forman parte de éste. Las fallas Dunas y Saldaña se ubican en el dominio estructural de Laguna Salada y en particular en la sub-cuenca Las Tinajas. La falla Desierto se ubica en la cuenca de Altar, la cual constituye un dominio estructural independiente hacia el este (Figuras 37 y 38). Se observa que la falla Cerro Prieto no muestra una fuerte componente de extensión como sería de esperarse y se interpreta que acomoda principalmente desplazamiento lateral, como sugiere la interrupción lateral de reflectores de fuerte amplitud en la línea sísmica 4983. La falla Mesa está localizada al oeste de la falla Cerro Prieto y

tiende a interceptarse con ella hacia el SE, mientras que al NW se va abriendo y limita el borde occidental de la Mesa de Andrade (Figuras 37 y 38).

La falla Indiviso-S es semiparalela a la falla Mesa, y entre las dos flanquean un "anticlinal rollover" cuyo eje tiene una tendencia N50°W, que es similar al azimut de la zona de réplicas del sismo del 4 abril de 2010. Al oeste la falla Pangas Viejas es una falla lístrica con caída al este que controla el "rollover". Esto sugiere que la zona de deformación del sistema de falla Cerro Prieto incluye fallas que acomodan principalmente extensión (por ejemplo la falla Pangas Viejas) y fallas que acomodan la deformación por cizalla lateral derecha (falla Cerro Prieto). Otras fallas acomodan ambos, desplazamiento normal y desplazamiento lateral (fallas Indiviso-S, Desierto, Mesa, Dunas y Saldaña). La zona de deformación del sistema de falla Cerro Prieto tiene ~18 km de ancho y es similar en anchura a la zona de falla del Canal de Ballenas que constituye una falla transformante y el límite principal entre las placas Pacífico y Norteamérica (Lonsdale, 1989).

Todas las estructuras tienden a interceptarse en profundidad con la falla Cerro Prieto hacia el SE, mientras que al NW varias de las estructuras se van separando de la falla Cerro Prieto, siguiendo la tendencia de la franja de réplicas sísmicas y la dirección de las fallas localizadas en la Sierra Cucapah (Figuras 41 y 42).

La falla Cerro Prieto previamente definida en el sector de estudio es una de ocho fallas que definen la zona de falla transformante. Esta zona de falla acumula gran subsidencia y relleno sedimentario cuando incluye una componente de extensión, como se observa en este tipo de escenarios en otros lugares del mundo (Fowler, 1998; Hurwitz et al., 2002). Esta zona de deformación acomoda la mayor parte del movimiento relativo de las placas en el sector aquí estudiado (Frez-Cárdenas y González-García, 1991; Suárez-Vidal et al., 2007); Bennett et al., 1996; Dixon et al., 2002, González-García et al., 2003).

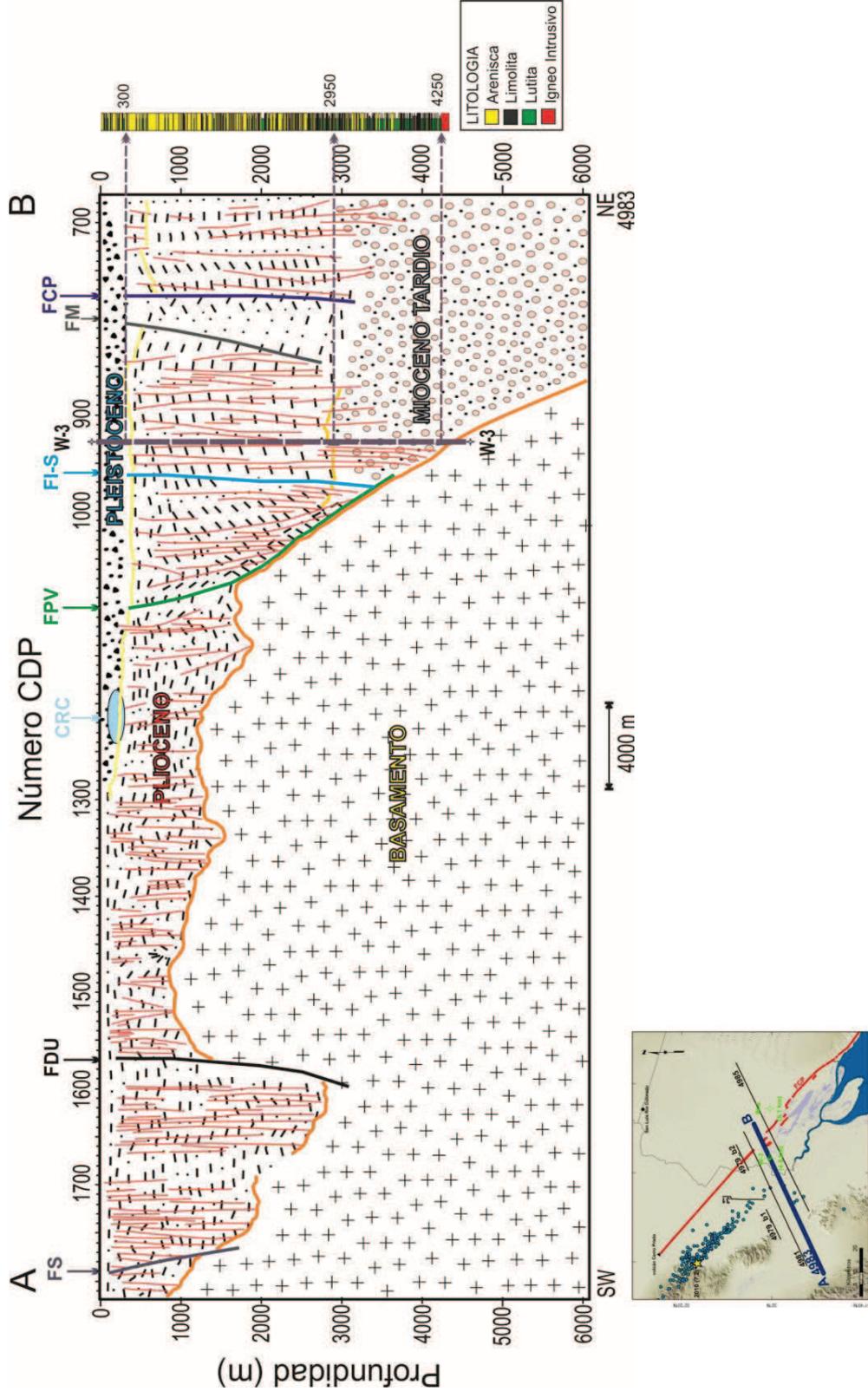


Figura 41. Interpretación del perfil sísmico 4983, resumiendo sus características. W-3 Pozo exploratorio con su litología (Pacheco et al., 2006). De oeste a este se tienen las fallas: Saldaña (FS), Dunas (FDU), Pangas Viejas (FPV), Indiviso-S (FI-S), Mesa (FM) y Cerro Prieto (FCP). CRC representa el cauce moderno del Río Colorado.

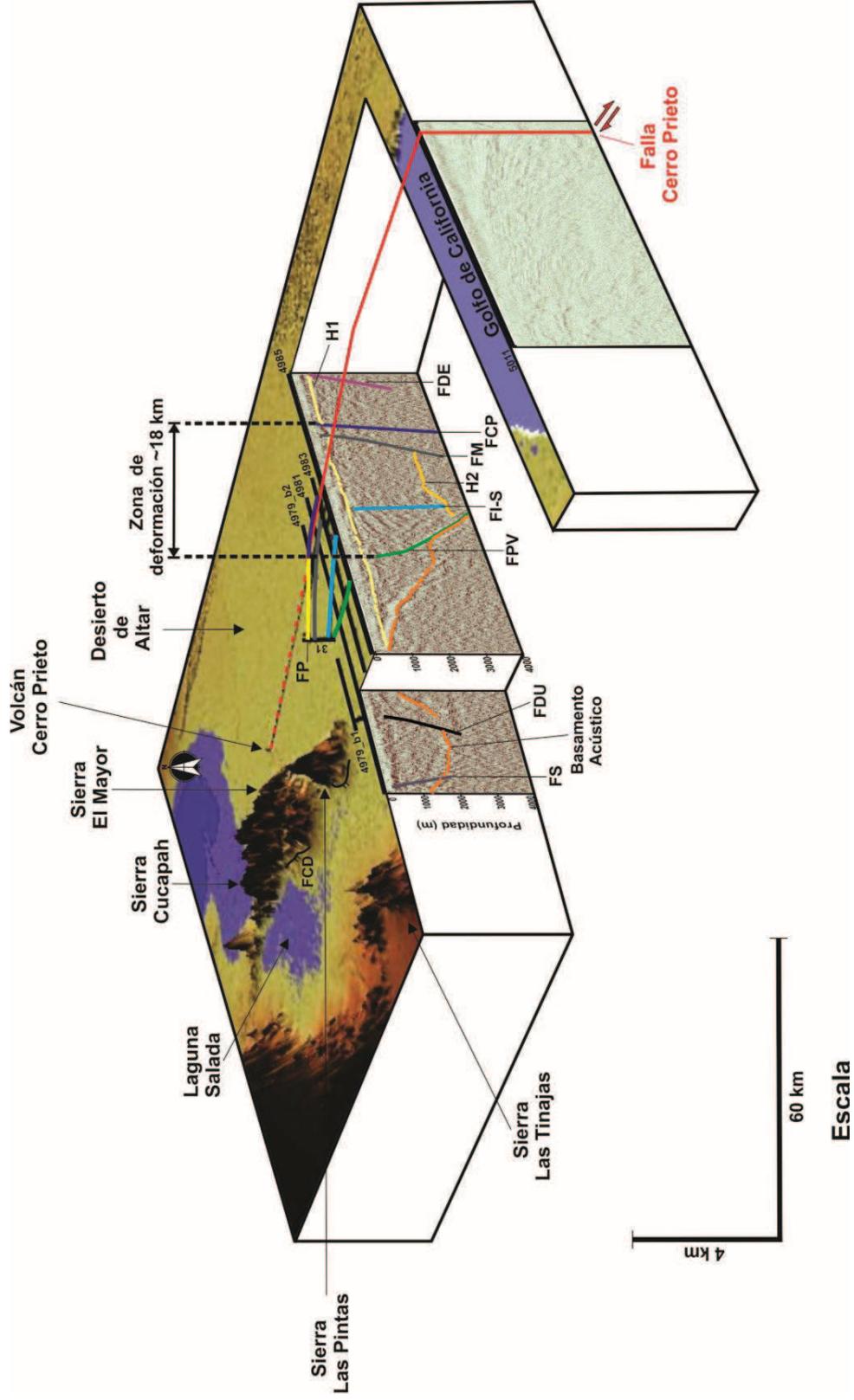


Figura 42. Perspectiva de la estructura en la región del delta del Río Colorado. La superficie fue trabajada en Global Mapper 11 con una exageración vertical de 5. La escala en la vertical y horizontal de los perfiles sísmicos es indicada. Se indican las fallas: Saldaña (FS), Dunas (FDU), Pangas Viejas (FPV), Indiviso-S (FI-S), Mesa (FM), Palmas (FP), Cerro Prieto (FCP) y Desierto (FDE). Los horizontes sísmicos; H1 (Pleistoceno), H2 (Mioceno Tardío). El naranja representa el basamento acústico.

El desplazamiento lateral derecho en las fallas del Golfo de California ha acumulado 255 ± 10 km en dirección N-NW (Oskin et al., 2001), y mucho de éste desplazamiento pasó por la zona de falla Cerro Prieto aquí estudiada. Aunque no es posible abundar en la magnitud del desplazamiento lateral de la zona de falla Cerro Prieto, éste desplazamiento se ve reflejado en la observación de que reflectores coherentes entre el sector este y oeste de dicha falla sean tan diferentes. Esto sería debido a que el sector del lado oeste (placa Pacífico) ha sufrido más desplazamiento que el sector al este de la falla Cerro Prieto (placa Norteamérica). La zona de deformación del sistema de falla Cerro Prieto incluye una zona que acomoda extensión controlada por la falla Pangas Viejas. Esto indica que la deformación de la frontera entre las placas de Norteamérica y Pacífico en la latitud aquí estudiada se distribuye en una franja con un ancho de deformación de ~ 18 km. Este ancho es similar a la anchura en la falla transformante Canal de Ballenas, localizada entre Isla Ángel de la Guarda y la Península de Baja California y un poco más grande que los 7 a 10 km de zona de deformación reportando para la zona de falla San Andrés en la región de San Francisco (Zoback, et al., 1999). El ancho de la zona de falla Cerro Prieto resulta muy grande comparado con lo reportado para un sector de la falla transformante del mar Muerto ~ 4 km, localizada en la cuenca Kinarot-Beit-Shean, en Israel (Hurwitz, et al., 2002). El ancho de la zona de deformación podría ser resultado de una componente de extensión que está incluida en la deformación en el límite de placas. El ancho de la deformación es mayor en las zonas de traslape entre las fallas transformes principales como en la cuenca Cerro Prieto, mientras que la deformación a lo largo de las fallas transformes puede ser debida a que el sistema es oblicuo. La frontera en el sector aquí estudiado es más complicada que lo que predice el modelo tradicional de fallas transformantes que conectan a centros de dispersión (Lomnitz, et al., 1970; Fenby y Gastil, 1991; Nilsen y Sylvester, 1995).

La falla Indiviso-S es la falla Indiviso reportada por González-García et al. (2010) que fue una de las estructuras que rompieron durante el sismo del 4 de abril de 2010. Se consideró conservar el nombre Indiviso utilizado originalmente, para designar a la falla Indiviso-S identificada en éste trabajo. El término -S es para diferenciar que dicha estructura se identificó en los perfiles sísmicos. Consideramos que las fallas Indiviso e Indiviso-S son la misma falla y ambas también coinciden con la orientación de un alineamiento que se observa en la imagen Pixel-Tracking reportada para el evento del 4 de Abril de 2010 (E. Fielding, comunicación escrita 2012). Además, el azimut de la zona de réplicas del sismo del 4 de abril de 2010 coincide con la tendencia de la dirección de Indiviso-S, al SE de la zona de réplicas. La figura 43 a, b y c, muestra entre otras cosas los epicentros reportados por Castro et al. (2010) y lo reportado en la base de datos de RESNOM, para un mismo intervalo de tiempo. La localización de las réplicas reportadas por Castro y colaboradores (2010) se considera más confiable ya que instalaron una red local para registrarlas. Estos autores reportaron 256 eventos para el intervalo de tiempo de 6 de abril al 8 de mayo de 2010, registrados en más de 5 estaciones (Figura 43-a). En la figura 43-b se observa que la distribución reportada por ellos y por RESNOM es muy similar, por lo que se considera que lo reportado por RESNOM es confiable. Por lo anterior, al observar la actividad sísmica reportada por RESNOM, hasta mayo del 2012, se tiene que la sísmica está fuertemente correlacionada con las fallas Pangas Viejas e Indiviso-S.

En principio se considera que tanto Pangas Viejas e Indiviso-S tienden a interceptar a la falla Cerro Prieto al SE, pero el cambio de tendencia en la actividad sísmica de SE a SW, en casi 90° (Figura 43-b), nos está indicando que existe una estructura que hace que ambas fallas terminen o cambien de rumbo a la altura de la línea sísmica 4985, que es la que se localiza más al SE de la zona de estudio, por lo que queda en duda dicha consideración.

La falla Pangas Viejas tiende a proyectarse a lo largo del cauce moderno del Río Colorado, por lo que no se descarta la continuación de ésta falla al NW de la zona de estudio. Si ésta estructura efectivamente continúa hacia el NW a lo largo del rumbo del cauce moderno del Río Colorado, pudiera ser que sea una de las varias estructuras, que junto con las fallas Indiviso-S y Mesa transfieren parte de los esfuerzos hacia las fallas localizadas más al norte, que cortan longitudinalmente a la Sierra Cucapah. Muchas de las estructuras observadas no tienen expresión en superficie, ya sea porque están sepultadas por sedimentos y/o debido a la escasa o nula actividad sísmica reciente, otro factor puede ser la baja resolución hacia la superficie de la información sísmica. De acuerdo con datos de la Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM, catálogo de eventos: 1976-2010) no se tenía actividad sísmica significativa en la zona de estudio, hasta después de ocurrido el sismo del 4 de abril del 2010 (Figura 37). Una posible continuación de la falla Pangas Viejas hacia el SE de la zona de estudio queda en duda debido al cambio de dirección de la actividad sísmica de las réplicas al SE de la zona de estudio (Figura 37). Tomando como experiencia el sismo del 4 de Abril de 2010, la zona de las fallas Pangas Viejas e Indiviso-S debe ser considerada de gran riesgo.

La región de la falla Pangas Viejas presenta la mayor subsidencia imagen de InSar (Figura 43-c) facilitada por E. Fielding (comunicación escrita) y Nelson et al. (2012). Estos investigadores han observado que los mayores desplazamientos, tanto co-sísmicos como pos-sísmicos han ocurrido en la región de la falla Pangas Viejas y consideran que esto se debe a ésta estructura. La misma región fue sometida a fuertes efectos de licuefacción particularmente en la parte sur del delta donde la superficie también está sujeta a inundaciones debido a las mareas, siendo esto también una de las razones por la que algunas zonas de ruptura de la falla Indiviso están obscurecidas en la imagen de Pixel-Tracking (Hauksson et al., 2010; Brandenburg et al., 2012; Nelson et al., 2012; Wei et al., 2011; Sarychikhina, et al., 2011).

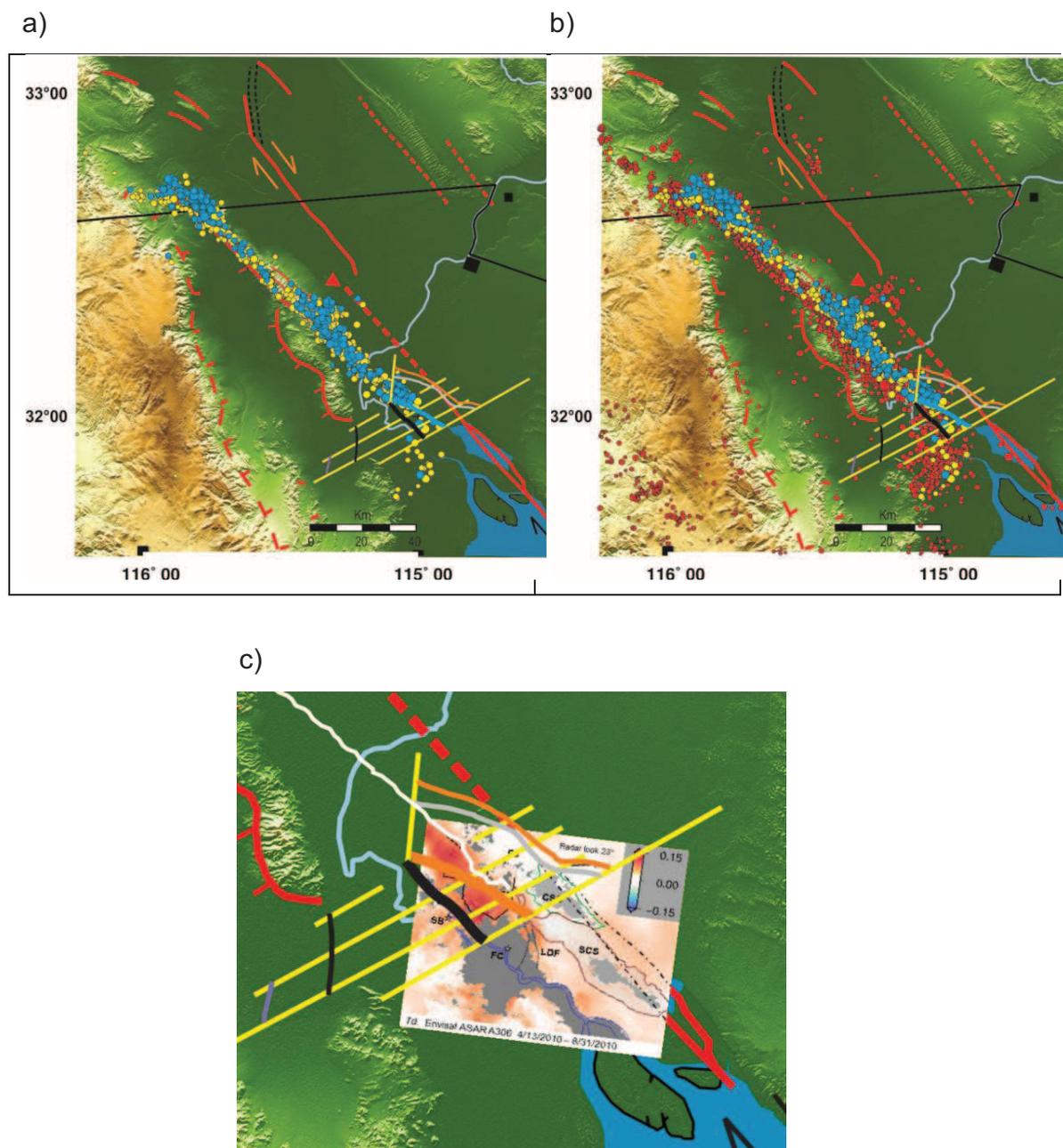


Figura 43. a) Actividad sísmica reportada por (Castro et al., 2010), para el período del 6 de abril al 8 de mayo de 2010, en círculos azules, círculos amarillos actividad sísmica reportada por RESNOM, para el mismo intervalo de tiempo. b) Actividad sísmica reportada por RESNOM del 9 de abril del 2010 al 5 de mayo del 2012 (círculos rojos), incluida la sismicidad reportada en la figura a). c) InSAR deformación post-sísmica (comunicación escrita E. Fielding, 2012), incluida falla Cerro Prieto (rojo y línea negra punteada), así como las fallas interpretadas en éste trabajo. Línea blanca falla El Indiviso, CSC: Ciénaga de Santa Clara, SCS: Estero Santa Clara, FC: Campo Pesquero La Bocana, SB: Barra de arena de marea (y modificado de Nelson et al., 2012).

Se ubicaron 3 estructuras más. Falla Desierto enclavado en el corazón del Desierto de Altar, la cual no es posible correlacionarla con fallas activas conocidas o interpretadas en líneas sísmicas de PEMEX en trabajos previos (Pacheco et al., 2006; Pérez-Tinajero, 2007) ya que solamente se tienen cubierto con un solo perfil sísmico. Por otro lado, en el sector sur de la región de Laguna Salada, se ubicó un depocentro flanqueado por las fallas; Dunas y Saldaña, al este y oeste respectivamente. La falla Dunas muestra una tendencia NW-SE y todo parece indicar que intercepta a alguna estructura de la Sierra El Mayor. Esta falla tiene un buzamiento de 75° al oeste, pudiera ser que tiene alguna relación con la falla de bajo ángulo Cañada David (Fletcher y Spelz, 2009), o con alguna estructura localizada al oeste de la Sierra El Mayor. Desafortunadamente entre las líneas en donde se observa y la Sierra El Mayor, no tenemos información sísmica que nos auxilie a corroborar esto.

Nos atrevemos a decir en base a la gran cantidad de estructuras observadas, la falla Indiviso que rompió durante el sismo del 4 de abril de 2010, ya existía y que solamente se reactivó. Fracturas generadas por los sismos de 1915 y del 2010 son mostradas en la Figura 44 a, b., ambos eventos de magnitud similar ($M \sim 7$).

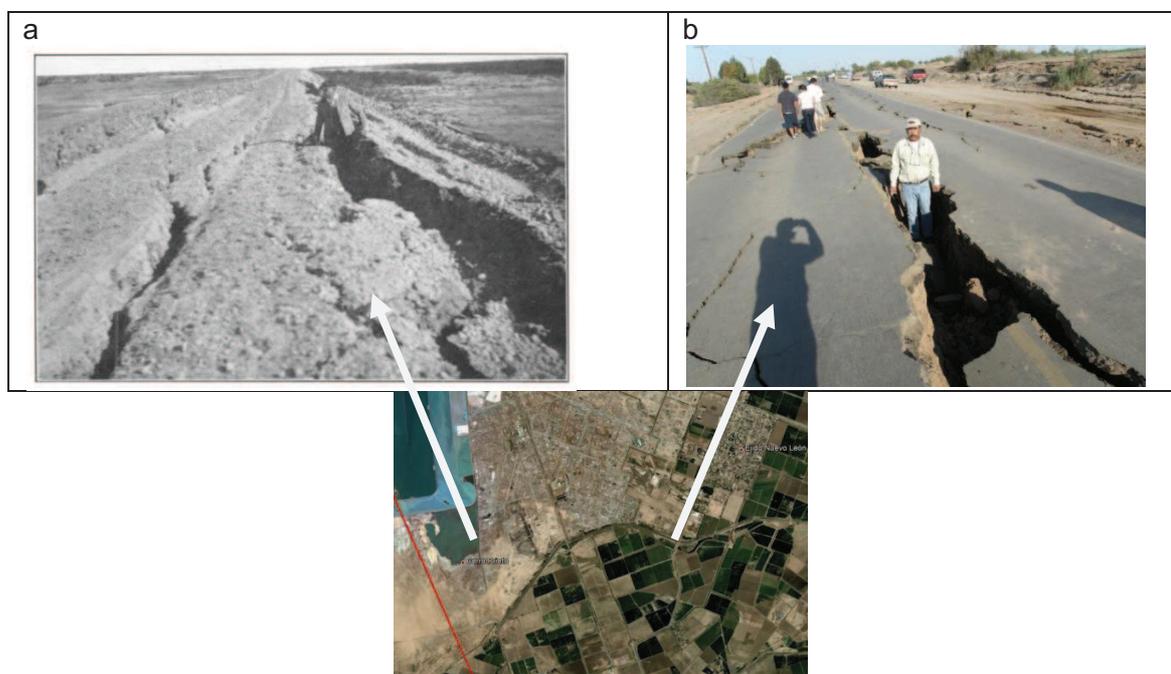


Figura 44. a. Fracturas en el dique del lago Vulcano hechas por el sismo del 20 de noviembre de 1915 (M_w 7.1) (tomado de BSSA, 1916). b. Fracturas hechas por el sismo del 4 de abril de 2010 (M_w 7.2) (En la foto Tito Valdez, fotografía proporcionada por Luis Munguía, 2012).

IV.2 Unidades sismoestratigráficas y delimitación de depocentros

En el sector de estudio, la interpretación sobre distribución y espesores de horizontes sísmicos fue muy elemental debido a la alta deformación y a la separación entre los perfiles. Aún así se puede observar la forma de una parte del depocentro de la cuenca Montague así como la ubicación y profundidad del depocentro Las Tinajas. Los mapas de configuración de los horizontes muestran en el sector SE de las líneas 4985, 4983, 4981, 4979_b1, 4979_b2 con orientación SW-NE y la línea 31 con orientación S-N, que el depocentro Montague profundiza, de ~800 m a >5000 m hacia el NW. A mayor profundidad la sísmica no tiene resolución, y no se ve basamento acústico a profundidades menores de 6

km. La línea 4983 y parte de la línea 4981, en su sector SW muestran la presencia de otro pequeño depocentro, separado por un alto de basamento acústico del depocentro Montague. Este depocentro muestra una profundidad de ~2500 m, en ésta tesis lo denominamos cuenca Las Tinajas. Esta configuración de los depocentros coincide en lo general con lo indicado por el patrón e intensidad de la anomalía gravimétrica (Figura 35). El paquete sedimentario en la cuenca Montague está cortado de forma oblicua por las fallas identificadas a través de la zona de falla Cerro Prieto. Esta deformación no produce contrastes en la anomalía gravimétrica, lo que indica que la zona de fallas controla el depocentro de la cuenca Montague. De acuerdo a datos de pozos interpretados por Pacheco et al. (2006), el pozo W-3 situado en la zona de falla Cerro Prieto (Figura 35), reporta basamento cristalino a 4.5 km, por lo que se esperaría que el depocentro al NW y SE de éste pozo sea más profundo según el mapa de anomalía gravimétrica. De importancia es indicar que el pozo W-4 perforó a 5.1 km solo sedimentos, sin embargo al observar el mapa de anomalía éste pozo aparentemente está en un alto gravimétrico, mientras que el pozo W-3 está indicando que está en un bajo gravimétrico, lo que pudiera significar la presencia de intrusiones volcánicas y la densificación de los sedimentos por procesos diagenéticos, como silicificación por fluidos hidrotermales (Figura 36). La línea 4985 que pasa cerca del pozo W-4 muestra vagamente un comportamiento que pudiera deberse a la presencia de un basamento acústico en ese sector. Sin embargo, no se pudo mejorar la resolución de las imágenes sísmicas, aún cuando se probaron varios filtros de frecuencia y filtros variables en tiempo.

En general, en ésta tesis se logró configurar un sector de la parte oeste de la cuenca Montague, así como una parte de la cuenca Las Tinajas al SE de Laguna Salada. Las Tinajas, tomando en cuenta el mapa de anomalía gravimétrica está separada de Laguna Salada por un alto gravimétrico (Figura 38). La conexión de la cuenca Laguna Salada y Montague no está bien definida, salvo la información de mapa de anomalía gravimétrica que muestra un bajo gravimétrico de baja

intensidad en la anomalía positiva entre las Sierra El Mayor y Las Tinajas. El mapa gravimétrico también sugiere que las fallas que controlan ambos depocentros, la falla Dunas y el detachment de Cañada David, respectivamente, no están directamente conectadas y pudiera existir una zona de acomodamiento que produce el alto estructural que muestra la anomalía gravimétrica. Como tampoco la conexión entre las cuencas Laguna Salada y Tinajas. Dado que la mayoría de las fallas están sepultadas por un paquete sedimentario de ~700 m del Pleistoceno (Helenes et al., 2009; Pacheco., 2006).

Es posible que la actividad de estas fallas haya disminuido en esa época. Aunque no se observó mucha deformación del paquete superior que marca una aparente discordancia con el paquete sedimentario más deformado, la resolución de las líneas sísmicas en los primeros 200-500 m de registro es pobre y no podemos identificar las fallas que cortan hasta la superficie. La estratigrafía sísmica es una evidencia de que las cuencas las Tinajas y Montague forman parte de la evolución de la zona de rift en ésta latitud. Los resultados de éste trabajo demuestran que la zona de falla Cerro Prieto es la más activa y es la que ha acumulado mayor deformación por cizalla y también incluye una componente de extensión, la cual se distribuye entre el escarpe principal del Golfo en la Sierra Las Tinajas, hasta la falla Cerro Prieto al este. El levantamiento y exhumación de la cuenca Altar al este de la falla Cerro Prieto (Pacheco et al., 2006; Ortlieb et al., 1991) sugiere que ésta región del rift está siendo abandonada (Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007).

IV.3 Modelo estructural e implicaciones tectónicas

Las fallas transformes de Cerro Prieto e Imperial se consideran las estructuras principales del sistema de fallas San Andrés - Golfo de California y con frecuencia se hace referencia a ellas como las fallas mayores que definen el límite de placas en ésta zona (por ejemplo Frez-Cárdenas y González-García, 1991; García-Abdeslem y López-Guzmán, 2009; entre otros). Cuando se habla del marco estructural en éste sector de la frontera de placas, se recurre a un modelo simple de fallas de rumbo dextrales, con escalonamiento derecho, en el que las fallas del modelo interactúan (las fallas de Cerro Prieto e Imperial, por ejemplo), desarrollando cuencas tipo *"pull-apart"* en las zonas de traslape de los segmentos involucrados (ejemplo, la cuenca de Cerro Prieto) (Lomnitz et al., 1970; Elders et al., 1984; Lippman et al., 1984; Frez-Cárdenas y González-García, 1991; Glowacka et al., 1999; González et al., 2001; Glowacka et al., 2005, Suárez-Vidal et al., 2008; García-Abdeslem y López-Guzmán, 2009; Sarychikhina et al., 2011; entre otros). Tomando en cuenta las estructuras identificadas en éste trabajo y el alineamiento de la sismicidad asociada con el temblor El Mayor-Cucapah, cuyo epicentro se localiza al oeste de la falla Cerro Prieto (Hauksson et al., 2010; Oskin et al., 2012). Podemos concluir que gran parte de la deformación se transfiere a través de la cuenca Montague en una zona de deformación transtensiva. En éste sector no se esperaba un sismo de esta magnitud, que diera como resultado una ruptura superficial de ~120 km de longitud y la licuefacción intensiva del terreno en una superficie de ~6,150 km² (Wei et al., 2010).

La relación entre la zona de deformación de la falla Cerro Prieto y el modelo simple de fallas de rumbo dextrales (Nilsen y Sylvester, 1995) no es posible establecer, ya que se requiere una flexión de la zona de falla de rumbo para producir subsidencia y un depocentro alargado. En éste trabajo no podemos establecer un cambio de dirección de la falla Cerro Prieto definida en la cuenca Wagner y en la región del Golfo de Santa Clara (González-Escobar et al., 2009;

Pacheco et al., 2006; Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007). No obstante, si se puede decir que la zona de falla Cerro Prieto tiene una componente de extensión y la cizalla lateral se distribuye en un arreglo de fallas oblicuas que se conectan con el sistema de fallas de Laguna Salada que cortan la Sierra Cucapah y las fallas que transfieren cizalla lateral en el margen SW de la cuenca Cerro Prieto al norte.

La estructura del sector occidental de la cuenca Montague parece estar controlada por un tren de fallas que van cambiando de rumbo progresivamente hacia el NW. Estas fallas exhiben la componente de desplazamiento normal y presentan en diferente intensidad de deformación desde la falla Cerro Prieto al este, pasando por las fallas: Palmas, Mesa, Indiviso-S y Pangas Viejas al oeste. Las fallas Dunas y Saldaña se considera que están en el dominio estructural de la región de Laguna Salada y que están separadas por un alto de basamento de la zona de falla Cerro Prieto. El espesor de la columna sedimentaria disminuye al NW y está controlado por la falla Pangas Viejas, mientras que al SE, la falla Cerro Prieto tiene una muy pobre expresión de su desplazamiento vertical, en comparación a el desplazamiento vertical reportado por Aguilar-Campos (2007) y Aragón Arreola (2006) en la región del alto Golfo de California. La falla Pangas Viejas es la que acomoda mayor extensión en la zona de falla Cerro Prieto está a ~18 km al oeste de la falla de Cerro Prieto. Es una falla lístrica y muestra una aparente conexión a profundidad con las fallas Indiviso-S y Mesa, así como hacia el sur con la falla Cerro Prieto.

La presencia de fallas de bajo ángulo es reportada en el valle de Mexicali y en el NE de Baja California (Siem y Gastil, 1994; Axen y Fletcher, 1998; Seiler et al., 2009), éstas controlan la subsidencia de las cuencas en la margen oeste de la depresión de Salton y son contemporáneas con las fallas de rumbo. La falla Pangas Viejas a profundidad es una falla de bajo ángulo situada en el extremo oeste de la zona de deformación que produce la falla Cerro Prieto. La dirección de caída del bloque de techo hacia el este indica una componente de extensión en dirección NW-SE, ésta caída afecta a la mayoría de los reflectores del Plioceno,

excepto a los del Pleistoceno y es posible que el despegue de la falla Pangas Viejas se conecte con la falla Cerro Prieto a profundidad. La cuenca Montague yace en el bloque de techo de la falla Pangas Viejas, al oeste ésta cuenca alargada está limitada por la falla Cerro Prieto y en la zona de estudio presenta una caída vertical subordinada a un desplazamiento lateral.

Aguilar-Campos (2007) reporta una falla de crecimiento asociado a la falla Cerro Prieto en la cuenca de Wagner en el sector más al norte del Golfo de California. En éste segmento del rift la falla Cerro Prieto también acomoda extensión y los estratos en el bloque de techo forman un abanico que se engruesa hacia el este con el desplazamiento vertical de la falla Cerro Prieto. Entre las cuencas Montague y la cuenca de Wagner no tenemos información que nos ayude a inferir donde termina la falla Pangas Viejas y la subsidencia que produce la gran anomalía gravimétrica que define la cuenca Montague.

Los procesos que conducen a la extensión de la corteza y subsidencia en la configuración en cuencas transtensionales strike-slip pueden ser extremadamente complejos a diferentes escalas. Cuencas que se desarrollan a lo largo y adyacentes a fallas de rumbo son generalmente pequeñas y de corta duración en comparación con aquellas que se desarrollan en otras configuraciones de rifts ortogonales o de menor oblicuidad en los límites de placas tectónica (Nilsen y Sylvester, 1995). El modelo conceptual que nos indica la tectónica en la zona (Figura 45), no parece adaptarse a los modelos conceptuales simples por lo que resulta necesario obtener más información de sismica de reflexión que nos ayude a visualizar más a detalle la región para obtener el modelo estructural más completo.

Hauksson et al. (2010) puntualizan que la secuencia de réplicas del sismo El Mayor-Cucapah revela un tectonismo regional transtensional, incluyendo el crecimiento del Valle de Mexicali más al oeste y la transferencia del movimiento de

las placas tectónicas Pacífico-Norteamérica desde el sur del Golfo de California al sistema de falla San Andrés al norte y postulan que la localización del sismo El Mayor-Cucapah (2010), así como los de Landers (1992) y Héctor Mine (1999), pueden haber sido controlados por quiebres (curvas) en las fallas principales del límite de placas (Figura 45), por lo que podríamos decir que los quiebres son la serie de estructuras observadas en un ancho de ~18 km entre las falla Cerro Prieto y Pangas Viejas. Aunque este modelo resulta difícil de explicar ya que como se observa en la figura 45, no se explica la presencia del sistema de fallas Cucapah.

Si consideráramos los modelos de deformación asociados a una curvatura (*bend*) de una falla de desplazamiento lateral se produciría una cuenca *"pull-apart"* (Figura 45). Con forma rómbica en donde ocurre extensión y desarrolla un patrón de fallas normales a oblicuas en $\sim 60^\circ$ a la dirección de la falla de rumbo. En nuestro caso de estudio la zona de falla Cerro Prieto incluye a la falla Cerro Prieto que continua con el mismo trazo desde la cuenca de Wagner hasta el volcán Cerro Prieto y no podemos hablar de un *"bend"* de la falla principal (FCP), pero si observamos que la componente de extensión en la zona de falla cambia de polaridad. En la cuenca Wagner la falla Cerro Prieto tiene una componente vertical importante con caída al oeste, mientras que en las cercanías del volcán ésta falla controla la subsidencia hacia el este. En la zona de estudio la falla Cerro Prieto no presenta un desplazamiento vertical significativo y en ese sector la componente de extensión se acomoda en la falla Pangas Viejas ~18 km al oeste de la falla Cerro Prieto.

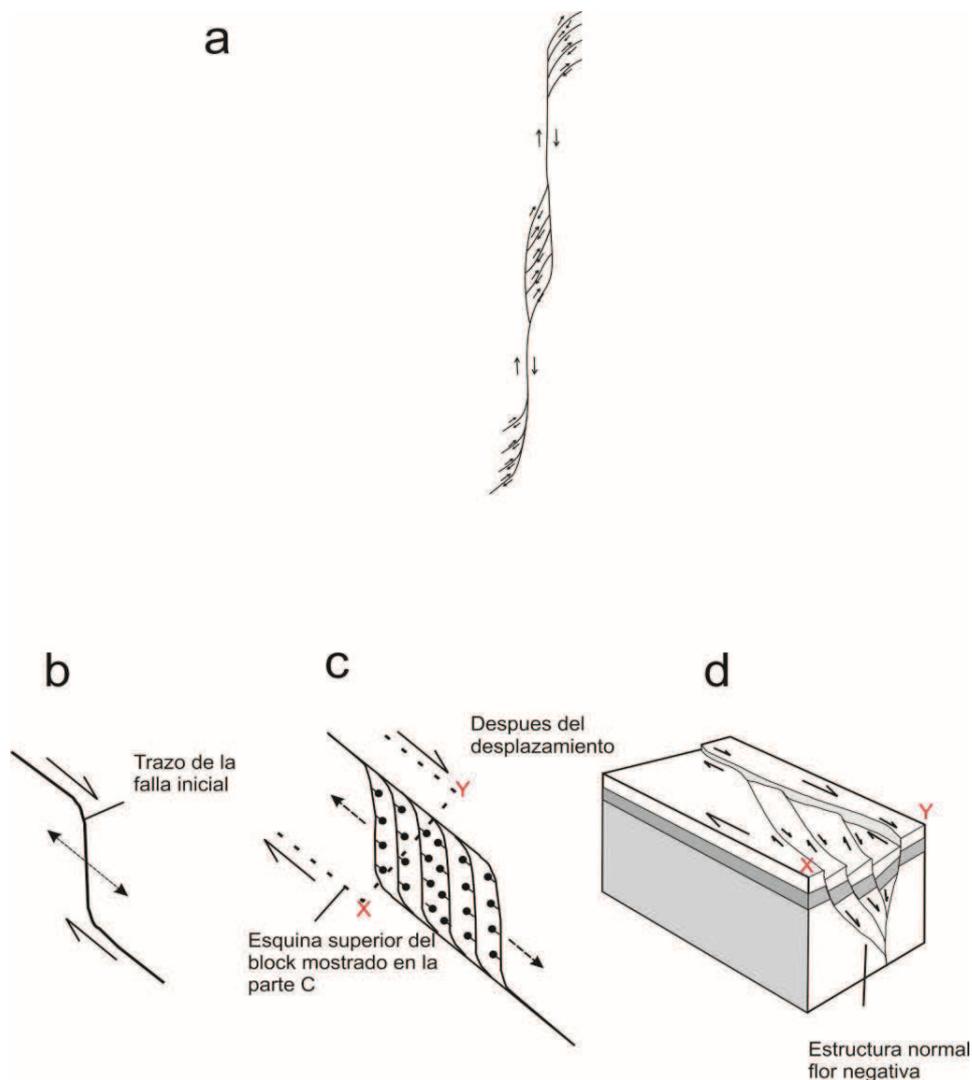


Figura 45. Formación de un transtensional strike-slip duplex en una curvatura (bend) extensional. a. sistema de falla lateral derecha strike-slip (tomado de Woodcock and Fischer, 1986).

Para este modelo podemos decir que la tectónica del sur de la zona de estudio lo cumple en lo general, ya que se tiene la falla Cerro Prieto y todo parece indicar que las fallas Mesa, Indiviso-S y Pangas Viejas están interceptadas al sur. La cuestión es que al norte no se interceptan con la falla Cerro Prieto, sino que tienden a alejarse de ésta y presentan una tendencia a interceptarse con la zona de fallas de la Sierra Cucapah (Figuras 43 y 46).

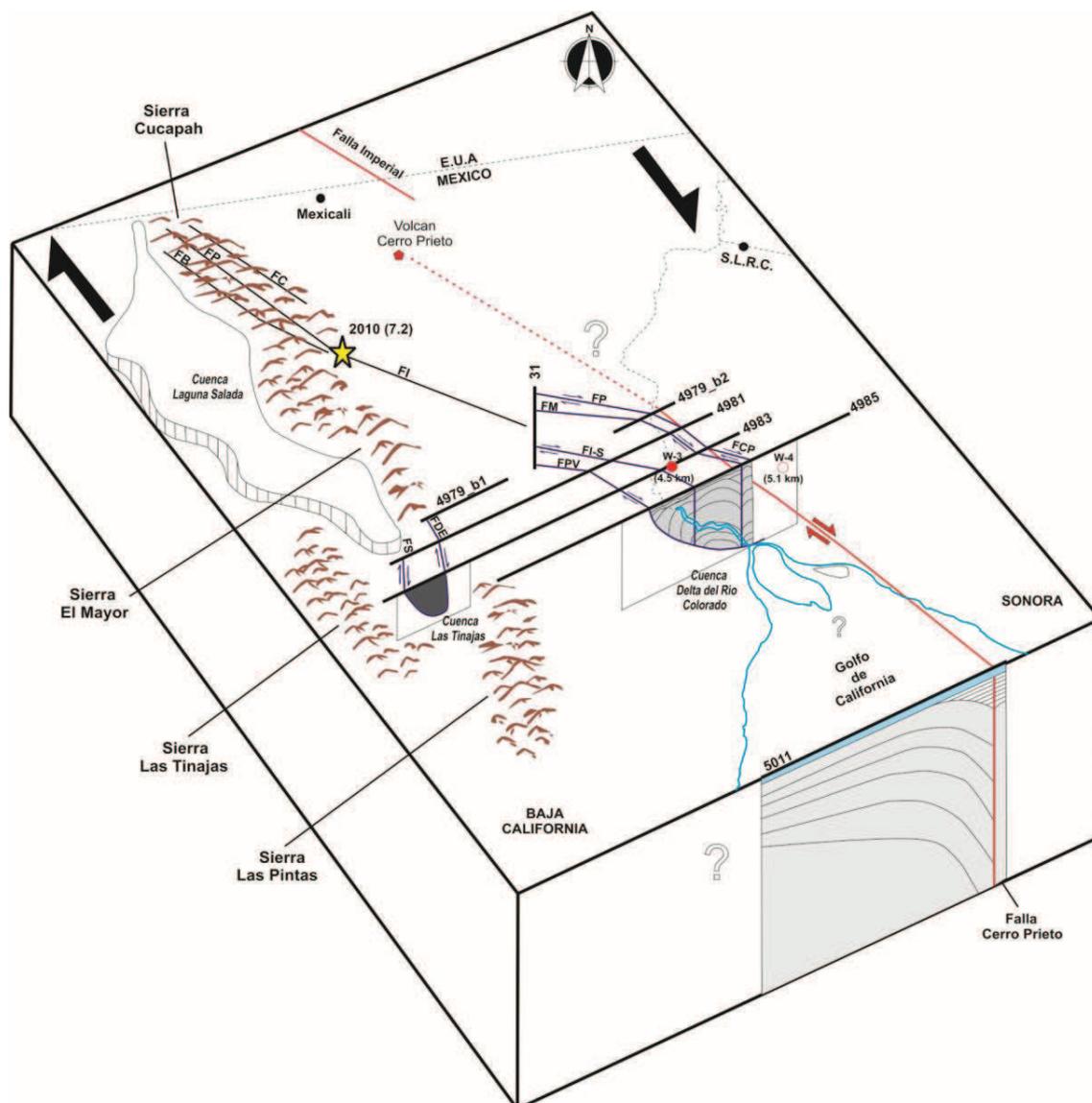


Figura 46. Esquema estructural de la región de estudio. En color rojo continuo la falla Cerro Prieto, rojo punteado el trazo inferido de la falla Cerro Prieto. Se muestran las fallas: Palmas (FP), Mesa (FM), Indiviso-S (FI-S), Pangas Viejas (FPV), Dunas (FDU) y Saldaña (FS). Se incluyen las fallas Indiviso (FI) (tomada de Fielding, comunicación escrita), Cucapah (FC), Pescadores (FP), Borrego (FB). La estrella representa el sismo del 4 de abril de 2010 (M_w 7.2) (González-García et al., 2010; Fletcher y Spelz (2009); Oskin et al., 2012).

Capítulo V

Conclusiones

El análisis del procesado e interpretación de líneas sísmicas propiedad de PEMEX aporta nueva información sobre la estructura y la sedimentación de un sector de la zona de falla Cerro Prieto y de los márgenes adyacentes en la parte S-SW del delta del Río Colorado. Nuestro análisis geométrico enfatiza la serie de estructuras observadas a lo largo del sector N-NW de la falla transformante Cerro Prieto. Las principales conclusiones de este estudio resultado del proceso e interpretación de 215 km lineales de sísmica son:

1. En la zona de falla Cerro Prieto se tiene la presencia de este a oeste, las fallas: Desierto, Cerro Prieto, Palmas, Mesa, Indiviso-S, Pangas Viejas. La región sur de la planicie deltaica del Río Colorado se ubica sobre la zona de falla Cerro Prieto, la cual constituye el límite principal entre las placas del Pacífico y Norteamérica. Se considera que la zona de deformación del límite de placas en ésta zona es de ~18 km de ancho desde la falla Cerro Prieto hasta Pangas Viejas con orientación N-NW y está alineada en dirección a la zona de réplicas del evento del 4 de abril de 2010 (M_w 7.2) que definió a la falla Indiviso (González- García et al., 2010).
2. En la zona de falla Cerro Prieto tienen la presencia de una estructura tipo "rollover" controlada por la falla Pangas Viejas que nos indica que es una falla que acomoda extensión. Es una falla lístrica cuyo trazo en superficie coincide con el cauce moderno del Río Colorado. El anticlinal que produce la estructura de "rollover" está sepultada por una capa de sedimentos de ~400 m de espesor.

3. El trazo de la falla Cerro Prieto reportado en la literatura, así como su correlación con datos gravimétricos es confirmado con las secciones sísmicas. Esta falla marca el límite oriental entre las placas del Pacífico y Norteamérica para la latitud de la región de estudio. No podemos confirmar si el trazo de la falla Cerro Prieto continua en dirección recta hacia el Volcán del mismo nombre, ya que no contamos con información al norte de Mesa de Andrade.

4. La falla Palmas tiene un rumbo e intercepta a la falla Cerro Prieto a la altura de Mesa de Andrade. Esta falla se desvía 20° al oeste respecto al trazo de Cerro Prieto, conservando un azimut con tendencia hacia la zona epicentral del sismo del 4 de abril de 2010.

5. La falla Indiviso-S, es sin duda la misma falla que rompió durante el sismo El Mayor-Cucapah del 4 de abril de 2010 (M_w 7.2). Por lo que la falla Indiviso ya existía, simplemente rompió. Esta estructura tiene la misma tendencia y coincide con lo reportado por la imagen de Pixel-Tracking, así como la zona de réplicas.

6. El depocentro al oeste del alto de basamento de las sierras El Mayor y Las Pintas define la cuenca Las Tinajas reportada aquí por primera vez. Este depocentro está separado por altos de basamento de la cuenca Laguna Salada al norte y de la cuenca Montague al este. Este depocentro está limitado al este por la falla Dunas que es posible que está relacionada con las fallas en las estribaciones de la Sierra El Mayor. Presenta alguna tendencia y similitud con la falla Cañada David localizada al oeste de la Sierra El mayor. Ambas bordean un basamento acústico y todo indica que la Sierra El Mayor en su parte más al sur es donde se localiza la falla Cañada David, al estar sepultada por sedimentos y posiblemente conectada con la Sierra Las Pintas.

7. Las fallas Mesa, Indiviso-S y Pangas Viejas, aparentemente tienden a unirse hacia el SE y todo parece indicar que también continúa hacia el norte y no muestran una tendencia a unirse con la falla Cerro Prieto al norte, pero sí con el sistema de fallas de Sierra Cucapah. No podemos confirmar la continuación de las fallas al norte y sur del área de estudio debido a que no se cuenta con perfiles sísmicos que nos permita marcar su continuación.

8. La tendencia de algunas de las estructuras aquí interpretadas a interceptar con la falla Cerro Prieto al SE queda en duda, ya que se presenta una tendencia de actividad sísmica perpendicular a su azimut varios kilómetros al NW de la falla Cerro Prieto.

9. La falla Pangas Viejas es una estructura que representa riesgo sísmico y es considerada la responsable de los mayores desplazamientos verticales en la cuenca Montague, así como de efectos de licuefacción a lo largo de toda la región de influencia del sismo del 4 de abril de 2010 (M_w 7.2).

Literatura Citada

Aguilar-Campos, C. 2007. Sismología de reflexión en el norte del Golfo de California, México. Tesis de maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México. 82 p.

Alles, D.L. 2011. Geology of the Salton Trough. Retrieved from <http://fire.biol.wvu.edu/trent/alles/GeologySaltonTrough.pdf> on February 25, 2012. Edited by D. L. Alles, Western Washington University.

Aragón-Arreola, M. 2006. Structural evolution of basins in the Northern and Central Gulf of California, Implications for rift kinematics and strain accommodation, Umpbl. Tesis de doctorado. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B. C., 146 p.

Aragón-Arreola, M. y Martín-Barajas, A. 2007. Westward migration of extension in the northern Gulf of California, México. *Geology*, v. 35, p. 571-574.

Armstrong, P.A., 2010. Timing and controls on late Quaternary landscape development along the eastern Sierra El Mayor range front in northern Baja California, Mexico. *Geomorphology*, 114(3):415.

Astier, J.L. 1975. *Geofísica Aplicada a la Hidrogeología*. Masson et Cie., Editeurs, París, Francia. 334 p.

Axen, G.J., y J.M. Fletcher. 1998, Late Miocen-Pleistocene extensional faulting, Northern Gulf of California, México and Salton Trough, California. *International Geology Review*: 217-244.

Axen, G.J., M. Grove, D. Stockli, O.M. Lovera, D.A. Rothstein, J.M. Fletcher, K. Farley y P. Abbott. 2000. Thermal evolution of Monte Blanco Dome-Late Neogene low-angle normal faulting during the Gulf of California rifting and late Eocene disruption of extraregional river system. *Tectonics*, 10 (2):197-212.

Badley, M.E. 1985. *Practical Seismic Interpretation*. International Human Resources Development Corp. Boston. 185 p.

Beach, A., y P. Trayner. 1991. The geometry of normal faults in a sector of the offshore Nile Delta, Egypt. En: Roberts, A. M., Yielding, G., Freeman, B. (Eds.). *The Geometry of Normal Faults*, Special Publication. Geological Society of London. 56: 172-182 p.

Bennet, A., W. Rodi, y R.E. Reilinger. 1996. Global Positioning System constraints of fault slip rates in southern California and northern Baja Mexico, *J. Geophys. Res.* 101(21):943-21,960,

Beus, S. Stanley y Morales, M., 1990. *Grand Canyon Geology*. Oxford University Press.

Bialas, R.W. y W.R. Buck. 2009. How sediment promotes narrow rifting: Application to the Gulf of California: *Tectonics*, v. 28, TC4014, doi:10.1029/2008TC002394.

Biddle, K. T. y Christie-Blick, N. 1985. Strike-Slip deformation, basin formation, and sedimentation. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Special Publication No. 37*. Tulsa, Oklahoma, U.S.A. 386 p.

Brandenberg, S.J., Fletcher, J., Gingery, J.R., Hudnut, K.W., McCrink, T., Meneses, J.F., Murbach, D., Rockwell, T., Stewart, J.P., Tinsley, J. 2010. Preliminary Report on Seismological and Geotechnical Engineering Aspects of the April 4 2010 Mw 7.2 El Mayor-Cucapah (Mexico) Earthquake. Retrieved from http://www.geerassociation.org/Post_EQ_Reports.html on March 23, 2012.

Burg, J.P. 2011. *Structural Geology and Tectonics*. ETH Zürich and Universität Zürich, Geologisches Institut, Switzerland.
<http://www.files.ethz.ch/structuralgeology/JPB/>

Castro, R., J.G. Acosta, V.M. Wong, A. Pérez-Vertti, A. Mendoza y L. Inzunza. 2011. Location of Aftershocks of the 4 April 2010 M_w 7.2 El Mayor-Cucapah Earthquake of Baja California, Mexico. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 101 (6): 3072-3080 p.

Colleta, B. y L. Ortlieb. 1984. Deformation of middle and late pleistocene deltaic deposits at mouth of the Rio Colorado, Northwestern Gulf of California. En: Mapilca Cruz, V., Celis Gutiérrez, S., Guerrero García, J & Ortlieb, L. (eds). *Neotectonics and sea level variations in the Gulf of California area, a symposium*, Hermosillo, Sonora, México, Abril 21-23. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. 20 p.

Cordsen, A., M. Galbraith y J. Peirse. 2000. *Planning Land 3-D Seismic Surveys*. Geophysical Development Series No. 9. Society of Exploration Geophysicists. U.S.A.

Cunningham, W.D. y P. Mann. 2007. Tectonics of strike-slip restraining and releasing bends, eds. *Geological Society, London, Special Publications*, 290, 1-12. DOI: 10.1144/SP290.1.

De la Fuente, M. y J.S Sumner. 1974. Estudio aeromagnético del Delta del Río Colorado, Baja California, México. *Geofísica Internacional*. 14: 35-48 p.

Dixon , T., J. Decaix, F. Farina, K. Furlong, R. Malservisi, R. A. Bennet, F. Suarez-Vidal, J.M. Fletcher y J. Lee. 2002. Seismic cycle and rheological effects on estimation of present-day slip rates for the Agua Blanca and San Miguel-Vallecitos faults, northern Baja California, Mexico. *Journal of Geophysical Research*. 107(B10): 2226 p. (PA: CPGOA20025).

Dorsey, R. J., A. Fluette, K. McDougall, B.A House, S.U. Janecke, G.J. Axen y C.R. Shirvell. 2005. Chronology of Miocene–Pliocene deposits at Split Mountain Gorge, Southern California: A record of regional tectonics and Colorado River evolution. *Geology*: v.35; no.1.; p. 57-60; doi:10.1130/G23139A.

Dorsey, R.J., A. Fluette, K. McDougall, B.A. Housen, S.U. Janecke, G.J. Axen y C.R. Shirvell. 2007. Chronology of Miocene–Pliocene deposits at Split Mountain Gorge, Southern California: A record of regional tectonics and Colorado River evolution. *Geology*. 35:57-60

Dorsey, R.J. 2010. Sedimentation and crustal along an active oblique-rift margin: Salton Trough and northern Gulf of California. *Geology*. 38: 443-446.

Elders, W.A., R.W. Rex, Tsvi. Meidav, P.T. Robinson y S. Biehler. 1972. Crustal spreading in Southern California. *Science*. 178: 15-24 p.

Elders, W.A., D.K. Bird, A.E. Williams y P. Schiffman. 1984. Hydrothermal flow regime and magmatic heat source of the Cerro Prieto Geothermal system, Baja California, Mexico. *Geothermics* 13, 27–47.

Ellsworth, W.L., 1990, Earthquake history, 1769-1989, chap. 6 of Wallace, R.E., ed., *The San Andreas Fault System, California*: U.S. Geological Survey Professional Paper 1515, p. 152-187.

Farr, T.G., E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodriguez, P. Rosen, L. Roth, D. Seal, S. Shaffer, J. Shimada, J. Umland, M. Werner, M. Oskin, D. Burbank y D. Alsdorf. 2007. The Shuttle Radar Topography Mission, v. 45, *Reviews of Geophysics*, doi: 1029/2005RG000183.

Felzer, K.R., Cao, T. 2008. WGCEP Historical California earthquake catalog, Appendix H, in: *The 514 Uniform California Earthquake Rupture Forecast, version 2 (UCERF 2)*: U.S. Geological Survey Open-File Report 2007-1437H and California Geological Survey Special Report 516 203H. Retrieved from <http://pubs.usgs.gov/of/2007/1437/h/> on February 25, 2012.

Fenby, S.S y R.G. Gastil. 1991. Geologic-Tectonic Map of the Gula of California and Surrounding Areas. En: The Gulf and Peninsular Provinces of the Californias, AAPG. Memoir 47: 79-83 p.

Fletcher, J.M. y R.M. Spelz. 2009. Patterns of Quaternary deformation and rupture propagation associated with an active low-angle normal fault, Laguna Salada, Mexico: Evidence of a rolling hinge? *Geosphere*. 5(4): 385-407 p. doi:10.1130/GES00206.1 (PA: 88783)

Fonseca-López H. 1982. El campo geotérmico de Cerro Prieto. Estudios geofísicos realizados. Cuarto Simposio sobre el campo geotérmico de Cerro Prieto Baja California, México. Organizado por Comisión Federal de Electricidad en cooperación con el United States Department of Energy, Division of Geothermal Energy. Vol. 1. 1-39 p.

Frez-Cárdenas, J.D. y J.J. Gonzalez-Garcia. 1989. Sismicidad y mecanismos focales en el Valle Mexicali-Imperial (1973-1985). *Geofísica Internacional*. Vol. 28, (No. 4): 643-691 p. (PA: CESIA8903).

Frez-Cárdenas, J.D. y J.J. González-García. 1991. Crustal Structure and Seismotectonics of Northern Baja. En: Dauphin, J.P. y Simoneit, B.R.T. (eds.). The Gulf and Peninsular Provinces of the Californias. American Association of Petroleum Geologists. 47: 261-283 p.

Fowler, C.M.R. 1998. The Solid Earth. An introduction to Global Geophysics. Edt. Cambridge University Press. pp 472.

Fuis, G.S., W.D. Mooney, J.H. Healy, G.A. McMechan y W.J. Lutter. 1984. A seismic refraction survey of the Imperial Valley Region, California: *Journal of Geophysical Research*, v. 89, p. 1165–1189, doi: 10.1029/JB089iB02p01165.

García-Adbeslem, J. y López-Guzmán, M. 2009. A suggested reverse geomagnetic polarity event from the Panga de Abajo magnetic anomalies in Mexicali Valley, Baja California, Mexico. *Geofísica Internacional*. 48 (3): 279-296 p.

Gibbs, A. D. 1984. Structural evolution of extensional basin margins. *J. Geol.. Soc. London*, Vol. 141, pp. 609-620.

Glowacka, E., J.J. González-García y H.M. Fabriol Beauville. 1999. Recent vertical deformation in Mexicali Valley and its relationship with tectonics, seismicity, and the exploitation of the Cerro Prieto geothermal field, Mexico. *Pure and Applied Geophysics*. (No. 156,): pp 591-614 p. (PA: CPSIA9903-99).

González-Escobar, M., C. Aguilar-Campos, F. Suárez-Vidal y J.A. Martín-Barajas. 2009. Geometry of the Wagner basin, upper Gulf of California based on seismic reflection. *International Geology Review*. 51(2): 133-144 p.

González-Escobar, M., F. Suárez-Vidal, J.A. Hernández-Pérez y J.A. Martín-Barajas. 2010. Seismic reflection-based evidence of a transfer zone between the Wagner and Consag basins: implications for defining the structural geometry of the northern Gulf of California. *Geo-Marine*. 10 p.

González-Fernández, A., J.J. Dañobeitia, L.A. Delgado-Argote, F. Michaud, D. Córdoba y R. Bartolomé. 2005. Mode of extension and rifting history of upper Tiburón and upper Delfín basins, northern Gulf of California: *Journal of Geophysical Research*, v. 110, B01313, doi: 10.1029/2003JB002941.

González-García, J.J., L. Prawirodirdjo, Y. Bock y D. Agnew. 2003. Guadalupe Island, Mexico as a new constraint for Pacific plate motion. *Geophysical Research Letters*. 30(16): Doi.10.1029 SDE p. (PA: 15442).

González-García, J.J., J. A. González-Ortega, B. Yehuda , Y. Fialko , E. Fielding , J. Fletcher Mackrain, J. Galetzka , K. W. Hudnut , L. Munguía Orozco, S. Nelson , T. Rockwell K., D. Sandwell y J. Stock . 2010. Seismotectonics of the 2010 El Mayor Cucapah-indiviso earthquake and its relation to seismic hazard in Southern California. Abstract T53B-2177, presented at 2010 Fall Meeting, AGU, San Francisco, CA, 13-17 Dic.

Hauksson E., J. Stock, K. Hutton, W. Yang, J.A. Vidal-Villegas y H. Kanamori. 2010. The 2010 M_w 7.2 El Mayor-Cucapah Earthquake Sequence, Baja California, Mexico and Southernmost California, USA: Active Seismotectonics along the Mexican Pacific Margin. *Pure and Applied Geophysics*. v. 168, p. 1255-1277 doi: 10.1007/S00024-010-009-7.

Helenes J., A.L. Carreño y R.M. Carrillo. 2009. Middle to late Miocene chronostratigraphy and development of the northern Gulf of California. *Marine Micropaleontology* 72 (2009) 10-25. doi: 10.101G

Henry, C. D. y J. Aranda-Gómez. 1992. The real southern Basin and Range: Mid to late Cenozoic extension in Mexico. *Geology* 20: 701-704 p.

Henry, C.D. y Aranda-Gómez, J.J. 2000, Plate interactions control middle late Miocene, proto-Gulf and Basin and Range extension in the southern Basin and Range. *Tectonophysics*. 318: 1-26 p.

Hurwitz, S., Z. Garfunkel, Y. Ben-Gai, M. Reznikov, Y. Rotstein y H. Gvirtzman. 2002. The tectonic framework of a complex pull-apart basin: seismic reflection observations in the Sea of Galilee, Dead Sea transform. *Tectonophysics*. 359: 289-306 p.

Jaillard, E. 1993. *Deltas*. Office de recherche scientifique d'outre-mer (ORSTOM), France. 85 p.

Jenning, S., y G.R. Thompson. 1986. Diagenesis of Plio-Pleistocene sediments of the Colorado River Delta, southern California. *Journal of Sedimentary Petrology*. 56: 89-98 p.

Lembang, L., 2003. *Practical Aspect of Seismic Data Acquisition*. Bucharest.

Lippman, M.J., N.E. Goldstein, S.E. Halfman y P.A. Whitherspoon. 1984. Exploration and development of the Cerro Prieto geothermal field. *Journal of Petroleum Technology* 36, 1579–1591.

Lizarralde, D., G.J. Axen, H.E. Brown, J.M. Fletcher, A. González-Fernández, A., A.J. Harding, W.S. Holbrook, G.M. Kent, P. Paramo, F. Sutherland y P.J. Umhoefer. 2007. Variation in styles of rifting in the Gulf of California: *Nature*, v. 448, p. 466–469, doi: 10.1038/nature06035.

Lomnitz, C., F. Mooser, C.R. Allen, J.N. Brune y W. Thatcher. 1970. Sismicidad y tectónica de la region norte del Golfo de California, México. *Resultados Preliminares. Geofísica Internacional*. 10: 37-48 p.

Lonsdale, P. 1989. Geology and tectonic history of the Gulf of California. En: Winterer, D. y Hussong, M. (eds.). *The Eastern Pacific Ocean and Hawaii. The Geology of North America* Geological Society of America, Boulder, CO. 499-521 p.

Martín-Barajas, J. A. 2000. Volcanismo y extensión en la Provincia Extensional del Golfo de California. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 53: 72-83 p.

Martín-Barajas, A., J. Abdeslem-García, J. Helenes Escamilla, González-Escobar M., M. Aragón-Arreola y M. Pacheco Romero. 2006. Evolución Tectonoestratigráfica de las Cuencas del Norte del Golfo de California. Volumen 1 – Integración de resultados. Reporte técnico No. 410303843, PEMEX. 63 p.

Moore D.G. 1973. Plate-edge deformation and crustal growth, Gulf of California structural province: *Geological Society of America Bulletin*, v. 84, p. 1883–1905, doi: 10.1130/0016-7606(1973)84<1883:PDACGG>2.0.CO;2.

Nelson, S., E. Fielding, F. Zamora-Arroyo y K. Flessa. 2012. Delta Dynamics: Effects of Tides, River Flows and Major Earthquake on Ciénega de Santa Clara and the Colorado River Delta, Mexico. *Ecological Engineering*. (Submitted).

Nilsen, H.T. y Sylvester A.G. 1995. Strike-Slip Basins. En: Cathy J. Busby y Raymond V. Ingersoll (eds.). *Tectonics of Sedimentary Basins*. Blackwell Science, Cambridge, Massachusetts, 425-458 p.

Ortega-Rivera, A. 2003. Geochronological constraints on the tectonic history of the Peninsular Ranges batholiths of Alta and Baja California: Tectonic implications for western Mexico. *Geological Society of America, Special Paper*. 374: 297-735 p.

Ortlieb, L. 1991. Quaternary vertical movements along the coast of Baja California and Sonora, *in* Dauphin, J.P., Simoneit, B.R.T., (eds.), *The Gulf and Peninsular Province of the Californias: American Association of Petroleum Geologists, Memoir*, 47, 447-480.

Oskin M., J. Stock y J.A. Marín-Barajas. 2001. Rapid localization of Pacific-North America plate motion in the Gulf of California. *Geology*. 29: 459-463 p.

Oskin, M.E., J.R. Arrowsmith, A. Hinojosa-Corona, A.J. Elliott, J.M. Fletcher, E.J. Fielding, P.O. Gold, J.J. González-García, K.W. Hudnut, J. Liu-Zeng y O.J. Terán 2012. Near-Field Deformation from the El Mayor–Cucapah Earthquake Revealed by Differential LIDAR. *Science*, Vol 335 702-705

Pacheco-Romero M.F., J.A. Martín-Barajas, W.A. Elders, J.M. Espinosa-Cardena, J. Helenes y A. Segura. 2006. Stratigraphy and structure of the Altar basin of NW Sonora: Implications for the history of the Colorado River delta and the Salton trough. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 23(1): 1-22 p.

Peacock, D.C.P., R.J. Kipe y D.J. Sanderson. 2000. Glossary of normal faults. *Journal of Structural Geology*. 22: 291-305 p.

Peréz-Tinajero, C. 2007. Sísmica de Reflexión en el Desierto de Altar, Sonora México. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada. México. 101 p.

Persaud P., J.M. Stock, M. Steckler, A. Martín-Barajas, J.B. Diebold, A. González-Fernández, y G.S. Mountain. 2003. Active deformation and shallow structure of the Wagner, Consag, and Delfin Basins, northern Gulf of California, Mexico, *J. Geophysical Research*, v. 108, no. B7, 2355, doi: 10.1029/2002JB001937.

T. Dixon, P. Lafemina, G. Sella, J. Fletcher y F. Suárez-Vidal. 2007. New constraints on relative motion between the Pacific plate and Baja California microplate (Mexico) from GPS measurements. *Geophysical Journal International*. 170(3): 1373-1380 p. doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03494.x (PA: 60543).

The Earthquake at Volcano Lake, Mexico, November 20, 1915. September 1915. BSSA. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1916. 5:3p: 130-149.

Puente, I.C. y A. De la Peña. (2003) Geology of the Cerro Prieto geothermal field (2003). *Geothermics*, Volume 8, Issues 3-4, pp 155-175.

Quintanilla-Montoya A. L. y F. Suárez-Vidal. 1996. Cerro Prieto y su correlación con los centros de dispersión del Golfo de California. *Ciencias Marinas*. 22: 91-110 p.

Regueiro, J. 1997. *Sísmica para Ingenieros y Geólogos de Yacimientos*. Centro Internacional de la Educación y Desarrollo. Venezuela.
RESNOM, catálogo de eventos sísmicos: periodo de 1976-2010. <http://sismologia.cicese.mx/resnom/catálogos/eventos.php>.

Rodriguez, E., C.S. Morris, J.E. Belz, E.C. Chapin, J.M. Martin, W. Daffer y S. Hensley. 2005. An assessment of the SRTM topographic products, Technical Report JPL D-31639, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 143 pp.

Sarria, A. 1996. *Métodos geofísicos con aplicaciones a la ingeniería civil*. Ediciones Uniandes. Colombia. 371 p.

Sarychikhina, O., E. Glowacka, R. Mellors y F. Suárez-Vidal. 2011. Land subsidence in the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico, from 1994 to 2005. An integrated analysis of DInSAR, leveling and geological data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 204(1-4): 76-90 p. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2011.03.004 (PA: 100794).

Sheriff, R.E. 2002. *Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics*. Society of Exploration Geophysicists. Cuarta Edición. Tulsa, Oklahoma. 429 p.

Siem, M., y G. Gastil. 1994. Mid-Tertiary to Holocene extension associated with the development of the Sierra El Mayor Metamorphic Core Complex, northeastern Baja California, Mexico, *in* McGill, S.F., and Ross, T.M., eds., *Geological investigations of an active margin: Geological Society of America Cordilleran Section Meeting Guidebook: Redlands, California, San Bernardino County Museum Association*, p. 107–119.

Stock, J.M., y K.V. Hodges. 1989. Pre-Pliocene extension around the Gulf of California and the transfer of Baja California peninsula to the Pacific plate. *Tectonics*. 8(1): 99-115 p.

Suárez-Vidal, F., L. Munguía-Orozco, M. González-Escobar, J.J. González-García y E. Glowacka. 2007. Surface rupture of the Morelia Fault near the Cerro Prieto geothermal field, Mexicali, Baja California, Mexico, during the Mw 5.4 earthquake of May 24, 2006. *Seismological Research Letters*. 78(3): 394-399 p. (PA: 53505)

Suárez-Vidal, F., R. Mendoza-Borunda, L.M. Nafarrete-Zamarripa, J. Ramírez-Hernández y E. Glowacka. 2008. Shape and dimensions of the Cerro Prieto pull-apart basin, Mexicali, Baja California, Mexico, based on the regional seismic record and surface structures. *International Geology Review*. 50(7): 636-649 p. doi: 10.2747/0020-6814.50.7.636 (PA: 68049).

Teixidó-iUllod, Ma. T. 2000. Caracterización del subsuelo mediante sísmica de reflexión de alta resolución. Tesis Doctoral. Departamento de Geodinámica y Geofísica, Universidad de Barcelona, España. 253 p.

Wei, S., E. Fielding, S. Leprince, A. Sladen, J-P Avouac, D. Helmberger, E. Hauksson, R. Chu, M. Simons, K. Hudnut, T. Herring y R. Briggs. 2011. Superficial simplicity of the 2010 El Mayor-Cucapah earthquake of Baja California in Mexico. *Nature Geoscience*. 4: 615-618 p.

Winker, C.D. y S.M. Kidwell. 1986. Paleocurrent evidence for lateral displacement of the Pliocene Colorado River Delta by the San Andreas fault system, southeastern California. *Geology*. 14: 788-791 p.

Woodcock, N.H. y M. Fischer. 1986. Strike-slip duplexes. *Journal of Structural Geology*, v. 25, 725-735 p.

Yilmaz, O. 2001. *Seismic Data Analysis. Investigations in Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists. Segunda Edición. Tulsa, Oklahoma, U.S.A. 1000 p.

Zoback, M.L., R.C. Robert, C. Jachens, y J. A. Olso. 1999. Abruptaang-strike change in tectonic style: San Andreas fault zone, San Francisco Peninsula. *Journal of Geophysical Research*, Vol., 104, No. B5, pp 10,719-10742.