

Tesis defendida por

Ana Cristina Sánchez García

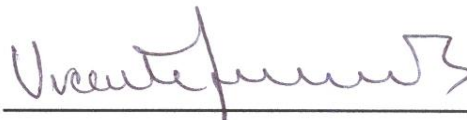
y aprobada por el siguiente Comité



Dr. Mario González Escobar
Director del Comité



Dr. Jesús Arturo Martín Barajas
Miembro del Comité



M.C. Vicente Ferreira Bartrina
Miembro del Comité



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



Dr. Hilario Covarrubias Rosales
Director de Estudios de Posgrado

21 de marzo de 2013

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



Programa de Posgrado en Ciencias
en Ciencias de la Tierra

Rasgos estructurales en el suroeste del delta del Río Colorado: Interpretación de
perfiles de sísmica de reflexión.

Tesis

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

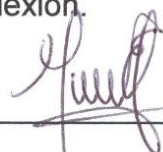
Ana Cristina Sánchez García

Ensenada, Baja California, México
2013.

Resumen de la tesis de Ana Cristina Sánchez García, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geofísica Aplicada.

Rasgos estructurales en el suroeste del delta del Río Colorado: Interpretación de perfiles de sísmica de reflexión.

Resumen aprobado por:



Dr. Mario González Escobar
Director de Tesis

El delta del Río Colorado se encuentra en el límite de las placas Pacífico-Norteamérica, en la Provincia Extensional del Golfo, la cual se caracteriza por una topografía de cuencas y sierras. Dentro de esta provincia las estructuras mayores son las fallas San Andrés, Imperial, Cerro Prieto e Indiviso. Mediante un convenio entre Petróleos Mexicanos (PEMEX) y el CICESE, se logró el acceso a información geofísica adquirida hace 30 años en la región. Parte de esta información es utilizada para este trabajo y consiste en cinco líneas de datos sísmicos de reflexión multicanal 2D. Los objetivos consistieron en el proceso, interpretación y correlación del basamento acústico, los horizontes sismoestratigráficos y las fallas que cortan a la secuencia. Los resultados muestran que el basamento se profundiza en dirección SE de la zona de estudio, hacia las cuencas Montague y Wagner, llegando a profundidades mayores a 5000 m al oriente de la falla Cerro Prieto. Se ubicaron dos nuevas fallas hasta ahora desconocidas y nombradas en este trabajo la falla Yurimuri y la falla Ometepec. La primera tiene rumbo NW con caída al este y se localiza al oeste de la falla Pangas Viejas. La segunda se orienta NE-SW con caída hacia el sur y se ubica al sureste de la región de estudio. La falla Yurimuri podría ser la estructura que controla la caída del basamento al sureste hacia la cuenca Montague. La falla Ometepec con caída hacia el sureste controla el sector oeste de un depocentro, es aparentemente un límite entre las cuencas Montague y Wagner. La región ha mostrado gran actividad sísmica a partir del sismo del 4 de abril de 2010, observándose una falla con buzamiento al norte que se observó solamente en uno de los perfiles. Esta falla se ubica en el área que registra gran actividad sísmica en el extremo sur de la ruptura de la falla Indiviso.

Palabras claves: **delta del Río Colorado, sísmica de reflexión, basamento acústico, Falla Cerro Prieto.**

Abstract of the thesis presented by Ana Cristina Sánchez García as a partial requirement to obtain the Master in Science degree in Earth Sciences with orientation in Applied Geophysics..

Structural features of southwest Colorado River Delta: Interpretation of seismic reflection profiles.

Abstract approved by:



Dr. Mario González Escobar
Thesis Director

Abstract

The Colorado River delta is located at the Pacific-North America plates boundary, in the Gulf Extensional Province which is characterized by a topography of basins and ranges. Within this province there are regional structures such the San Andreas, Imperial, Cerro Prieto and Indiviso Faults. Sierra El Mayor-Cucapah and Sierra Las Pintas are exposed basement. An agreement PEMEX-CICESE let us access to the 30 years old geophysic data. Some of this information is used to realize this thesis, which consist of the process and interpretation of five 2D-multichannel seismic reflection profiles and the correlation of the acoustic basement, sismoestratigraphy and faults. The results show that the basement deepens towards SE in this region, to Montague and Wagner basins, with greater depths than 5000m to the east of Cerro Prieto Fault. Two new structures were located, both of them previously unknown and they are Yurimuri and Ometepe Faults. The Yurimuri Fault presents NW direction and dip to the east and it could be controlling the basement vertical displacement into Montague basin. The Ometepe Fault controls the western of one depocenter with dip to southeast and apparently is a boundary between Montague and Wagner basins. The Colorado River delta has high seismic activity from the earthquake of April 4, 2010. There is a structure in only one profiles of this work dipping to the north, which correlates with the seismic activity to the southern of Falla Indiviso.

Keywords: Colorado River delta, seismic reflection, acoustic basement, Cerro Prieto Fault.

Dedicatorias

*A mis papás, Celia Virginia y Vicente,
por ser mi ejemplo a seguir, gracias por todo su cariño y apoyo en cada uno de
los pasos que doy, por compartir conmigo tantos consejos y enseñanzas, por
levantarme cuando caigo y motivarme a seguir adelante. ¡Gracias!*

*A mis hermanos, Diego Alán y Laura Edith,
por estar siempre conmigo, por sus palabras de aliento cada vez que lo he
necesitado, por su apoyo incondicional y por mostrarme siempre una sonrisa.*

*A mis tíos, Magdalena y Santiago Rendón, Gerardo García, Guadalupe García y
mi abuelita Maurilia Flores
por estar siempre al pendiente de mí y animarme a seguir mis sueños.*

Familia, los quiero mucho.

Agradecimientos

Doy gracias a Dios por permitirme concluir mi maestría en esta bella ciudad y a mi familia por estar conmigo en todo momento.

Al CONACYT, por el apoyo económico brindado, a CICESE por aceptarme en su programa de posgrado para realizar mis estudios de maestría, a PEMEX por los datos sísmicos de reflexión utilizados en esta tesis, a Halliburton y OpendTect por el acceso a los software facilitando el manejo de los datos.

A mi asesor académico y director de tesis Dr. Mario González Escobar, por su tiempo, paciencia y consejos brindados en todo momento.

A los profesores Dr. Martín Barajas y M.C. Vicente Ferreira por aceptar ser sinodales y dedicar tiempo en revisar esta tesis, así como por las recomendaciones y sugerencias hacia ella.

A Martin Pacheco, por sus enseñanzas, consejos y ayuda en la interpretación geológica de los datos; a Sergio Arregui, por su paciencia para resolver los problemas que tuve con los software y computadoras al procesar los datos; a Luis Sánchez, Alonso Sojo y José Juan Chanes, por su apoyo y recomendaciones en el procesado de datos; a Clemente por su ayuda durante toda la maestría, por sus consejos y disposición para resolver mis dudas, por escucharme en tantas ocasiones. Gracias chicos, por su amistad y compartir el laboratorio de Sísmica de Reflexión conmigo.

A Ramón Mendoza, por aclararme las dudas que surgieron al interpretar los datos.

A Humberto Benítez y José Mojarro por su ayuda y disponibilidad cada que tuve problemas con la computadora y la tecnología.

A mis profesores de la maestría, por trasmitirme sus conocimientos y experiencias, así como a cada uno de los investigadores, técnicos y secretarias de Ciencias de la Tierra, porque de todos he aprendido algo.

Al personal administrativo de Ciencias de la Tierra, Martha Barrera, Bárbara Uribe, Guadalupe Zepeda, Enid Morán y al personal administrativo de CICESE, Ivonne Best, Dolores Sarracino, Citlali Romero y Norma A. Fuentes, por su atención constante y amabilidad con la que siempre me recibieron.

Al personal de intendencia que siempre han tenido limpio los lugares de trabajo y lo hacen con una sonrisa, Doña Mary y Don Chuy.

A las profesoras Soledad, Rosario y Blanca Edith, por abrirme las puertas de sus casas y facilitar mi llegada a Ensenada. Gracias a ellas y sus familias ha sido más agradable mi estancia en este lugar, gracias por su amistad y cariño.

A los amigos con los que compartí tantos momentos buenos y malos durante estos casi tres años en Ensenada. A Porfirio Avilez, por siempre estar ahí, escucharme y aconsejarme; a Amalia Monzón, Anaid Fragoso, Brenda Anda y Rosalinda Mejía, ¡chicas! Gracias por demostrarme su amistad en todo momento, por su alegría, confianza y locuras compartidas. A Roger, Dulce, Samuel (Samvilla), Clemente, Adrián Misael, Salvador, Mario, Lenin, Román, Santos, Enrique Pahuamba, Jessy y Favio, Dania, Chanes, gracias por su amistad. A mis compañeros de generación por las gratas experiencias durante el tiempo de clases.

Al Dr. Juan Martín Gómez González, Dr. Rafael Barboza, Dr. Margarito Tristán y al Ing. Miguel Mayer por sus consejos antes y durante la maestría, a Maricarmen Perea, Diana Díaz y Karlita, Rodrigo Prado y Luz Hernández, Joss, Cecili, Giz, Iván (Jr), Nava, Mata, Luis Fernando, Valdo, Héctor Ángeles, Karla Mergold, que a pesar de la distancia continúa la amistad, gracias por todo su apoyo.

A todos aquellos que me han ayudado a realizar este sueño y que he olvidado mencionar. 😊

Contenido

	Página
Resumen español	i
Resumen inglés	ii
Dedicatorias	iii
Agradecimientos	iv
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	xiii
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	4
1.3 Área de estudio	4
1.4 Marco geológico y tectónico regional	5
1.3.1 Falla Imperial	9
1.3.2 Falla Cerro Prieto	9
1.3.3 Falla Indiviso	9
1.5 Depresión de Salton	11
1.6 Delta del Río Colorado	13
1.7 Sismicidad histórica	18
Capítulo 2. Metodología	23
2.1 Método sísmico	23
2.1.1 Sísmica de reflexión	24
2.1.2 Adquisición de datos sísmicos	26
2.2 Secuencia del procesado de datos	28
2.2.1 Pre-Apilamiento (Pre-stack)	28
2.2.1.1 Geometría	28
2.2.1.2 Edición de trazas	31
2.2.1.3 Correcciones estáticas de elevación	32
2.2.1.4 Atenuación de onda directa o air blast	33
2.2.1.5 Atenuación de ground roll	33
2.2.1.6 Filtrado pasa banda	33
2.2.1.7 Filtrado F-K	34
2.2.1.8 Deconvolución	35
2.2.2 Apilamiento (Stack)	36

2.2.2.1 Ordenamiento por CDP	36
2.2.2.2 Análisis de velocidad	37
2.2.2.3 Corrección por NMO	39
2.2.2.4 Apilamiento	40
2.2.3 Post-Apilamiento (Post-stack)	40
2.2.3.1 Divergencia esférica	41
2.2.3.2 Filtro variable en tiempo	41
2.2.3.3 Control automático de ganancia	42
2.2.3.4 Migración	42
2.2.3.5 Conversión a profundidad	44
Capítulo 3. Resultados	45
3.1 Secciones Sísmicas	46
3.1.1 Sección 5064	46
3.1.2 Sección 5060	50
3.1.3 Sección 5056	52
3.1.4 Sección 4987	54
3.1.5 Sección 4989	57
3.2 Mapa de anomalías gravimétricas	59
3.3 Configuración del basamento acústico	65
3.4 Correlación de fallas.	66
3.4.1 Falla Yurimuri	66
3.4.2 Falla Ometepéc	67
3.4.2 Falla Pangas Viejas	67
3.4.3 Falla Indiviso-S	68
3.4.4 Falla Mesa	68
3.4.5 Falla Cerro Prieto	69
Capítulo 4. Discusión	72
4.1 Implicaciones tectónicas	73
4.1.1 Fallas	73
4.1.2 Cambio en el régimen de sismicidad regional	75
Capítulo 5. Conclusiones	79
Referencias bibliográficas	81

Lista de figuras

Figura		Página
1	Localización de la zona de estudio en la región suroeste del delta de Río Colorado, indicando los perfiles sísmicos procesados e interpretados en este trabajo (líneas en negro).	5
2	Marco tectónico de la región del Golfo de California y la Península de Baja California (comunicación escrita Mendoza-Borunda, R.).	7
3	Fallas estructurales en la depresión de Salton y el Delta del Río Colorado (Pacheco <i>et. al.</i> , 2006, Suárez-Vidal <i>et. al.</i> , 2008).	10
4	Ubicación de las fallas propuestas por Chanes-Martínez (2012): Falla Saldaña (FS), Falla Dunas (FDU), Falla Pangas Viejas (FPV), Falla Indiviso (FI-S), Falla Mesa (FM), Falla Desierto (FD), así como el trazo de la falla Cerro Prieto (FCP) reportada anteriormente (Fonseca-López, 1982).	11
5	Línea roja delimita la zona del delta del Río Colorado y la Depresión del Salton al norte (modificado Meckel, 1975, Alles, 2011).	13
6	Mapa geológico del delta de Río Colorado, con sedimentos cuaternarios aluviales y fluviales (color beige) y lacustres y mareales (amarillo) (Gastil <i>et.al.</i> , 1975).	15
7	Esquema de la desembocadura de un río en costa dominada por acción de mareas. (e.g. del Río Colorado en el Golfo de California) (modificado de Jaillard, 1993).	16
8	a) Distribución de facies ricas en arena desarrolladas dentro del delta. Con excepción de los abanicos aluviales, la mayoría de los depósitos están relacionados con el Río Colorado y su estuario. b) Asociación de facies del Delta del Río Colorado (modificado de Meckel, 1975).	17

9	Sismicidad histórica en la región de estudio y su vecindad (compilada por Ellsworth, 1990). Se indica el año y magnitud de los eventos.	18
10	Sismicidad desde 1979 hasta el 3 de abril de 2010 indicada en círculos verdes (Datos registrados por RESNOM).	19
11	Sismicidad desde el 4 de abril hasta el 31 de mayo de 2012 indicada en círculos púrpura (Datos registrados por RESNOM).	21
12	Método pixel tracking en la zona de estudio (Fielding, 2011, comunicación escrita).	22
13	Comportamiento de las ondas en: a) sísmica de refracción, se observa el viaje de las ondas por el subsuelo y el retorno. b) sísmica de reflexión, se aprecia el viaje de las ondas con un punto común donde se reflejan las ondas hacia la superficie.	24
14	Esquema general de adquisición de datos de sísmica de reflexión.	26
15	Esquema de la secuencia básica de procesamiento de las acciones a realizar en cada una de las etapas (Yilmaz, 2001).	28
16	Plano elaborado y proporcionado por PEMEX con datos de ubicación de las líneas sísmicas en la región del Delta del Río Colorado.	29
17	Datos del observador. Hoja donde se anotan los números de tiro, de canales, profundidad del pozo, uphole, ffid, así como características del ambiente o la zona donde se toman los datos.	30
18	Gathers con geometría cargada correctamente, se observa la banderita en el centro indicando que fue tiro central.	31
19	Gathers donde se muestran los datos originales en el antes (izq) y el después de filtrarlos con el top mute (der).	32

20	Imagen donde se delimita la zona de amplitudes que indican la presencia del round roll.	33
21	Esquema indicando a grandes rasgos aliasing. En línea punteada señal original, con flechas el muestreo y en rojo la señal resultante.	34
22	Filtrado FK, se indica en el recuadro negro la zona con la señal que se dejará pasar, lo que se encuentra fuera del recuadro se atenuará.	35
23	Esquema donde se muestra el proceso ideal de deconvolución, donde el resultado indica los contactos geológicos debido a los cambios de reflexión de la señal.	36
24	En la imagen se muestra del lado izquierdo las trazas con la misma información de un punto en profundidad, a la derecha como se va registrando debido a la distancia.	37
25	Diferentes paneles que despliega ProMAX para el análisis de velocidad.	38
26	Imagen del editado de velocidades.	39
27	Apilado por CDP de una de las líneas de este trabajo. Primer imagen coherente del subsuelo. Trazas corregidas por NMO.	40
28	Punto de reflexión: a) con reflector horizontal, b) con reflector inclinado.	43
29	Se muestra un nudo de corbata debido a las difracciones de la onda. Imagen sin migrar.	44
30	Perfil A-B interpretado de la línea 5064.	48
31	Acercamiento del perfil A-B de la línea 5064.	49
32	Perfil A-B interpretado de la línea 5060.	51
33	Perfil A-B interpretado de la línea 5056.	53
34	Perfil A-B interpretado de la línea 4987.	56

35	a) Perfil 4989_1. Con línea gruesa en amarillo se indica el basamento acústico, en verde algunos rasgos con mayor contraste de impedancia acústica, en rojo las fallas menores y en color morado la falla Yurimuri (FY). b) De SW a NE se encuentran las fallas mayores: Mesa (FM) y Cerro Prieto (CP) (Fonseca-López, 1982; Chanes-Martínez, 2012).	58
36	Mapa de anomalía de Bouger en la región del delta del Río Colorado y Altar elaborado con una malla de datos de anomalía de Bouger proporcionados por PEMEX.	59
37	Perfiles gravimétricos de las secciones longitudinales NW-SE, 5064, 5060 y 5056. Datos proporcionados por PEMEX.	60
38	Perfiles gravimétricos de las secciones longitudinales NE-SW, 4987, 4989-1 y 4989-2. Datos proporcionados por PEMEX.	62
39	Columna litológica del pozo W3, indicando las profundidades a las que se encuentra el basamento granítico así como las tres unidades sedimentarias del Terciario (Pacheco <i>et al.</i> , 2006). Pozo perforado por PEMEX.	64
40	Configuración del basamento acústico en las secciones sísmicas donde estaba presente.	65
41	Interpretación de las fallas observadas en el área de estudio incluyendo lo reportado por Chanes- Martínez (2012).	70
42	Interpretación de las fallas en planta observadas en el área de estudio.	71
43	Configuración del basamento acústico utilizando las secciones interpretadas por Chanes-Martínez (2012) y las líneas procesadas en esta tesis.	72
44	Esquema en donde se representa el modelo tectónico en el área de estudio, en forma de flor negativa, mostrando el escalonamiento hacia el este, tal como sucede en el área de estudio, donde limitan al oriente con la falla de rumbo dextral Cerro Prieto (modificado de Woodcock and Fischer, 1986).	74

45	Interpretación del basamento acústico en las secciones sísmicas y la ubicación de los hipocentros generados después del sismo del 4 de abril de 2010 de M=7.2, indicando en diferentes capas cada kilómetro de profundidad.	76
46	Esquema de formación de zona de distensión con fallas normales entre dos fallas principales de desplazamiento lateral derecho (modificado de Woodcock and Fischer, 1986).	77

Lista de Tablas

Tabla		Página
1	Parámetros de adquisición de datos utilizados por PEMEX en el prospecto <i>Delta Río Colorado</i> .	27

Capítulo 1. Introducción.

1.1. Introducción.

El delta moderno del Río Colorado se encuentra en el límite de las placas Pacífico - Norteamérica (Elders *et al.*, 1972; Lonsdale, 1989) y se extiende al norte por la Depresión de Salton y al sur hacia la cuenca Wagner. Su límite al este es el desierto de Altar y al oeste las sierras Cucapah y El Mayor. Su evolución se determina básicamente por la interacción de dos procesos sedimentológicos importantes: el aporte de sedimentos del Río Colorado que se estima han sido del orden de $160 \times 10^6 \text{ ton/año}^{-1}$ (Van Andel, 1964) y ciclos de mareas diurnas y semidiurnas con amplias variaciones en el nivel del mar que van de 6.95 m en San Felipe (Gutiérrez-González, 1989) hasta cerca de 10 m en el delta del río Colorado (Filloux, 1973; Matthews, 1969; Thompson *et al.*, 1969). La interacción de estos procesos tanto constructivos como destructivos a lo largo del tiempo geológico ha dado como resultado un delta con predominancia de mareas (Carriquiry y Sánchez, 1999). Debido a la construcción de presas y políticas de control en la cuenca hidrológica del Río Colorado, las descargas de agua y el aporte de sedimentos en la región del delta han disminuido considerablemente (Carbajal *et al.*, 1997). Los sedimentos marginales de la cuenca incluyen abanicos aluviales y regiones arenosas como el complejo de Dunas Algodones. El ápice del delta y la fuente del sedimento es por el oriente (Yuma, Arizona) y los registros estratigráficos en pozos de Pemex y en bloques levantados en los márgenes se remontan al Plioceno (Pacheco *et al.*, 2006; Dorsey *et al.*, 2007; Helenes *et al.*, 2009;).

El delta se encuentra dentro de la Provincia Extensional del Golfo (Gastil *et al.*, 1975), la cual abarca el extremo oriental de la península de Baja California y hasta el pie de la Sierra Madre Occidental (Stock and Hodges, 1989). Esta región

contiene el *rift* oblicuo con centros de dispersión conectados por largas fallas transformantes (Lomnitz *et al.*, 1970; Lonsdale, 1989). La región del Golfo de California también contiene cuencas marginales que fueron segmentadas y abandonadas durante la evolución del sistema de fallas de San Andrés–Golfo de California en el Plioceno (Aragón-Arreola, Martín-Barajas, 2007).

Al oeste las cuencas activas están controladas por fallas, resultando en áreas con gran actividad sísmica (Frez y Frías-Camacho, 1998). El delta del Río Colorado es atravesado también por fallas, las más conocidas por su actividad sísmica son las fallas Imperial, Cerro Prieto y Laguna Salada, en las cuales se han presentado temblores mayores a 7.0 grados en la escala de Richter (Burnett, 1993) (ver figura 9).

El sismo del 4 de abril de 2010 mostró la ruptura de una falla desconocida que fue definida como Falla Indiviso por González-García (2010). La región epicentral de este sismo en la zona del delta se encuentra a ~3 m sobre el nivel medio del mar y los sedimentos geológicamente jóvenes, junto con un nivel freático superficial produjeron procesos de licuefacción y movimientos fuertes del terreno durante el sismo de abril de 2010 (Nelson *et al.*, 2010; Wei *et al.*, 2011).

En los años sesenta el papel económico de los deltas se incrementó de manera notable debido a que incluyen procesos de maduración y entrapamiento de hidrocarburos. Hacia finales de los años 70 y principios de los 80, PEMEX colectó datos de sísmica de reflexión en toda la región del delta del Río Colorado. Un convenio de colaboración entre PEMEX-CICESE permitió el acceso a la base de datos de este prospecto. Este trabajo de tesis se enfoca al procesamiento, análisis e interpretación de datos sísmicos de reflexión propiedad de PEMEX que cubren la región suroeste del delta del Río Colorado, precisamente en la región de ruptura de la Falla Indiviso que conecta la deformación entre la cuenca de Wagner al sur y la cuenca de Cerro Prieto al norte (Figura 3).

Las aportaciones de este trabajo fueron 3. La primera es la configuración del basamento acústico en la zona, la segunda aportación es la ubicación del trazo de la Falla Cerro Prieto, que coincidió con su ubicación previa en la literatura (Fonseca-López, 1982) y además confirma la continuidad hacia el sureste de las fallas Pangas Viejas (FPV), Indiviso-S (FI-S) y Mesa (FM) y la estructura anticlinal rollover interpretadas por Chanes-Martínez (2012).

La tercera aportación es la propuesta de tres fallas, la primera es una falla adicional paralela con dirección NW-SE al oeste de Pangas Viejas y dos fallas con dirección NE-SW, de las cuales una tiene buzamiento al sur y otra con buzamiento al norte. Estas fallas forman parte de la zona de deformación transtensiva en el límite de placas y su identificación es importante para entender la deformación y el peligro sísmico que representan.

Este trabajo de tesis comprende cinco capítulos. El primero presenta una introducción general, indicando los objetivos, el marco geológico y tectónico regional, así como descripción general de la depresión del Salton y el delta del Río Colorado basado en trabajos geológicos, geofísicos y de sismicidad histórica. En esta introducción también se presenta la ubicación de las líneas sísmicas que se trabajaron.

El capítulo dos de metodología hace una introducción a cerca del método sísmico de reflexión y describe la secuencia de procesamiento de datos que se utilizó para mejorar la señal coherente y eliminar o atenuar el ruido, obteniendo las secciones sísmicas que se interpretaron.

En el capítulo tres se muestran los resultados de interpretación de las secciones sísmicas trabajadas en esta tesis. Se interpretó la presencia/ausencia de basamento acústico, fallas y horizontes sismoestratigráficos en cada línea y posteriormente se realizó la correlación de las estructuras entre las diferentes

líneas sísmicas obtenidas en este trabajo y las obtenidas en la tesis de Chanes-Martínez (2012), así como la configuración del basamento acústico.

Además se incluyeron perfiles gravimétricos realizados por PEMEX, con la finalidad de apoyar la interpretación del basamento acústico y de los rasgos estructurales mayores.

En el capítulo cuatro se presenta la discusión sobre la estructura de la zona de deformación del límite de placas y se establecen las conclusiones de esta tesis en el capítulo cinco.

1.2 objetivos.

El objetivo de este trabajo fue procesar, interpretar e integrar los datos sísmicos de reflexión de la región suroeste del delta del Río Colorado, con la finalidad de establecer la estructura del basamento acústico, las fallas y secuencias sismoestratigráficas principales. Se buscó ampliar el conocimiento tectónico en ese sector del delta cubierto por sedimentos recientes del Río Colorado, cuya baja actividad sísmica histórica sugiere que esta zona de falla puede representar riesgo sísmico importante.

1.3 Área de estudio.

El trabajo consistió en procesar e interpretar 5 líneas sísmicas con una longitud total de ~230 km ubicadas en los límites de Baja California – Sonora (Figura 1) que abarca el sur del delta del Río Colorado. Las líneas con dirección NE-SW son la línea L_4987 (41 km de longitud) y la línea L_4989 que comprende dos segmentos (16 km y 20 km, respectivamente). Las líneas con una orientación NW-SE son: L_5056 (45 km), L_5060 (52 km) y L_5064 (54 km).

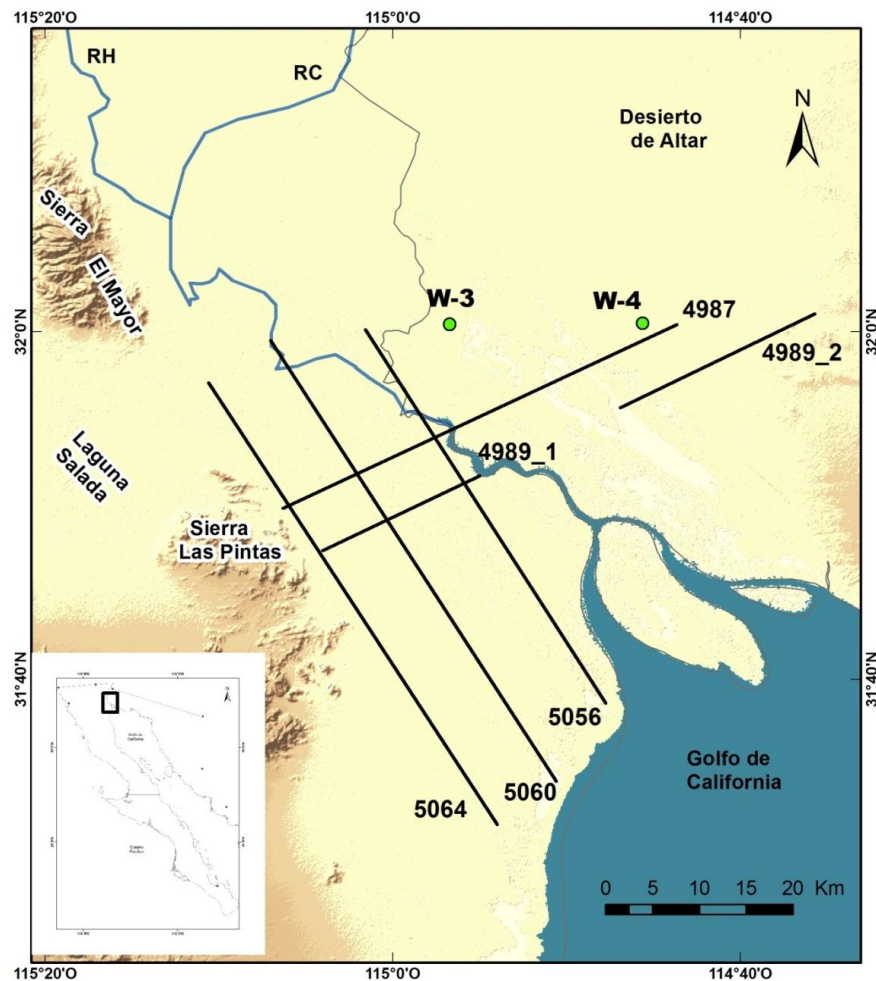


Figura 1. Localización de la zona de estudio en la región suroeste del delta del Río Colorado, indicando los perfiles sísmicos procesados e interpretados en este trabajo (líneas en negro). En color azul se ubica el cauce actual del Río Colorado (RC) y Río Hardy (RH). Los círculos verdes indican la ubicación de los pozos W-3 y W-4 perforados por PEMEX (Pacheco *et al.*, 2006; Helenes *et al.*, 2009).

1.4 Marco geológico y tectónico regional.

El margen oeste de Norteamérica tiene una historia tectónica compleja debido la acreción de terrenos exóticos, seguido de un periodo prolongado de subducción que culminó hacia los 16 a 12 Ma y dio paso, a la formación de un *rift* continental y su transición a *rift* oceánico durante el Plioceno (Martín-Barajas, 2000).

La Provincia Extensional del Golfo (PEG) es una zona de fallamiento principalmente normal del Mioceno al Reciente que muestra una fisiografía de cuencas y sierras (Stock and Hodges, 1989). Comprende la región al oeste de la Sierra Madre Occidental hasta el escarpe principal del Golfo en la península de Baja California (Martín-Barajas, 2000) (Figura 2). Su evolución geológica es compleja debido a que registra un cambio en el régimen tectónico (Neógeno) de subducción a distensión cortical y formación de piso oceánico en algunas cuencas del Golfo en los últimos 3-4 Ma. En Sonora, este proceso de distensión se manifestó después de un pulso de actividad volcánica en la Sierra Madre Occidental (~30 Ma) (Ferrari *et al.*, 1999) originado por el encuentro de la dorsal Pacífico-Farallón con la trinchera de Norteamérica. El volcanismo de arco migró al poniente con lo que se mantuvo una actividad importante (23-12 Ma) a lo largo del margen oriental de la península de Baja California y en la costa de Sonora (Mora-Álvarez, 1993; Hausback, 1984; Sawlan and Smith, 1984).

La PEG registra un periodo de máxima extensión en Sonora en una posición intraarco y trasarco con respecto a la actividad volcánica del arco miocénico en Baja California. El inicio de la distensión en la margen oriental de la península es posterior al inicio en Sonora y concuerda además con la terminación del volcanismo de arco y la subducción de la Placa Guadalupe hacia los 12 Ma (Stock and Lee, 1994; Lee *et al.*, 1996). Ocasiona además la migración hacia el sur de la junta triple (dorsal-trinchera-falla transformante) (Atwater, 1989; Stock and Lee, 1994) y una zona de fractura (San Benito-Tosco-Abreojos) que funcionó como una falla transformante a lo largo de la margen occidental de la península, constituyendo el límite de placas entre 12 y 5 Ma. (Spencer and Normak, 1989; Lonsdale, 1989). En este cambio de límite de placas se lleva a cabo la transferencia progresiva de la península de Baja California a la placa Pacífico.

Durante el período entre 12 y 4 Ma., la península mantuvo un movimiento relativo independiente funcionando como una microplaca; la transferencia de la península a la Placa Pacífico se completa hacia los 4 Ma. (Lonsdale, 1989; Stock and Hodges, 1989), aunque actividad sísmica histórica y mediciones geodésicas (Dixon *et al.*, 2000) sugieren que el margen Pacífico de la península aún acomoda deformación por cizalla lateral.

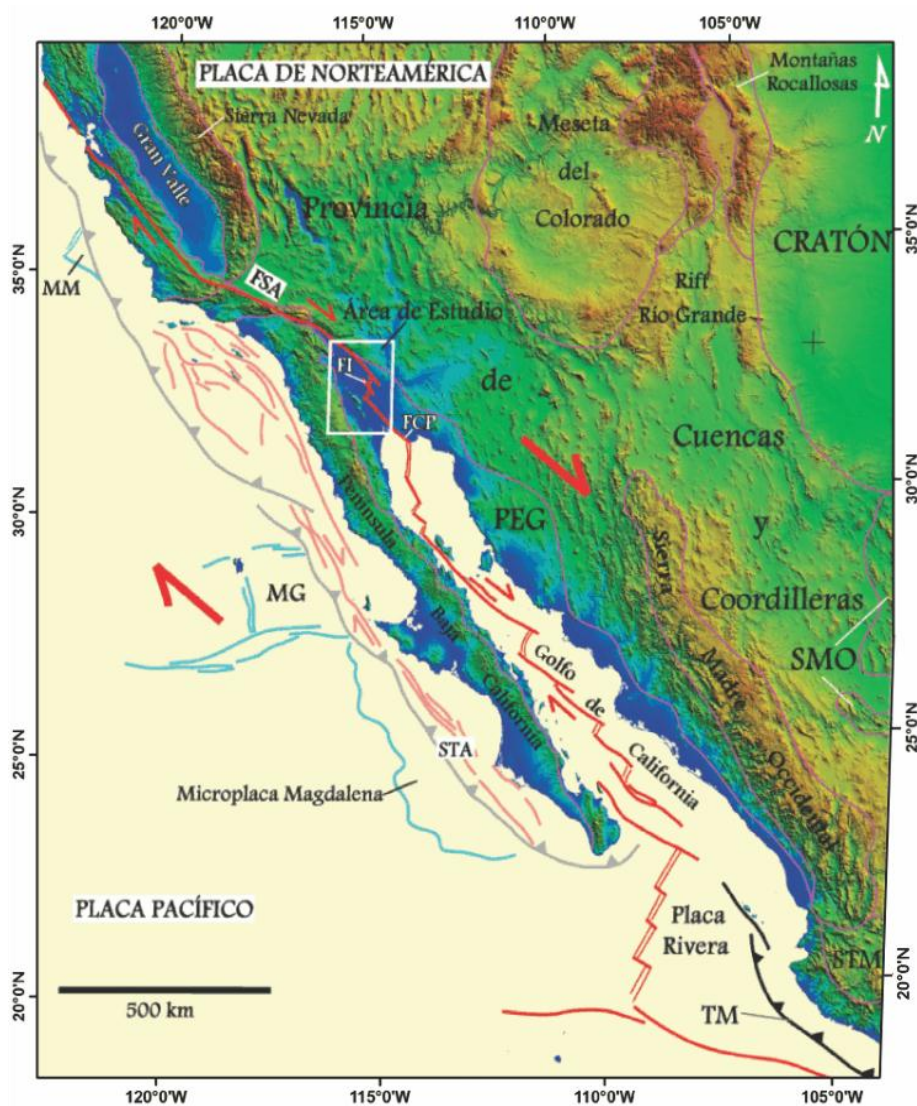


Figura 2. Marco tectónico de la región del Golfo de California y la Península de Baja California. Los elementos tectónicos que actualmente definen la frontera de placas Pacífico-Norteamérica aparecen en negro (Trinchera Mesoamericana –TM) y rojo intenso (Placa Rivera, sistema de fallas transformes y dorsales oceánicas que se extienden a lo largo del

Golfo de California y, en continente, la Falla de San Andrés –FSA). Las estructuras que aparecen en colores tenues al oeste de la Península de Baja California, son rasgos tectónicos inactivos (e.g., en gris, la paleotrinchera), o con un grado de actividad tectónica menor (por ejemplo, el sistema de fallas laterales en borde continental). También se muestran de manera esquemática las tres microplacas abandonadas: Magdalena, Guadalupe (MG) y Monterrey (MM). Abreviaturas: FI Falla Imperial, FCP Falla Cerro Prieto, STA Sistema Tosco-Abreojos, PEG Provincia Extensional del Golfo, STM Faja Volcánica transmexicana. El recuadro blanco indica el área de estudio (Figura 1).

La Falla de San Andrés y su continuación hacia el Golfo de California (e.g. Falla Imperial, Falla Cerro Prieto) tienen un comportamiento oblicuo dextral y definen el límite principal entre las placas Pacífico y Norteamérica. En los últimos 6 Ma., el movimiento relativo de las placas se ha concentrado a lo largo del Golfo de California y la Depresión del Salton (Oskin *et al.*, 2001; Oskin and Stock, 2003) y estas fallas acomodan la cizalla lateral, mientras que fallas oblicuas en los escalones que forman acomodan la mayor parte de la extensión en la zona del *rift*. Estos escalones y las zonas de extensión que producen forman una serie de centros de dispersión incipientes con profundos rellenos sedimentarios marinos en el Golfo de California (González-Escobar *et al.*, 2006; 2010) y cuencas con rellenos sedimentarios marinos y no marinos hacia la Depresión del Salton (Fuis and Kohler, 1984; Lonsdale, 1989; Lizarralde *et al.*, 2007).

En el delta del Río Colorado las fallas activas dominantes son la Falla Imperial, la Falla Cerro Prieto (FCP) y la Falla Indiviso (Figura 3). La Falla Cerro Prieto y la Falla Imperial son las fallas activas reportadas que acomodan la cizalla lateral a través del delta del Río Colorado (Lomnitz *et al.*, 1972; Frez y González-García, 1991). Recientemente se presentó la Falla Indiviso que es paralela a la Falla Cerro Prieto, pero se ubica a ~10 km al oeste (Gonzalez-Garcia, 2010; Hauksson *et al.*, 2010).

1.4.1 Falla Imperial.

La Falla Imperial delimita el lado oriental del centro de dispersión Cerro Prieto y junto con la Falla Cerro Prieto, es la principal conexión entre el sistema San Andrés y las estructuras del Golfo de California. Sin tener una buena expresión geomorfológica, la Falla Imperial se extiende a lo largo de ~75 km, desde 3 km al sur de la ciudad de Brawley, California, hasta el centro de dispersión Cerro Prieto con una orientación de N42°W (Cruz-Castillo, 2002). Su velocidad de desplazamiento se ha estimado en 47 mm/año. A esta falla se le asocian los temblores de El Centro, de 1940, de M=7.1 y el del Valle Imperial, de 1979, de M=6.5. (Frez y González-García, 1991; Frez y Frías-Camacho, 1998; Suárez-Vidal *et al.*, 1991; Suárez, 1999).

1.4.2 Falla Cerro Prieto.

Es una falla dextral que se extiende a lo largo de aproximadamente 115 km desde el centro de dispersión Cerro Prieto en el Valle de Mexicali hasta la Cuenca Wagner. Únicamente el sector sur de la Falla Cerro Prieto se ha identificado en líneas sísmicas (González-Escobar *et al.*, 2009), mientras que el segmento norte ha sido determinada por mecanismos focales y métodos geofísicos. Se infiere que se la FCP se extiende 20 km al norte de la línea internacional (Gastil *et al.*, 1975), con un desplazamiento promedio es de 46 mm/año (González-García *et al.*, 2003).

1.4.3 Falla Indiviso.

Es una falla nueva definida por González- García, (2010) que acomodó el deslizamiento del evento del 4 de abril de 2010 (M=7.2). Se encuentra paralela ~10 km al oeste de la Falla Cerro Prieto, pero se desconoce su longitud total.

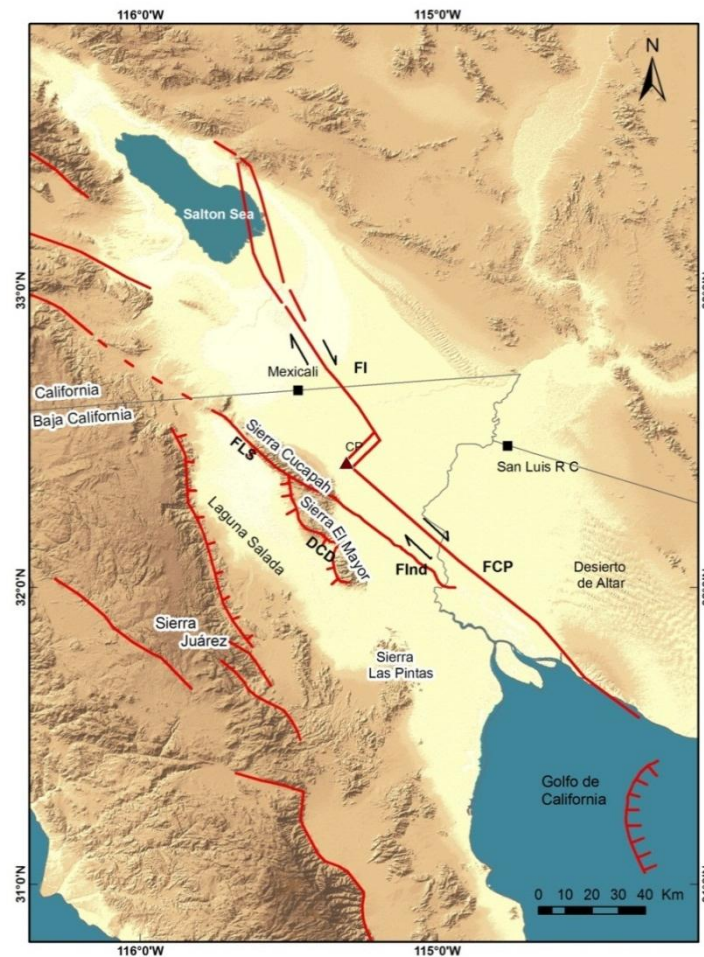


Figura 3. Fallas mayores en la depresión de Salton, y el delta del Río Colorado (Pacheco, et. al, 2006, Suárez-Vidal, et. al 2008). Se observa el límite occidente de la cuenca Wagner (González-Escobar et al., 2010). FI= Falla Imperial, FInd= Falla Indiviso, FCP= Falla Cerro Prieto.

En el trabajo realizado por Chanes-Martínez (2012) se reportó la presencia de otras fallas: Palmas, Mesa, Indiviso-S, Pangas Viejas, Dunas y Saldaña de las que no se tenía conocimiento debido a que se encuentran sepultadas y hasta antes del sismo del 4 de abril de 2010 no se tenía actividad sísmica. (Figura 4).

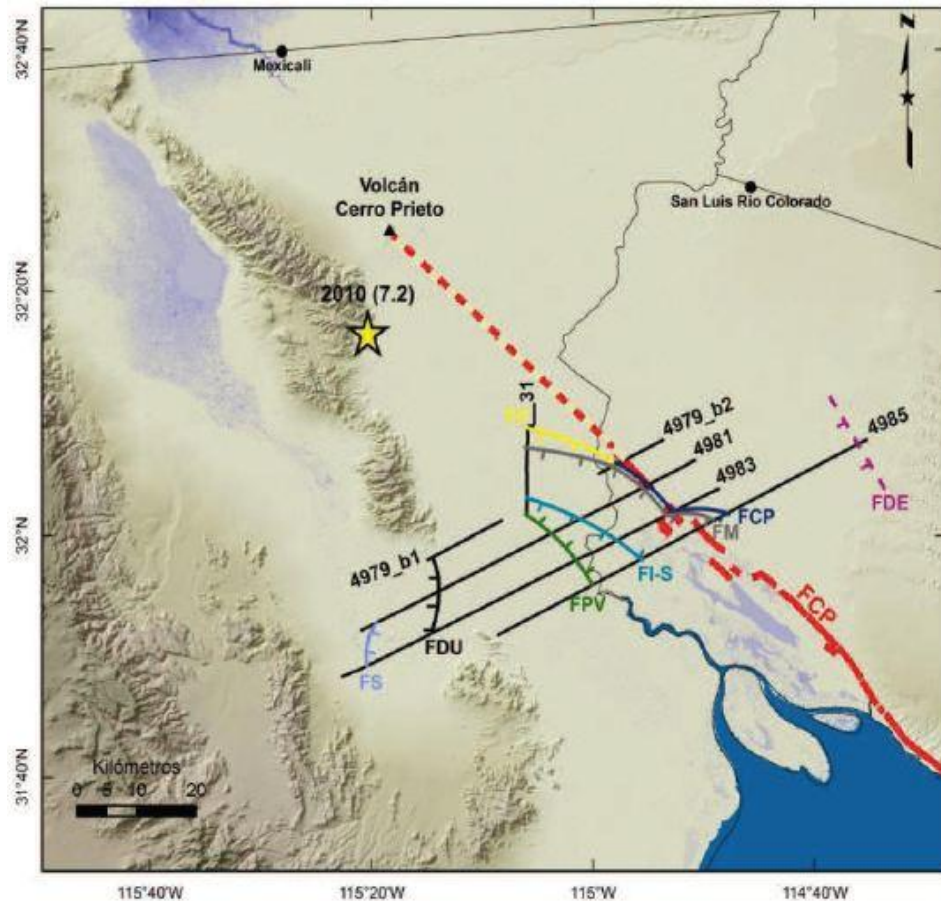


Figura 4. Ubicación de las fallas propuestas por Chanes-Martínez (2012): Falla Saldaña (FS), Falla Dunas (FDU), Falla Pangas Viejas (FPV), Falla Indiviso (FI-S), Falla Mesa (FM), Falla Desierto (FDE), así como el trazo de la Falla Cerro Prieto (FCP) reportada anteriormente (Fonseca-López, H., 1982). En negro se indican los perfiles trabajados en Chanes-Martínez, (2012).

1.5 Depresión de Salton.

Estructuralmente es parte del sistema del Golfo de California, pero ha sido aislada de la incursiones marinas en el Pleistoceno medio cuando progradó el delta del Río Colorado a través de toda la cuenca (Elders *et al.*, 1972; Meckel, 1975). El Mar de Salton es el último eslabón de la cadena de centros de

dispersión conectados por fallas transformantes, que se extienden desde la boca del Golfo de California hasta su conexión con la Falla de San Andrés (Lonsdale, 1989).

En el margen oeste de la depresión de Salton se han reportado la coexistencia de fallas de bajo ángulo y fallas laterales; la falla detachment West Salton con desplazamiento oblicuo, dextral-normal y el detachment de Cañada David y su conexión con la Falla Laguna Salada son los dos ejemplos más conocidos (Axen and Fletcher, 1998; Kairouz, 2005; Shirvell, 2006; Steely, 2006).

Meckel (1975) hace referencia a la división de la depresión de Salton y el delta del Río Colorado (Figura 5) y considera una línea recta desde Yuma hasta el volcán de Cerro Prieto; al norte la Depresión del Salton, y al sur el delta moderno del Río Colorado rellenando la cuenca Cerro Prieto. La Depresión de Salton tiene forma triangular con una longitud de 200 km de norte a sur y 130 km de ancho. El centro de la depresión está actualmente ocupado por el Mar del Salton, un lago salino que tiene 16 km de ancho, 56 km de largo y se encuentra 72 m por debajo del nivel del mar (Meckel, 1975).

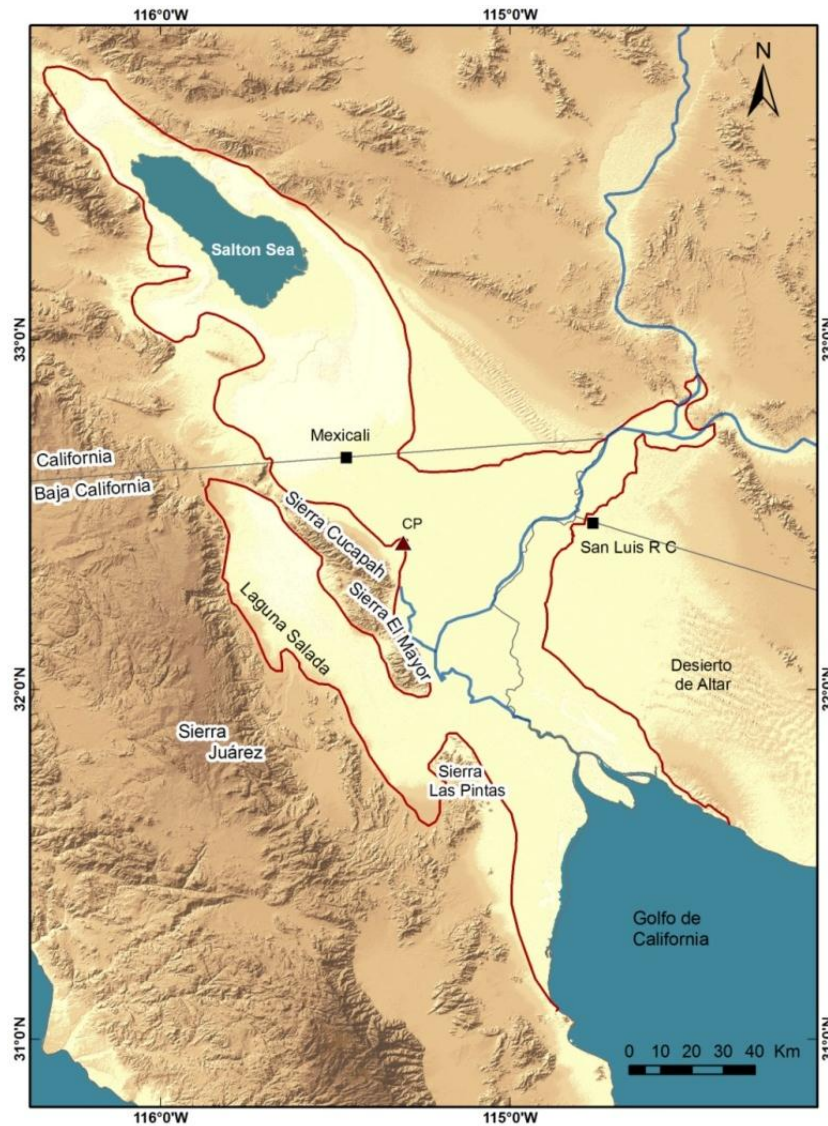


Figura 5. Línea roja delimita la zona del delta del Río Colorado y la Depresión del Salton al norte (modificado Meckel, 1975; Alles, 2011). En azul el Río Colorado. CP= volcán Cerro Prieto.

1.6 Delta del Río Colorado

El Río Colorado tiene un área de captación de 630,000 km² y ha erosionado un gran volumen de roca de la meseta del Colorado descargándolo en las cuencas transtensionales del norte del Golfo de California en los últimos 5-6

Ma. (Spencer *et al.*, 2001, Pederson *et al.*, 2002, Dorsey *et al.*, 2007). Los sedimentos depositados por el río hace más de 5 Ma han sido trasladados en dirección al noroeste a lo largo de las fallas del sistema de San Andrés (Winker, Kidwell, 1986) cubriendo gran parte de la Depresión de Salton.

El ápice del delta se encuentra en Algodones, B.C. y Yuma, Arizona, por donde el río entra a la Depresión de Salton.

Al oeste de la depresión las sierras peninsulares Sierra Juárez y San Pedro Mártir forman parte de un complejo plutónico del Cretácico medio compuestos principalmente por gabro, tonalitas y granodiorita, que intrusionaron rocas metasedimentarias y metavolcánicas. La Sierra El Mayor corresponde a una granodiorita del Cretácico Tardío (Axen *et al.*, 2000). Las Sierras Cucapah y San Felipe son plutones mesozoicos y Sierra Las Pintas está compuesta predominantemente de rocas volcánicas del Mioceno que cubren a rocas metasedimentarias paleozoicas (Gastil *et al.*, 1975) (Figura 6). Al sur se ubica la cuenca Wagner. Pozos de PEMEX en la región del delta y el norte del Golfo de California muestran secuencias sedimentarias que se depositaron inicialmente durante las incursiones marinas en el Golfo de California del Mioceno tardío. En el Plioceno la sedimentación estuvo controlada por el influjo del Río Colorado (Pacheco *et al.*, 2006; Dorsey *et al.*, 2007; Helenes *et al.*, 2009).

El delta del Río Colorado es un delta con predominancia de procesos de mareas que lo modifican, este tipo de deltas presentan las siguientes particularidades:

- a) La morfología se caracteriza por canales distributarios de tipo estuarino, con desembocadura ensanchada (las desembocaduras fluviales son estrechas), bordeados por llanuras de supramarea arcillosas y canales meandriformes aguas arriba.

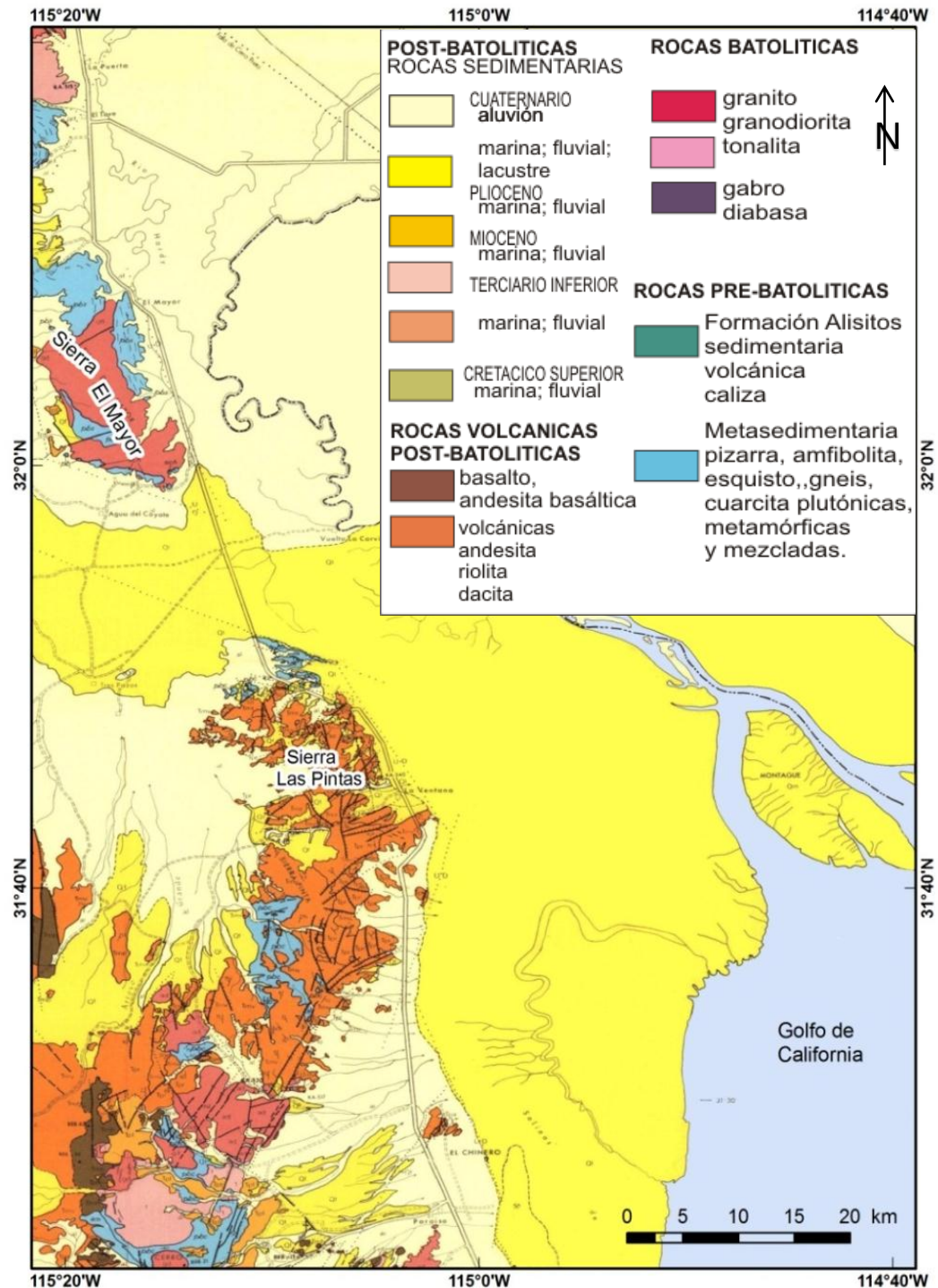


Figura 6. Mapa geológico del delta de Río Colorado, con sedimentos cuaternarios aluviales y fluviales (color beige) y lacustres y mareales (amarillo) (Gastil *et al.*, 1975).

- b) Sus canales distributarios generalmente carecen de levées (diques). En el canal se acumulan arenas, a menudo bajo la forma de barras de meandros.
- c) Las zonas intercanales de la llanura deltaica están constituidas por llanuras limosas mareales y pantanos fluviales. En las zonas con clima semiárido es común la presencia de evaporitas en la planicie supramareal.
- d) En la desembocadura la arena es depositada en forma de barras de marea, cuya forma depende de la dirección de las corrientes de flujo y reflujo; pueden ser alargadas y/o lobuladas (Figura 7). Las barras de arena progradan sobre lodos marinos del prodelta, formando secuencias granocrecientes (Coleman, 1982; Elliot, 1986; Allen, 1989; Chamley, 1989).

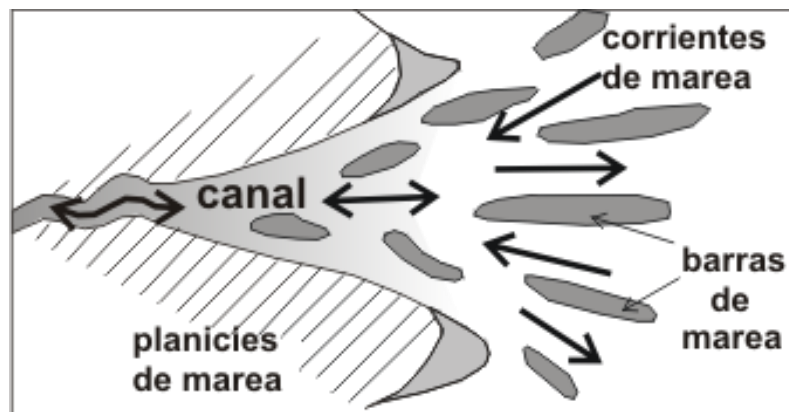


Figura 7. Esquema de la desembocadura de un río en costa dominada por acción de mareas. (e.g. del Río Colorado en el Golfo de California) (modificado de Jaillard, 1993).

El modelo de un delta dominado por mareas permite identificar las facies que podemos encontrar y la asociación de diferentes facies nos permite reconocer un ambiente sedimentario (Figura 8).

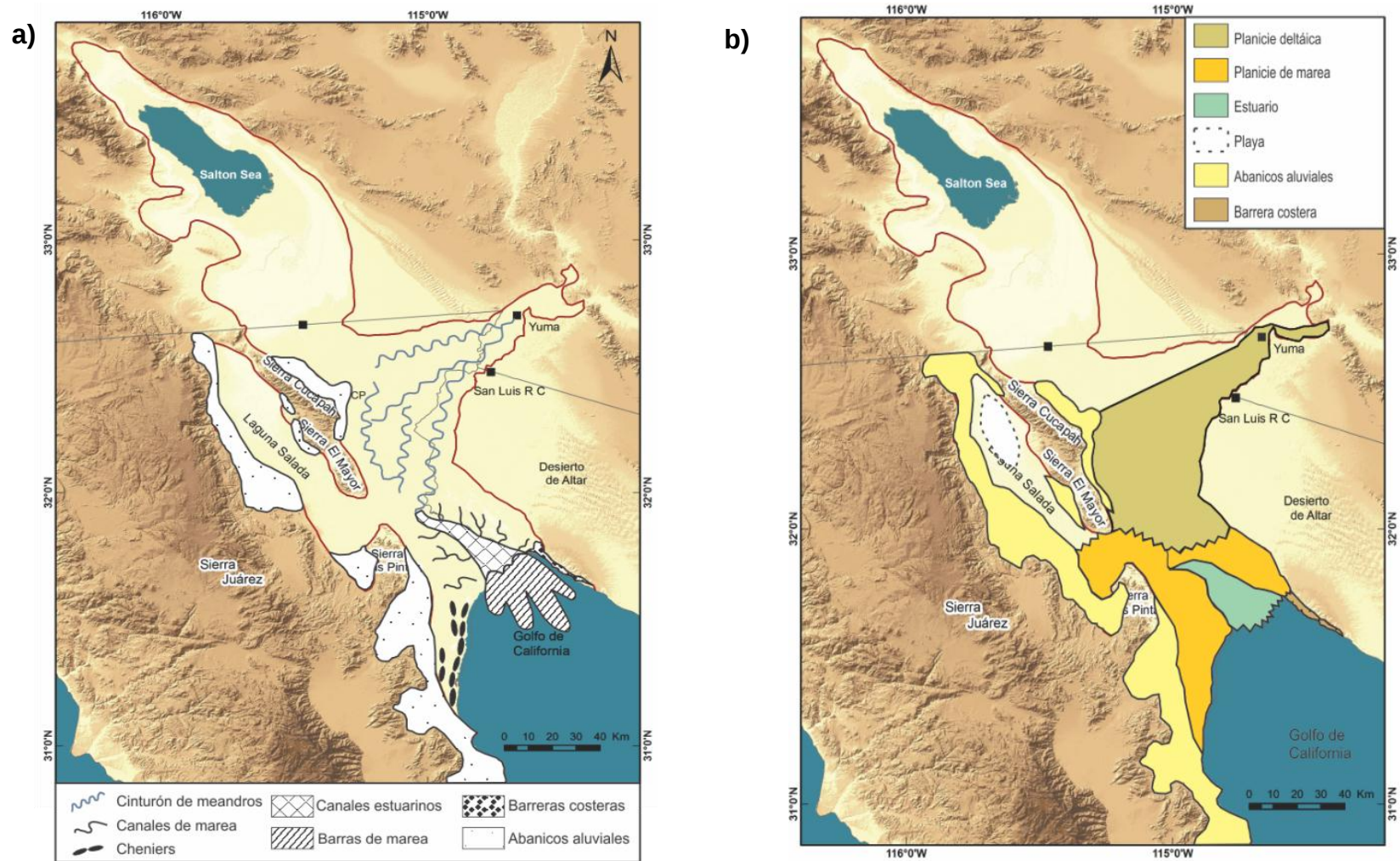


Figura 8. a) Distribución de facies ricas en arena en el delta del Río Colorado. Con excepción de los abanicos aluviales, la mayoría de los depósitos están relacionados con el Río Colorado y su estuario. b) Asociación de facies del Delta del Río Colorado (modificado de Meckel, 1975).

1.7 Sismicidad histórica.

Con el temblor del 4 de abril de 2010, M 7.2 en la Sierra El Mayor-Cucapah, se inició una ruptura con dirección NW-SE, con desplazamiento normal dextral, que se extendió desde la zona del epicentro al sur de la Sierra Cucapah hacia el noroeste a lo largo de las Fallas Pescadores y Borrego que atraviezan longitudinalmente la Sierra Cucapah (Figura 9) (Brandenberg, *et al.*, 2010). Hacia el sureste estas fallas están sepultadas, pero la sismicidad histórica muestra que continúan cortando de manera oblicua el Valle de Mexicali y el delta del Río Colorado (King, 2010; NEIC, 2010; Wei, *et al.*, 2011).

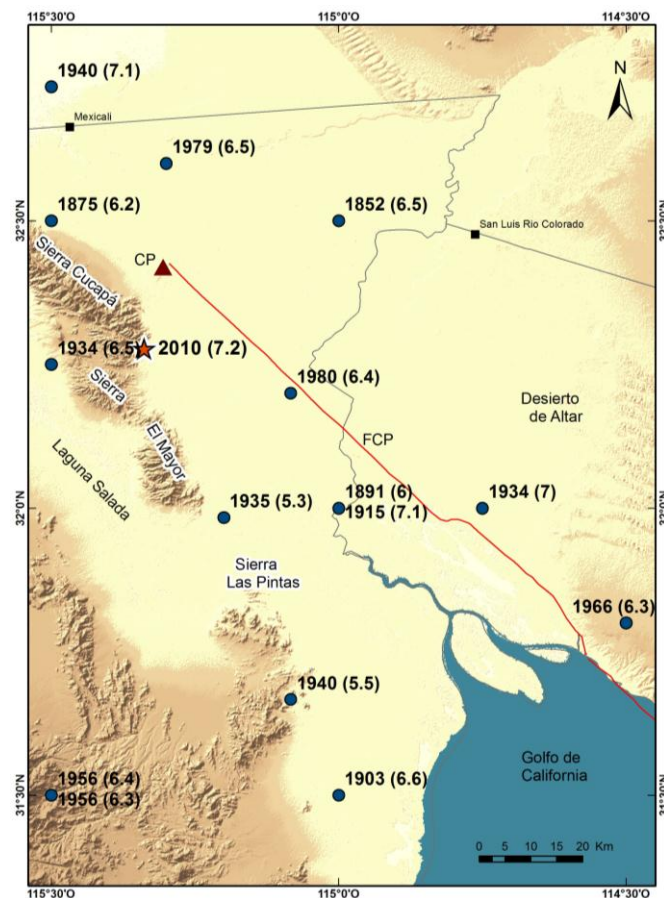


Figura 9. Sismicidad histórica en la región de estudio y su vecindad (compilada por Ellsworth, 1990). Se indica el año y magnitud de los eventos. En rojo la Falla Cerro Prieto (Fonseca-López, 1982). CP=Volcán Cerro Prieto. Estrella roja señala el epicentro del evento del 4 de abril de 2010 (RESNOM). En negro se indican los perfiles sísmicos procesados e interpretados en este trabajo.

La sismicidad en la zona de estudio que cubren las líneas sísmicas es escasa comparada con la sismicidad a lo largo de la Falla Cerro Prieto. Los sismos de mayor magnitud (Figura 9) ocurrieron en 1891 ($M=6$), en 1915 ($M=7.1$) y en 1934 ($M=7$), en dicha figura también se muestra el del 4 de abril de 2010, que se ubica a al oeste de la Falla Cerro Prieto.

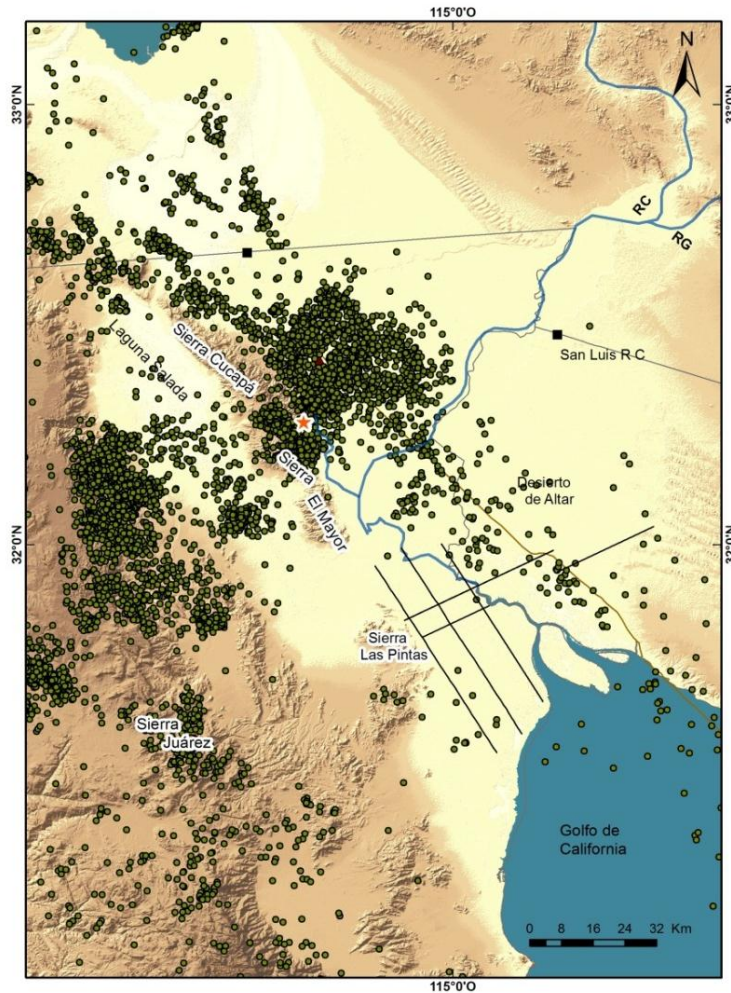


Figura 10. Sismicidad desde 1979 hasta el 3 de abril de 2010 en círculos verdes (Datos registrados por RESNOM). Las líneas sísmicas se muestran en negro en la zona del delta del Río Colorado. La estrella roja se indica el evento del 4 de abril 2010. RC= Río Colorado, RG= Río Gila. Se puede observar la escasa sismicidad en la región de estudio. La línea verde indica trazo de la Falla Cerro Prieto (Fonseca-López, 1982).

La sismicidad desde 1979 hasta el 3 de abril de 2010 (un día antes del evento de 7.2), se muestra en la Figura 10. Esta información fue reportada por la Red Sismológica del Noroeste de México (RESNOM-CICESE), en donde se puede observar la escases de eventos dentro del área de estudio. La mayor cantidad de sismos se registran al oriente de la Sierra Cucapah y poniente de la Falla Cerro Prieto, así como en la Sierra Juárez y el Escarpe Principal del Golfo.

La actividad sísmica que ha ocurrido después del sismo del 4 de abril de 2012 se indica en la Figura 11. Es interesante observar la actividad sísmica (réplicas) al oeste de la Falla Cerro Prieto, las réplicas presentan una orientación epicentral preferencial NW-SE, desde los límites con la línea fronteriza hasta la zona hasta el SE de la Sierra el Mayor, pero los eventos más cercanos al Golfo de California cambian a una dirección con una orientación casi perpendicular NE-SW. Esto puede deberse a la presencia de alguna estructura que se encuentra sepultada por los sedimentos del Delta del Río Colorado y que acomoda la deformación. Actualmente no se tienen conocimiento de una estructura de carácter regional en dicho sector (Figura 11).

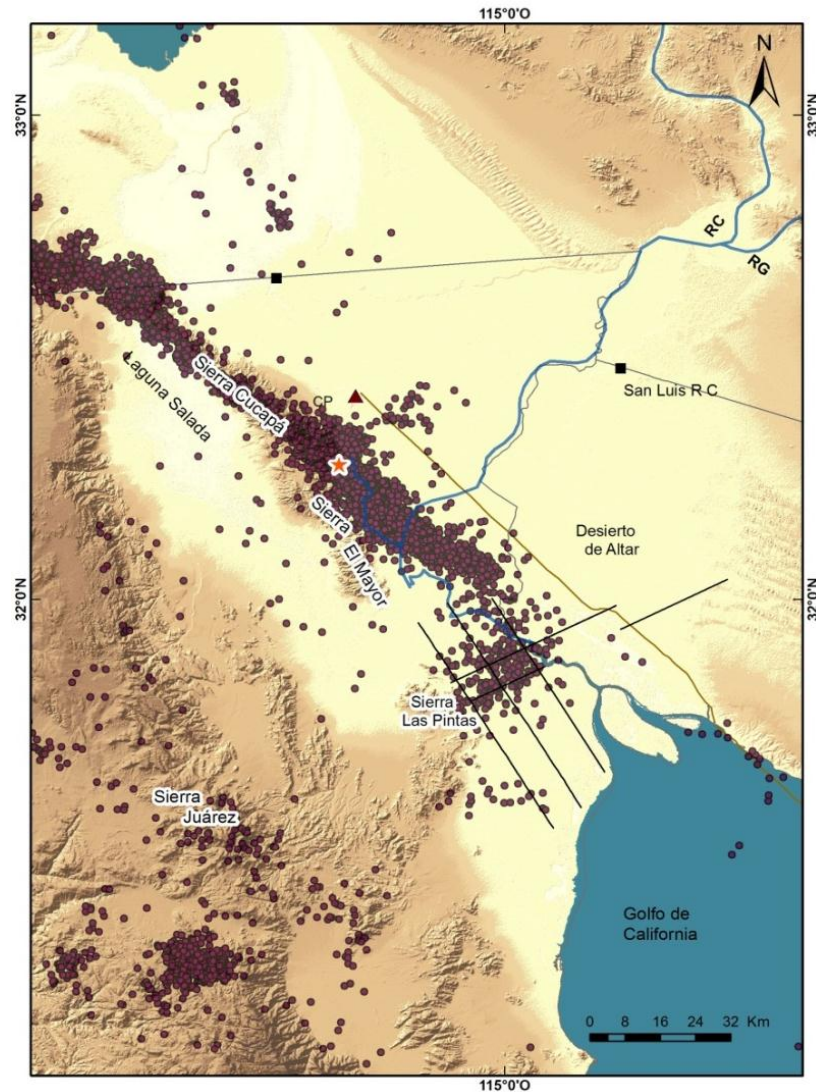


Figura 11. Sismicidad desde el 4 de abril hasta el 31 de mayo de 2012, indicada en círculos púrpura (Datos registrados por RESNOM). Las líneas sísmicas se muestran con negro en la zona del delta del Río Colorado. La estrella roja se indica el evento del 4 de abril 2010. RC=Río Colorado, RG=Río Gila. La línea verde indica trazo de la Falla Cerro Prieto (Fonseca-López, 1982).

Fielding (2011, comunicación escrita), aplicó el análisis interferométrico de imágenes de radar de abertura sintética (InSAR) y el método de pixel tracking para cartografiar la superficie de ruptura y deformación del suelo (Figura 12). Así, identificaron un sistema de fallas mapeadas a través de la Sierra Cucapah hasta

la frontera internacional y una serie de fallas desconocidas que se extienden 60 km al sureste, en el delta del Río Colorado. En la imagen se puede observar la zona de mayor desplazamiento vertical; entre la Sierra Cucapah y la desembocadura del Río Colorado se desvanece la información, esto puede ser debido a que los sedimentos atenuaron los desplazamientos ya que contienen agua y no mantienen la posición que adquirieron después del sismo.

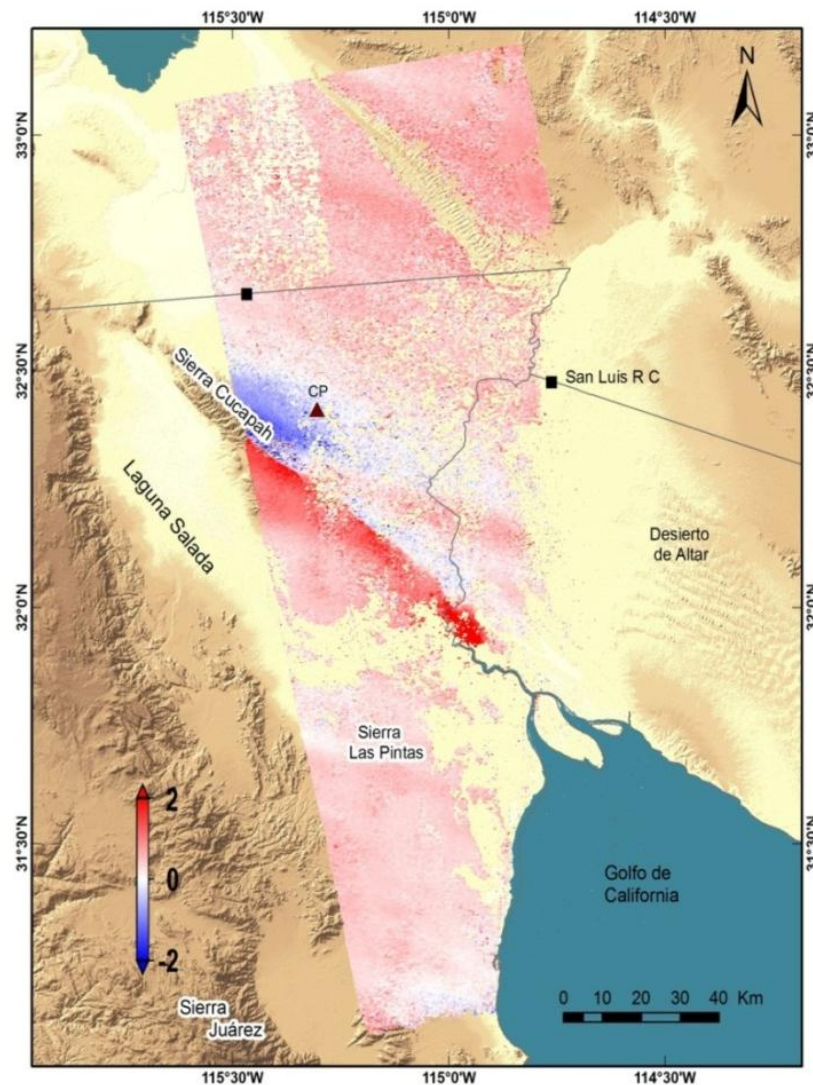


Figura 12. Método pixel tracking en la zona de estudio (Fielding, 2011, comunicación escrita). Indica desplazamientos verticales, en rojo positivos y en azul los negativos. CP=Volcán Cerro Prieto.

Capítulo 2. Metodología

En este capítulo se hace una descripción de la metodología utilizada para procesar las 5 líneas sísmicas cuyos datos fueron obtenidos a partir de sísmica de reflexión 2D multicanal. A continuación se explica brevemente en qué consiste este método geofísico y se describe la secuencia de procesamiento que se siguió.

II.1 Método Sísmico

El método sísmico se basa en la detección del frente de ondas elásticas producidas por una fuente artificial (dinamita, vibroseis, martillo, entre otros). La energía generada se propaga a través del subsuelo a distintas velocidades esto debido principalmente a los cambios en la composición, grado de compactación y densidad de las rocas así como presencia de estructuras geológicas (por ejemplo fallas). Posteriormente tanto las ondas refractadas (sísmica de refracción, Figura 13a) como las reflejadas (sísmica de reflexión, Figura 13b) son captadas y registradas por sensores (geófonos, hidrófonos, etc.), para continuar con su procesamiento por medio de computadoras.

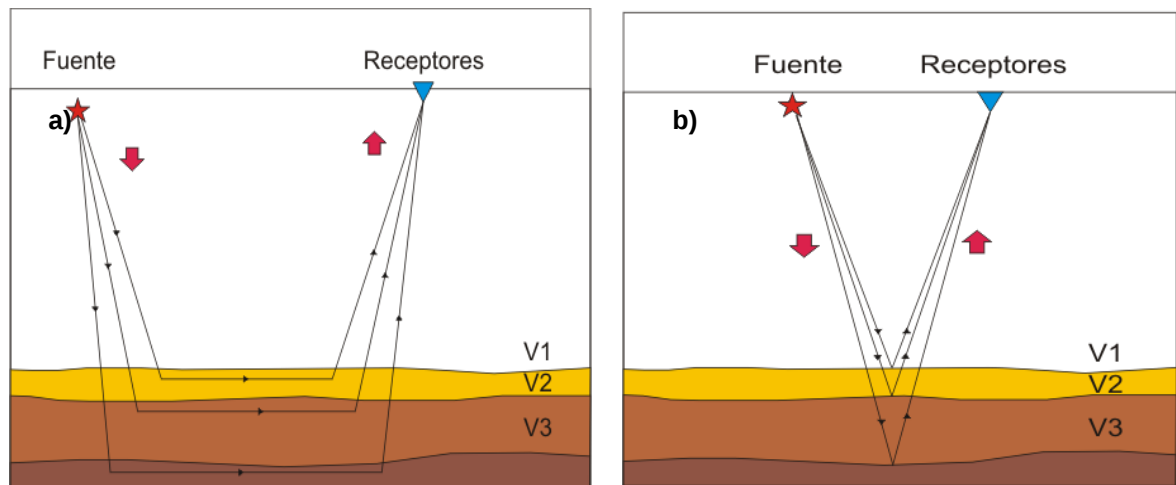


Figura 13. Comportamiento de las ondas en: a) sísmica de refracción, se observa el viaje de las ondas por el subsuelo y el retorno. b) sísmica de reflexión, se aprecia el viaje de las ondas con un punto común donde se reflejan las ondas hacia la superficie.

2.1.1 Sísmica de reflexión.

La sísmica de reflexión tiene como objetivo obtener información de la geometría interna del subsuelo, deducir información (ej. propiedades mecánicas) acerca de las estructuras (rocas) en profundidad, especialmente de las distintas capas que lo constituyen, a partir de los tiempos de llegada de las ondas y extraer una imagen que lo represente. También obtener información de las amplitudes y frecuencias de éstas ondas.

Se basa en las reflexiones del frente de ondas sísmicas sobre las distintas interfaces o reflectores del subsuelo debido a los contrastes de impedancia acústica ($z = \rho \cdot v$, siendo ρ la densidad de las rocas y v la velocidad de propagación de las ondas en las diferentes capas geológicas). Las reflexiones son detectadas por los receptores que se ubican en superficie y que están alineados con la fuente emisora (Figura 14).

Debido a que las distancias entre la fuente y los geófonos son pequeñas respecto a la profundidad de penetración que se alcanza, el dispositivo experimental debe operar en "corto ángulo"; asegurando así la obtención de reflexiones y distinguiéndose de la sísmica de refracción o de "gran ángulo".

Otra diferencia respecto a la sísmica de refracción es el número mayor de disparos y geófonos utilizados en un perfil de longitud equivalente. El resultado es un grupo de trazas sísmicas procedentes de todos los tiros que se analizan, procesan y reordenan en conjuntos de "puntos reflectores comunes" para obtener una sección sísmica de reflexión que es el resultado final de este método. En sección sísmica se muestra una imagen del subsuelo en donde las reflexiones se ven en forma de lóbulos negros de mayor amplitud y definen las capas reflectoras que después se asociarán a las estructuras geológicas.

Durante el procesado se debe conseguir aislar de los registros las reflexiones, eliminando las otras ondas (onda directa, refracciones, ruido, etc.). Esta tarea implica la aplicación de tratamientos multiseñal (filtros, deconvoluciones, etc.) que, si no se realizan cuidadosamente, pueden crear artefactos y confundirse con falsos reflectores. Por otro lado, en las secciones sísmicas de reflexión las capas reflectoras están en modo tiempo doble debido a que cada rayo reflejado ha hecho el viaje de ida (incidencia) y vuelta (rebote). Para facilitar su interpretación se presenta el resultado convertido a una profundidad aproximada.

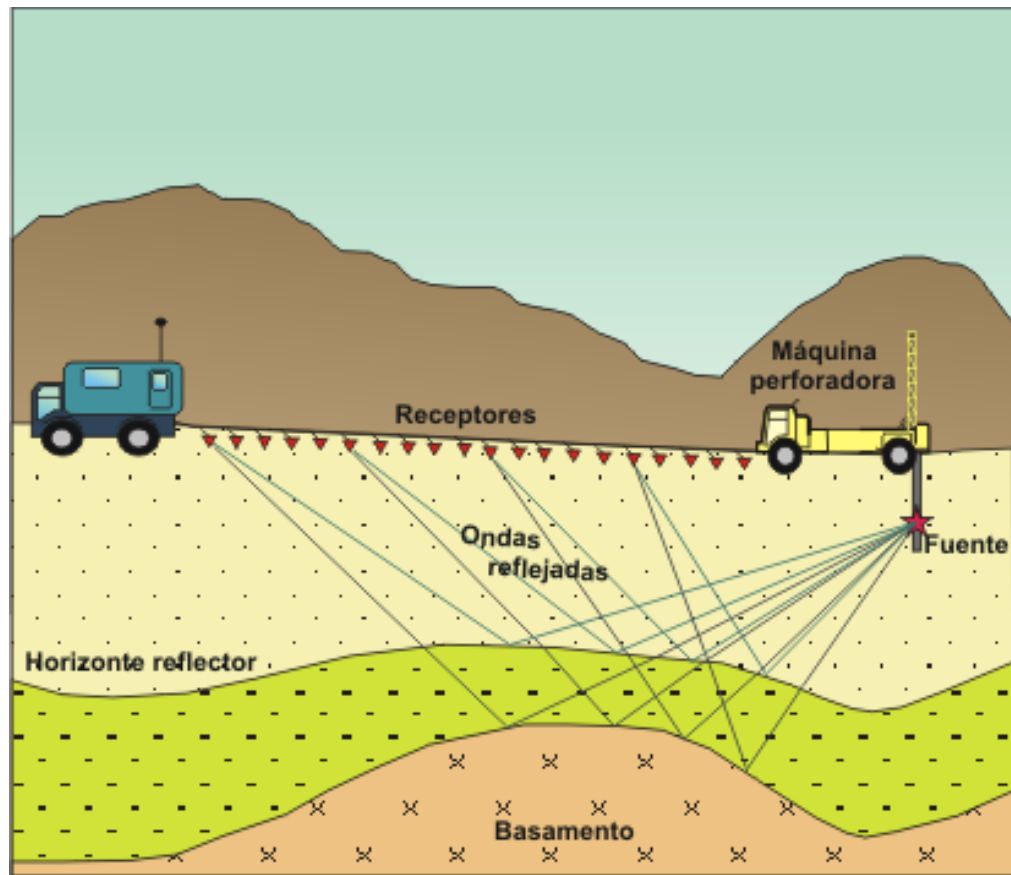


Figura 14. Esquema general de adquisición de datos de sísmica de reflexión. Por medio de dinamita se generaron las ondas sonoras del prospecto Delta del Colorado, se reflejan hacia la superficie al encontrar un cambio de impedancia acústica y son registradas por medio de geófonos.

2.1.2 Adquisición de datos sísmicos.

Los datos sísmicos con los que se ha realizado este trabajo fueron colectados por PEMEX (Petróleos Mexicanos) a finales de los años 70's y principios de los 80's mediante un programa de exploración implementado en el norte del Golfo de California, el Desierto de Sonora y el Sur del Valle de Mexicali (Pérez-Cruz, 1982). Gracias a un convenio de colaboración entre la paraestatal y CICESE se ha tenido acceso ellos, utilizando para esta tesis información del prospecto Delta Río Colorado obtenida por un arreglo de sísmica de reflexión

terrestre 2D multicanal, en donde se utilizó como fuente de energía dinamita en un arreglo de adquisición central, es decir, se despliegan 48 receptores hacia ambos lados de la fuente emisora (24 a la derecha y 24 a la izquierda de la fuente). Los parámetros de adquisición de datos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1. Parámetros de adquisición de datos utilizados por PEMEX en el prospecto *Delta Río Colorado*.

Parámetros	Valores
Prospecto	D. Río Colorado
Dirección	NW-SE
Fuente de energía	Dinamita
No. De canales	48
Tiempo de grabación	6 s.
Intervalo de muestreo	2 ms.
Filtro bajo	12 hz
Filtro altas	128 hz
Detectores por traza	24
Distancia entre estaciones	50m
Distancia entre P.T	100m
Patrón de tiro	1150-300-0-300-1150

Los datos se van registrando en formato secuencial en tiempo por lo que se debe hacer un demultiplexado, el cual consiste en convertirlos en datos secuenciales en trazas observándolos en coordenadas de fuente-receptor. La información de campo se va grabando en diferentes tipos de formatos (SEG-A, SEG-B, entre otros). Los datos utilizados en este trabajo, fueron grabados en formato SEG-Y (Society of exploration Geophysicists, por sus siglas en inglés).

2.2 Secuencia del procesamiento de datos.

El procesamiento de los datos de campo consiste en aplicarles una serie de algoritmos matemáticos para obtener perfiles sísmicos de la mejor calidad posible (libres de ruido), que muestren un modelo (en profundidad) lo más real posible de las condiciones geológicas del subsuelo.

Los datos (en formato SEG-Y) fueron trabajados con el software comercial ProMAXTM de la plataforma Landmark (de la compañía Halliburton), el cual utiliza el sistema operativo UNIX.

Para la secuencia de procesamiento se tomó como base la propuesta por Yilmaz (2001), en la que indica tres etapas (Figura 15):



Figura 15. Esquema de la secuencia básica de procesamiento las acciones a realizar en cada una de las etapas (Yilmaz, 2001).

2.2.1 Pre-apilamiento (Pre-stack).

En esta etapa la deconvolución es la operación más significativa.

2.2.1.1 Geometría.

En este paso se deben definir número de canales, canal mínimo, canal máximo, las coordenadas (X, Y, Z) de fuentes y geófonos, offset (distancia

fuelle-receptor), profundidad del pozo donde se encontraban las fuentes, el uphole (que indica el tiempo que tarda en llegar la onda -generada en el pozo al momento de la detonación- hasta la superficie), entre otros, para posteriormente cargar estos datos en las hojas de cálculo de ProMAX y así poder ubicar espacialmente la información sísmica.

Debido a que han pasado más de tres décadas desde la adquisición de los datos en campo, mucha información se ha perdido. Para obtener las coordenadas de cada geófono y fuente se utilizó como base un plano elaborado por PEMEX con datos de las diferentes campañas de exploración geofísica (incluyendo las sísmicas), el cual se geo-referenció en AutoCAD y a partir de él se digitizaron las líneas sísmicas que se procesaron en este trabajo (Figura 16). Los puntos digitizados se encontraban cada 25 fuentes, por lo que se interpolaron los datos en el software ORIGIN 7.5. Ya obtenidos la latitud y longitud de cada punto de tiro y de los receptores, se trabajaron con un modelo de elevación para poder obtener su altitud, la cual nos sirve al momento de hacer las correcciones por estática. El modelo de elevación utilizado fue el SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*).

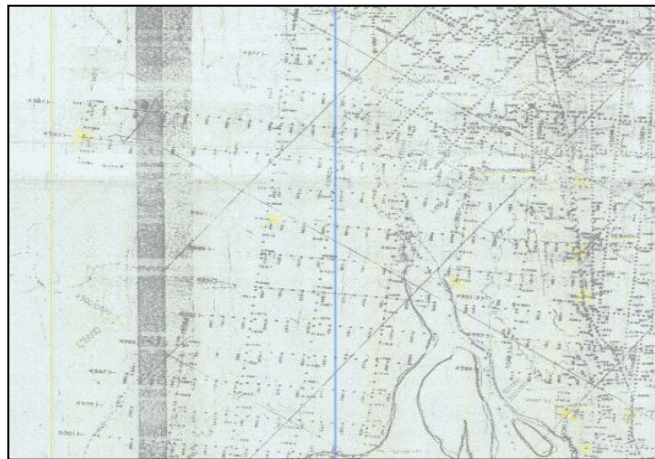


Figura 16. Plano elaborado y proporcionado por PEMEX con datos de ubicación de las líneas sísmicas en la región del Delta del Rio Colorado.

Para los datos de número de fuente y receptores, se tomaron en cuenta los datos del observador (Figura 17) y los datos del archivo .sgy; para mayor facilidad en el manejo de los datos se pasaron al programa Excel en el que se observó la secuencia de los canales y fuentes, ya que esto nos servirá al momento de unir en ProMAX los segmentos de cada línea que se encuentren en desorden. Además se observan cuales son los archivos que no tienen datos, debido a que el pozo se quedó tapado, por falla de los cables, por las condiciones del terreno (fangoso en algunos casos), entre otras, para ser posteriormente eliminados. Existen también casos en los que los datos se guardaron en campo con el mismo nombre, por lo que se tendrán que renombrar para evitar problemas con el software ProMAX una vez que se carguen los datos.

FECHA: 11/06/01	AREA: SAN FELIX	PROSPECTO: A Rio Grande	CLIENTE: Petex	LINEA: 5000	NUMERO: 1/2																
OBSERVADOR: Aguayo, Garcia Perez	GRUPO SIMOLOGICO: NLS-HS-3	ASISTENTE: 7200	LONGITUD DE TUBO: 1150-300	-300-1150																	
INSTRUMENTOS			DATOS DE CAMPO																		
MARCA: T-1	TIRO: DFL 7	DISTANCIA/ESTACIONES: 60	MTS	TIEMPOS DE TRANSITO Y OPERACION																	
CAMARA: 315 E-68	DENSIDAD DE GRABACION: 1600	DISTANCIA/POZOS: 100	MTS																		
NO. DE PISTAS: 9	FORMATO DE CAMPO: C	CUANTIA DE DETECCION: 88	MTS																		
DETECTORES: HCH4	CONEXION: 32212	PARCION: LINEA: 13	REBADO: 8	SALIDA CAMP: 6.00																	
SANANDA: 1/P	TIEMPO DE GRABACION: 6	INTERVALO/DETECTORES: 8	N/S	REGRESO CAMP: 7.00																	
	SEG: 2	LONGITUD DE LA CUERDA: 85	N/S	INICIO 3PER: 7.00																	
	INT. DE MUESTREO: 2	DETECTORES/TUBO: 24	N/S	FIN OPER: 7.00																	
FILTRO DE CAMPO: 12.42 IN 100HZ	FILTRO ALIAS: 10.00	SISTEMA DE TIRO: BILATERAL																			
RENDIENTES: 18.00/100																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>TIPO</th> <th>TIRO</th> <th>FILE</th> <th>POSICION TOPOGRAFICA</th> <th>TRAZAS SUPRIMIDAS</th> <th>COMENTARIOS (RUIDO EXCESIVO, LINEAS DE ALTA TENSION, ERRORES DE FUNDAS, MALOS REGISTROS, OTROS)</th> </tr> <tr> <th>N.</th> <th>N.</th> <th>N.</th> <th>TOW: N. EAST: W. DEPTH: T. T. V.</th> <th>(MUCHO RUIDO, MUERTAS, INVERTIDAS)</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>35</td><td>1</td><td>101</td><td>7009 7021 7033 7045 7057 7069 7081 7093 7105 7117 7129 7141 7153 7165 7177 7189 7201 7213 7225 7237 7249 7261 7273 7285 7297 7309 7321 7333 7345 7357 7369 7381 7393 7405 7417 7429 7441 7453 7465 7477 7489 7501 7513 7525 7537 7549 7561 7573 7585 7597 7609 7621 7633 7645 7657 7669 7681 7693 7705 7717 7729 7741 7753 7765 7777 7789 7801 7813 7825 7837 7849 7861 7873 7885 7897 7909 7921 7933 7945 7957 7969 7981 7993 8005 8017 8029 8041 8053 8065 8077 8089 8101 8113 8125 8137 8149 8161 8173 8185 8197 8209 8221 8233 8245 8257 8269 8281 8293 8305 8317 8329 8341 8353 8365 8377 8389 8401 8413 8425 8437 8449 8461 8473 8485 8497 8509 8521 8533 8545 8557 8569 8581 8593 8605 8617 8629 8641 8653 8665 8677 8689 8701 8713 8725 8737 8749 8761 8773 8785 8797 8809 8821 8833 8845 8857 8869 8881 8893 8905 8917 8929 8941 8953 8965 8977 8989 9001 9013 9025 9037 9049 9061 9073 9085 9097 9109 9121 9133 9145 9157 9169 9181 9193 9205 9217 9229 9241 9253 9265 9277 9289 9301 9313 9325 9337 9349 9361 9373 9385 9397 9409 9421 9433 9445 9457 9469 9481 9493 9505 9517 9529 9541 9553 9565 9577 9589 9601 9613 9625 9637 9649 9661 9673 9685 9697 9709 9721 9733 9745 9757 9769 9781 9793 9805 9817 9829 9841 9853 9865 9877 9889 9901 9913 9925 9937 9949 9961 9973 9985 9997 10009 10021 10033 10045 10057 10069 10081 10093 10105 10117 10129 10141 10153 10165 10177 10189 10201 10213 10225 10237 10249 10261 10273 10285 10297 10309 10321 10333 10345 10357 10369 10381 10393 10405 10417 10429 10441 10453 10465 10477 10489 10501 10513 10525 10537 10549 10561 10573 10585 10597 10609 10621 10633 10645 10657 10669 10681 10693 10705 10717 10729 10741 10753 10765 10777 10789 10801 10813 10825 10837 10849 10861 10873 10885 10897 10909 10921 10933 10945 10957 10969 10981 10993 11005 11017 11029 11041 11053 11065 11077 11089 11101 11113 11125 11137 11149 11161 11173 11185 11197 11209 11221 11233 11245 11257 11269 11281 11293 11305 11317 11329 11341 11353 11365 11377 11389 11401 11413 11425 11437 11449 11461 11473 11485 11497 11509 11521 11533 11545 11557 11569 11581 11593 11605 11617 11629 11641 11653 11665 11677 11689 11701 11713 11725 11737 11749 11761 11773 11785 11797 11809 11821 11833 11845 11857 11869 11881 11893 11905 11917 11929 11941 11953 11965 11977 11989 12001 12013 12025 12037 12049 12061 12073 12085 12097 12109 12121 12133 12145 12157 12169 12181 12193 12205 12217 12229 12241 12253 12265 12277 12289 12301 12313 12325 12337 12349 12361 12373 12385 12397 12409 12421 12433 12445 12457 12469 12481 12493 12505 12517 12529 12541 12553 12565 12577 12589 12601 12613 12625 12637 12649 12661 12673 12685 12697 12709 12721 12733 12745 12757 12769 12781 12793 12805 12817 12829 12841 12853 12865 12877 12889 12901 12913 12925 12937 12949 12961 12973 12985 12997 13009 13021 13033 13045 13057 13069 13081 13093 13105 13117 13129 13141 13153 13165 13177 13189 13201 13213 13225 13237 13249 13261 13273 13285 13297 13309 13321 13333 13345 13357 13369 13381 13393 13405 13417 13429 13441 13453 13465 13477 13489 13501 13513 13525 13537 13549 13561 13573 13585 13597 13609 13621 13633 13645 13657 13669 13681 13693 13705 13717 13729 13741 13753 13765 13777 13789 13801 13813 13825 13837 13849 13861 13873 13885 13897 13909 13921 13933 13945 13957 13969 13981 13993 14005 14017 14029 14041 14053 14065 14077 14089 14101 14113 14125 14137 14149 14161 14173 14185 14197 14209 14221 14233 14245 14257 14269 14281 14293 14305 14317 14329 14341 14353 14365 14377 14389 14401 14413 14425 14437 14449 14461 14473 14485 14497 14509 14521 14533 14545 14557 14569 14581 14593 14605 14617 14629 14641 14653 14665 14677 14689 14701 14713 14725 14737 14749 14761 14773 14785 14797 14809 14821 14833 14845 14857 14869 14881 14893 14905 14917 14929 14941 14953 14965 14977 14989 15001 15013 15025 15037 15049 15061 15073 15085 15097 15109 15121 15133 15145 15157 15169 15181 15193 15205 15217 15229 15241 15253 15265 15277 15289 15301 15313 15325 15337 15349 15361 15373 15385 15397 15409 15421 15433 15445 15457 15469 15481 15493 15505 15517 15529 15541 15553 15565 15577 15589 15601 15613 15625 15637 15649 15661 15673 15685 15697 15709 15721 15733 15745 15757 15769 15781 15793 15805 15817 15829 15841 15853 15865 15877 15889 15901 15913 15925 15937 15949 15961 15973 15985 15997 16009 16021 16033 16045 16057 16069 16081 16093 16105 16117 16129 16141 16153 16165 16177 16189 16201 16213 16225 16237 16249 16261 16273 16285 16297 16309 16321 16333 16345 16357 16369 16381 16393 16405 16417 16429 16441 16453 16465 16477 16489 16501 16513 16525 16537 16549 16561 16573 16585 16597 16609 16621 16633 16645 16657 16669 16681 16693 16705 16717 16729 16741 16753 16765 16777 16789 16801 16813 16825 16837 16849 16861 16873 16885 16897 16909 16921 16933 16945 16957 16969 16981 16993 17005 17017 17029 17041 17053 17065 17077 17089 17101 17113 17125 17137 17149 17161 17173 17185 17197 17209 17221 17233 17245 17257 17269 17281 17293 17305 17317 17329 17341 17353 17365 17377 17389 17401 17413 17425 17437 17449 17461 17473 17485 17497 17509 17521 17533 17545 17557 17569 17581 17593 17605 17617 17629 17641 17653 17665 17677 17689 17701 17713 17725 17737 17749 17761 17773 17785 17797 17809 17821 17833 17845 17857 17869 17881 17893 17905 17917 17929 17941 17953 17965 17977 17989 18001 18013 18025 18037 18049 18061 18073 18085 18097 18109 18121 18133 18145 18157 18169 18181 18193 18205 18217 18229 18241 18253 18265 18277 18289 18301 18313 18325 18337 18349 18361 18373 18385 18397 18409 18421 18433 18445 18457 18469 18481 18493 18505 18517 18529 18541 18553 18565 18577 18589 18601 18613 18625 18637 18649 18661 18673 18685 18697 18709 18721 18733 18745 18757 18769 18781 18793 18805 18817 18829 18841 18853 18865 18877 18889 18901 18913 18925 18937 18949 18961 18973 18985 18997 19009 19021 19033 19045 19057 19069 19081 19093 19105 19117 19129 19141 19153 19165 19177 19189 19201 19213 19225 19237 19249 19261 19273 19285 19297 19309 19321 19333 19345 19357 19369 19381 19393 19405 19417 19429 19441 19453 19465 19477 19489 19501 19513 19525 19537 19549 19561 19573 19585 19597 19609 19621 19633 19645 19657 19669 19681 19693 19705 19717 19729 19741 19753 19765 19777 19789 19801 19813 19825 19837 19849 19861 19873 19885 19897 19909 19921 19933 19945 19957 19969 19981 19993 20005 20017 20029 20041 20053 20065 20077 20089 20101 20113 20125 20137 20149 20161 20173 20185 20197 20209 20221 20233 20245 20257 20269 20281 20293 20305 20317 20329 20341 20353 20365 20377 20389 20401 20413 20425 20437 20449 20461 20473 20485 20497 20509 20521 20533 20545 20557 20569 20581 20593 20605 20617 20629 20641 20653 20665 20677 20689 20701 20713 20725 20737 20749 20761 20773 20785 20797 20809 20821 20833 20845 20857 20869 20881 20893 20905 20917 20929 20941 20953 20965 20977 20989 21001 21013 21025 21037 21049 21061 21073 21085 21097 21109 21121 21133 21145 21157 21169 21181 21193 21205 21217 21229 21241 21253 21265 21277 21289 21301 21313 21325 21337 21349 21361 21373 21385 21397 21409 21421 21433 21445 21457 21469 21481 21493 21505 21517 21529 21541 21553 21565 21577 21589 21601 21613 21625 21637 21649 21661 21673 21685 21697 21709 21721 21733 21745 21757 21769 21781 21793 21805 21817 21829 21841 21853 21865 21877 21889 21901 21913 21925 21937 21949 21961 21973 21985 21997 22009 22021 22033 22045 22057 22069 22081 22093 22105 22117 22129 22141 22153 22165 22177 22189 22201 22213 22225 22237 22249 22261 22273 22285 22297 22309 22321 22333 22345 22357 22369 22381 22393 22405 22417 22429 22441 22453 22465 22477 22489 22501 22513 22525 22537 22549 22561 22573 22585 22597 22609 22621 22633 22645 22657 22669 22681 22693 22705 22717 22729 22741 22753 22765 22777 22789 22801 22813 22825 22837 22849 22861 22873 22885 22897 22909 22921 22933 22945 22957 22969 22981 22993 23005 23017 23029 23041 23053 23065 23077 23089 23101 23113 23125 23137 23149 23161 23173 23185 23197 23209 23221 23233 23245 23257 23269 23281 23293 23305 23317 23329 23341 23353 23365 23377 23389 23401 23413 23425 23437 23449 23461 23473 23485 23497 23509 23521 23533 23545 23557 23569 23581 23593 23605 23617 23629 23641 23653 23665 23677 23689 23701 23713 23725 23737 23749 23761 23773 23785 23797 23809 23821 23833 23845 23857 23869 23881 23893 23905 23917 23929 23941 23953 23965 23977 23989 24001 24013 24025 24037 24049 24061 24073 24085 24097 24109 24121 24133 24145 24157 24169 24181 24193 24205 24217 24229 24241 24253 24265 24277 24289 24301 24313 24325 24337 24349 24361 24373 24385 24397 24409 24421 24433 24445 24457 24469 24481 24493 24505 24517 24529 24541 24553 24565 24577 24589 24601 24613 24625 24637 24649 24661 24673 24685 24697 24709 24721 24733 24745 24757 24769 24781 24793 24805 24817 24829 24841 24853 24865 24877 24889 24901 24913 24925 24937 24949 24961 24973 24985 24997 25009 25021 25033 25045 25057 25069 25081 25093 25105 25117 25129 25141 25153 25165 25177 25189 25201 25213 25225 25237 25249 25261 25273 25285 25297 25309 25321 25333 25345 25357 25369 25381 25393 25405 25417 25429 25441 25453 25465 25477 25489 25501 25513 25525 25537 25549 25561 25573 25585 25597 25609 25621 25633 25645 25657 25669 25681 25693 25705 25717 25729 25741 25753 25765 25777 25789 25801 25813 25825 25837 25849 25861 25873 25885 25897 25909 25921 25933 25945 25957 25969 25981 25993 26005 26017 26029 26041 26053 26065 26077 26089 26101 26113 26125 26137 26149 26161 26173 26185 26197 26209 26221 26233 26245 26257 26269 26281 26293 26305 26317 26329 26341 26353 26365 26377 26389 26401 26413 26425 26437 26449 26461 26473 26485 26497 26509 26521 26533 26545 26557 26569 26581 26593 26605 26617 26629 26641 26653 26665 26677 26689 26701 26713 26725 26737 26749 26761 26773 26785 26797 26809 26821 26833 26845 26857 26869 26881 26893 26905 26917 26929 26941 26953 26965 26977 26989 27001 27013 27025 27037 27049 27061 27073 27085 27097 27109 27121 27133 27145 27157 27169 27181 27193 27205 27217 27229 27241 27253 27265 27277 27289 27301 27313 27325 27337 27349 27361 27373 27385 27397 27409 27421 27433 27445 27457 27469 27481 27493 27505 27517 27529 27541 27553 27565 27577 27589 27601 27613 27625 27637 27649 27661 27673 27685 27697 27709 27721 27733 27745 27757 27769 27781 27793 27805 27817 27829 27841 27853 27865 27877 27889 27901 27913 27925 27937 27949 27961 27973 27985 27997 28009 28021 28033 28045 28057 28069 28081 28093 28105 28117 28129 28141 28153 28165 28177 28189 28201 28213 28225 28237 28249 28261 28273 28285 28297 28309 28321 28333 28345 28357 28369 28381 28393 28405 28417 28429 28441 28453 28465 28477 28489 28501 28513 28525 28537 28549 28561 28573 28585 28597 28609 28621 28633 28645 28657 28669 28681 28693 28705 28717 28729 28741 28753 28765 28777 28789 28801 28813 28825 28837 28849 28861 28873 28885 28897 28909 28921 28933 28945 28957 28969 28981 28993 29005 29017 29029 29041 29053 29065 29077 29089 29101 29113 29125 29137 29149 29161 29173 29185 29197 29209 29221 29233 29245 29257 29269 29281 29293 29305 29317 29329 29341 29353 29365 29377 29389 29401 29413 29425 29437 29449 29461 29473 29485 29497 29509 29521 29533 29545 29557 29569 2958</td></tr></tbody></table>						TIPO	TIRO	FILE	POSICION TOPOGRAFICA	TRAZAS SUPRIMIDAS	COMENTARIOS (RUIDO EXCESIVO, LINEAS DE ALTA TENSION, ERRORES DE FUNDAS, MALOS REGISTROS, OTROS)	N.	N.	N.	TOW: N. EAST: W. DEPTH: T. T. V.	(MUCHO RUIDO, MUERTAS, INVERTIDAS)		35	1	101	7009 7021 7033 7045 7057 7069 7081 7093 7105 7117 7129 7141 7153 7165 7177 7189 7201 7213 7225 7237 7249 7261 7273 7285 7297 7309 7321 7333 7345 7357 7369 7381 7393 7405 7417 7429 7441 7453 7465 7477 7489 7501 7513 7525 7537 7549 7561 7573 7585 7597 7609 7621 7633 7645 7657 7669 7681 7693 7705 7717 7729 7741 7753 7765 7777 7789 7801 7813 7825 7837 7849 7861 7873 7885 7897 7909 7921 7933 7945 7957 7969 7981 7993 8005 8017 8029 8041 8053 8065 8077 8089 8101 8113 8125 8137 8149 8161 8173 8185 8197 8209 8221 8233 8245 8257 8269 8281 8293 8305 8317 8329 8341 8353 8365 8377 8389 8401 8413 8425 8437 8449 8461 8473 8485 8497 8509 8521 8533 8545 8557 8569 8581 8593 8605 8617 8629 8641 8653 8665 8677 8689 8701 8713 8725 8737 8749 8761 8773 8785 8797 8809 8821 8833 8845 8857 8869 8881 8893 8905 8917 8929 8941 8953 8965 8977 8989 9001 9013 9025 9037 9049 9061 9073 9085 9097 9109 9121 9133 9145 9157 9169 9181 9193 9205 9217 9229 9241 9253 9265 9277 9289 9301 9313 9325 9337 9349 9361 9373 9385 9397 9409 9421 9433 9445 9457 9469 9481 9493 9505 9517 9529 9541 9553 9565 9577 9589 9601 9613 9625 9637 9649 9661 9673 9685 9697 9709 9721 9733 9745 9757 9769 9781 9793 9805 9817 9829 9841 9853 9865 9877 9889 9901 9913 9925 9937 9949 9961 9973 9985 9997 10009 10021 10033 10045 10057 10069 10081 10093 10105 10117 10129 10141 10153 10165 10177 10189 10201 10213 10225 10237 10249 10261 10273 10285 10297 10309 10321 10333 10345 10357 10369 10381 10393 10405 10417 10429 10441 10453 10465 10477 10489 10501 10513 10525 10537 10549 10561 10573 10585 10597 10609 10621 10633 10645 10657 10669 10681 10693 10705 10717 10729 10741 10753 10765 10777 10789 10801 10813 10825 10837 10849 10861 10873 10885 10897 10909 10921 10933 10945 10957 10969 10981 10993 11005 11017 11029 11041 11053 11065 11077 11089 11101 11113 11125 11137 11149 11161 11173 11185 11197 11209 11221 11233 11245 11257 11269 11281 11293 11305 11317 11329 11341 11353 11365 11377 11389 11401 11413 11425 11437 11449 11461 11473 11485 11497 11509 11521 11533 11545 11557 11569 11581 11593 11605 11617 11629 11641 11653 11665 11677 11689 11701 11713 11725 11737 11749 11761 11773 11785 11797 11809 11821 11833 11845 11857 11869 11881 11893 11905 11917 11929 11941 11953 11965 11977 11989 12001 12013 12025 12037 12049 12061 12073 12085 12097 12109 12121 12133 12145 12157 12169 12181 12193 12205 12217 12229 12241 12253 12265 12277 12289 12301 12313 12325 12337 12349 12361 12373 12385 12397 12409 12421 12433 12445 12457 12469 12481 12493 12505 12517 12529 12541 12553 12565 12577 12589 12601 12613 12625 12637 12649 12661 12673 12685 12697 12709 12721 12733 12745 12757 12769 12781 12793 12805 12817 12829 12841 12853 12865 12877 12889 12901 12913 12925 12937 12949 12961 12973 12985 12997 13009 13021 13033 13045 13057 13069 13081 13093 13105 13117 13129 13141 13153 13165 13177 13189 13201 13213 13225 13237 13249 13261 13273 13285 13297 13309 13321 13333 13345 13357 13369 13381 13393 13405 13417 13429 13441 13453 13465 13477 13489 13501 13513 13525 13537 13549 13561 13573 13585 13597 13609 13621 13633 13645 13657 13669 13681 13693 13705 13717 13729 13741 13753 13765 13777 13789 13801 13813 13825 13837 13849 13861 13873 13885 13897 13909 13921 13933 13945 13957 13969 13981 13993 14005 14017 14029 14041 14053 14065 14077 14089 14101 14113 14125 14137 14149 14161 14173 14185 14197 14209 14221 14233 14245 14257 14269 14281 14293 14305 14317 14329 14341 14353 14365 14377 14389 14401 14413 14425 14437 14449 14461 14473 14485 14497 14509 14521 14533 14545 14557 14569 14581 14593 14605 14617 14629 14641 14653 14665 14677 14689 14701 14713 14725 14737 14749 14761 14773 14785 14797 14809 14821 14833 14845 14857 14869 14881 14893 14905 14917 14929 14941 14953 14965 14977 14989 15001 15013 15025 15037 15049 15061 15073 15085 15097 15109 15121 15133 15145 15157 15169 15181 15193 15205 15217 15229 15241 15253 15265 15277 15289 15301 15313 15325 15337 15349 15361 15373 15385 15397 15409 15421 15433 15445 15457 15469 15481 15493 15505 15517 15529 15541 15553 15565 15577 15589 15601 15613 15625 15637 15649 15661 15673 15685 15697 15709 15721 15733 15745 15757 15769 15781 15793 15805 15817 15829 15841 15853 15865 15877 15889 15901 15913 15925 15937 15949 15961 15973 15985 15997 16009 16021 16033 16045 16057 16069 16081 16093 16105 16117 16129 16141 16153 16165 16177 16189 16201 16213 16225 16237 16249 16261 16273 16285 16297 16309 16321 16333 16345 16357 16369 16381 16393 16405 16417 16429 16441 16453 16465 16477 16489 16501 16513 16525 16537 16549 16561 16573 16585 16597 16609 16621 16633 16645 16657 16669 16681 16693 16705 16717 16729 16741 16753 16765 16777 16789 16801 16813 16825 16837 16849 16861 16873 16885 16897 16909 16921 16933 16945 16957 16969 16981 16993 17005 17017 17029 17041 17053 17065 17077 17089 17101 17113 17125 17137 17149 17161 17173 17185 17197 17209 17221 17233 17245 17257 17269 17281 17293 17305 17317 17329 17341 17353 17365 17377 17389 17401 17413 17425 17437 17449 17461 17473 17485 17497 17509 17521 17533 17545 17557 17569 17581 17593 17605 17617 17629 17641 17653 17665 17677 17689 17701 17713 17725 17737 17749 17761 17773 17785 17797 17809 17821 17833 17845 17857 17869 17881 17893 17905 17917 17929 17941 17953 17965 17977 17989 18001 18013 18025 18037 18049 18061 18073 18085 18097 18109 18121 18133 18145 18157 18169 18181 18193 18205 18217 18229 18241 18253 18265 18277 18289 18301 18313 18325 18337 18349 18361 18373 18385 18397 18409 18421 18433 18445 18457 18469 18481 18493 18505 18517 18529 18541 18553 18565 18577 18589 18601 18613 18625 18637 18649 18661 18673 18685 18697 18709 18721 18733 18745 18757 18769 18781 18793 18805 18817 18829 18841 18853 18865 18877 18889 18901 18913 18925 18937 18949 18961 18973 18985 18997 19009 19021 19033 19045 19057 19069 19081 19093 19105 19117 19129 19141 19153 19165 19177 19189 19201 19213 19225 19237 19249 19261 19273 19285 19297 19309 19321 19333 19345 19357 19369 19381 19393 19405 19417 19429 19441 19453 19465 19477 19489 19501 19513 19525 19537 19549 19561 19573 19585 19597 19609 19621 19633 19645 19657 19669 19681 19693 19705 19717 19729 19741 19753 19765 19777 19789 19801 19813 19825 19837 19849 19861 19873 19885 19897 19909 19921 19933 19945 19957 19969 19981 19993 20005 20017 20029 20041 20053 20065 20077 20089 20101 20113 20125 20137 20149 20161 20173 20185 20197 20209 20221 20233 20245 20257 20269 20281 20293 20305 20317 20329 20341 20353 20365 20377 20389 20401 20413 20425 20437 20449 20461 20473 20485 20497 20509 20521 20533 20545 20557 20569 20581 20593 20605 20617 20629 20641 20653 20665 20677 20689 20701 20713 20725 20737 20749 20761 20773 20785 20797 20809 20821 20833 20845 20857 20869 20881 20893 20905 20917 20929 20941 20953 20965 20977 20989 21001 21013 21025 21037 21049 21061 21073 21085 21097 21109 21121 21133 21145 21157 21169 21181 21193 21205 21217 21229 21241 21253 21265 21277 21289 21301 21313 21325 21337 21349 21361 21373 21385 21397 21409 21421 21433 21445 21457 21469 21481 21493 21505 21517 21529 21541 21553 21565 21577 21589 21601 21613 21625 21637 21649 21661 21673 21685 21697 21709 21721 21733 21745 21757 21769 21781 21793 21805 21817 21829 21841 21853 21865 21877 21889 21901 21913 21925 21937 21949 21961 21973 21985 21997 22009 22021 22033 22045 22057 22069 22081 22093 22105 22117 22129 22141 22153 22165 22177 22189 22201 22213 22225 22237 22249 22261 22273 22285 22297 22309 22321 22333 22345 22357 22369 22381 22393 22405 22417 22429 22441 22453 22465 22477 22489 22501 22513 22525 22537 22549 22561 22573 22585 22597 22609 22621 22633 22645 22657 22669 22681 22693 22705 22717 22729 22741 22753 22765 22777 22789 22801 22813 22825 22837 22849 22861 22873 22885 22897 22909 22921 22933 22945 22957 22969 22981 22993 23005 23017 23029 23041 23053 23065 23077 23089 23101 23113 23125 23137 23149 23161 23173 23185 23197 23209 23221 23233 23245 23257 23269 23281 23293 23305 23317 23329 23341 23353 23365 23377 23389 23401 23413 23425 23437 23449 23461 23473 23485 23497 23509 23521 23533 23545 23557 23569 23581 23593 23605 23617 23629 23641 23653 23665 23677 23689 23701 23713 23725 23737 23749 23761 23773 23785 23797 23809 23821 23833 23845 23857 23869 23881 23893 23905 23917 23929 23941 23953 23965 23977 23989 24001 24013 24025 24037 24049 24061 24073 24085 24097 24109 24121 24133 24145 24157 24169 24181 24193 24205 24217 24229 24241 24253 24265 24277 24289 24301 24313 24325 24337 24349 24361 24373 24385 24397 24409 24421 24433 24445 24457 24469 24481 24493 24505 24517 24529 24541 24553 24565 24577 24589 24601 24613 24625 24637 24649 24661 24673 24685 24697 24709 24721 24733 24745 24757 24769 24781 24793 24805 24817 24829 24841 24853 24865 24877 24889 24901 24913 24925 24937 24949 24961 24973 24985 24997 25009 25021 25033 25045 25057 25069 25081 25093 25105 25117 25129 25141 25153 25165 25177 25189 25201 25213 25225 25237 25249 25261 25273 25285 25297 25309 25321 25333 25345 25357 25369 25381 25393 25405 25417 25429 25441 25453 25465 25477 25489 25501 25513 25525 25537 25549 25561 25573 25585 25597 25609 25621 25633 25645 25657 25669 25681 25693 25705 25717 25729 25741 25753 25765 25777 25789 25801 25813 25825 25837 25849 25861 25873 25885 25897 25909 25921 25933 25945 25957 25969 25981 25993 26005 26017 26029 26041 26053 26065 26077 26089 26101 26113 26125 26137 26149 26161 26173 26185 26197 26209 26221 26233 26245 26257 26269 26281 26293 26305 26317 26329 26341 26353 26365 26377 26389 26401 26413 26425 26437 26449 26461 26473 26485 26497 26509 26521 26533 26545 26557 26569 26581 26593 26605 26617 26629 26641 26653 26665 26677 26689 26701 26713 26725 26737 26749 26761 26773 26785 26797 26809 26821 26833 26845 26857 26869 26881 26893 26905 26917 26929 26941 26953 26965 26977 26989 27001 27013 27025 27037 27049 27061 27073 27085 27097 27109 27121 27133 27145 27157 27169 27181 27193 27205 27217 27229 27241 27253 27265 27277 27289 27301 27313 27325 27337 27349 27361 27373 27385 27397 27409 27421 27433 27445 27457 27469 27481 27493 27505 27517 27529 27541 27553 27565 27577 27589 27601 27613 27625 27637 27649 27661 27673 27685 27697 27709 27721 27733 27745 27757 27769 27781 27793 27805 27817 27829 27841 27853 27865 27877 27889 27901 27913 27925 27937 27949 27961 27973 27985 27997 28009 28021 28033 28045 28057 28069 28081 28093 28105 28117 28129 28141 28153 28165 28177 28189 28201 28213 28225 28237 28249 28261 28273 28285 28297 28309 28321 28333 28345 28357 28369 28381 28393 28405 28417 28429 28441 28453 28465 28477 28489 28501 28513 28525 28537 28549 28561 28573 28585 28597 28609 28621 28633 28645 28657 28669 28681 28693 28705 28717 28729 28741 28753 28765 28777 28789 28801 28813 28825 28837 28849 28861 28873 28885 28897 28909 28921 28933 28945 28957 28969 28981 28993 29005 29017 29029 29041 29053 29065 29077 29089 29101 29113 29125 29137 29149 29161 29173 29185 29197 29209 29221 29233 29245 29257 29269 29281 29293 29305 29317 29329 29341 29353 29365 29377 29389 29401 29413 29425 29437 29449 29461 29473 29485 29497 29509 29521 29533 29545 29557 29569 2958
TIPO	TIRO	FILE	POSICION TOPOGRAFICA	TRAZAS SUPRIMIDAS	COMENTARIOS (RUIDO EXCESIVO, LINEAS DE ALTA TENSION, ERRORES DE FUNDAS, MALOS REGISTROS, OTROS)																
N.	N.	N.	TOW: N. EAST: W. DEPTH: T. T. V.	(MUCHO RUIDO, MUERTAS, INVERTIDAS)																	
35	1	101	7009 7021 7033 7045 7057 7069 7081 7093 7105 7117 7129 7141 7153 7165 7177 7189 7201 7213 7225 7237 7249 7261 7273 7285 7297 7309 7321 7333 7345 7357 7369 7381 7393 7405 7417 7429 7441 7453 7465 7477 7489 7501 7513 7525 7537 7549 7561 7573 7585 7597 7609 7621 7633 7645 7657 7669 7681 7693 7705 7717 7729 7741 7753 7765 7777 7789 7801 7813 7825 7837 7849 7861 7873 7885 7897 7909 7921 7933 7945 7957 7969 7981 7993 8005 8017 8029 8041 8053 8065 8077 8089 8101 8113 8125 8137 8149 8161 8173 8185 8197 8209 8221 8233 8245 8257 8269 8281 8293 8305 8317 8329 8341 8353 8365 8377 8389 8401 8413 8425 8437 8449 8461 8473 8485 8497 8509 8521 8533 8545 8557 8569 8581 8593 8605 8617 8629 8641 8653 8665 8677 8689 8701 8713 8725 8737 8749 8761 8773 8785 8797 8809 8821 8833 8845 8857 8869 8881 8893 8905 8917 8929 8941 8953 8965 8977 8989 9001 9013 9025 9037 9049 9061 9073 9085 9097 9109 9121 9133 9145 9157 9169 9181 9193 9205 9217 9229 9241 9253 9265 9277 9289 9301 9313 9325 9337 9349 9361 9373 9385 9397 9409 9421 9433 9445 9457 9469 9481 9493 9505 9517 9529 9541 9553 9565 9577 9589 9601 9613 9625 9637 9649 9661 9673 9685 9697 9709 9721 9733 9745 9757 9769 9781 9793 9805 9817 9829 9841 9853 9865 9877 9889 9901 9913 9925 9937 9949 9961 9973 9985 9997 10009 10021 10033 10045 10057 10069 10081 10093 10105 10117 10129 10141 10153 10165 10177 10189 10201 10213 10225 10237 10249 10261 10273 10285 10297 10309 10321 10333 10345 10357 10369 10381 10393 10405 10417 10429 10441 10453 10465 10477 10489 10501 10513 10525 10537 10549 10561 10573 10585 10597 10609 10621 10633 10645 10657 10669 10681 10693 10705 10717 10729 10741 10753 10765 10777 10789 10801 10813 10825 10837 10849 10861 10873 10885 10897 10909 10921 10933 10945 10957 10969 10981 10993 11005 11017 11029 11041 11053 11065 11077 11089 11101 11113 11125 11137 11149 11161 11173 11185 11197 11209 11221 11233 11245 11257 11269 11281 11293 11305 11317 11329 11341 11353 11365 11377 11389 11401 11413 11425 11437 11449 11461 11473 11485 11497 11509 11521 11533 11545 11557 11569 11581 11593 11605 11617 11629 11641 11653 11665 11677 11689 11701 11713 11725 11737 11749 11761 11773 11785 11797 11809 11821 11833 11845 11857 11869 11881 11893 11905 11917 11929 11941 11953 11965 11977 11989 12001 12013 12025 12037 12049 12061 12073 12085 12097 12109 12121 12133 12145 12157 12169 12181 12193 12205 12217 12229 12241 12253 12265 12277 12289 12301 12313 12325 12337 12349 12361 12373 12385 12397 12409 12421 12433 12445 12457 12469 12481 12493 12505 12517 12529 12541 12553 12565 12577 12589 12601 12613 12625 12637 12649 12661 12673 12685 12697 12709 12721 12733 12745 12757 12769 12781 12793 12805 12817 12829 12841 12853 12865 12877 12889 12901 12913 12925 12937 12949 12961 12973 12985 12997 13009 13021 13033 13045 13057 13069 13081 13093 13105 13117 13129 13141 13153 13165 13177 13189 13201 13213 13225 13237 13249 13261 13273 13285 13297 13309 13321 13333 13345 13357 13369 13381 13393 13405 13417 13429 13441 13453 13465 13477 13489 13501 13513 13525 13537 13549 13561 13573 13585 13597 13609 13621 13633 13645 13657 13669 13681 13693 13705 13717 13729 13741 13753 13765 13777 13789 13801 13813 13825 13837 13849 13861 13873 13885 13897 13909 13921 13933 13945 13957 13969 13981 13993 14005 14017 14029 14041 14053 14065 14077 14089 14101 14113 14125 14137 14149 14161 14173 14185 14197 14209 14221 14233 14245 14257 14269 14281 14293 14305 14317 14329 14341 14353 14365 14377 14389 14401 14413 14425 14437 14449 14461 14473 14485 14497 14509 14521 14533 14545 14557 14569 14581 14593 14605 14617 14629 14641 14653 14665 14677 14689 14701 14713 14725 14737 14749 14761 14773 14785 14797 14809 14821 14833 14845 14857 14869 14881 14893 14905 14917 14929 14941 14953 14965 14977 14989 15001 15013 15025 15037 15049 15061 15073 15085 15097 15109 15121 15133 15145 15157 15169 15181 15193 15205 15217 15229 15241 15253 15265 15277 15289 15301 15313 15325 15337 15349 15361 15373 15385 15397 15409 15421 15433 15445 15457 15469 15481 15493 15505 15517 15529 15541 15553 15565 15577 15589 15601 15613 15625 15637 15649 15661 15673 15685 15697 15709 15721 15733 15745 15757 15769 15781 15793 15805 15817 15829 15841 15853 15865 15877 15889 15901 15913 15925 15937 15949 15961 15973 15985 15997 16009 16021 16033 16045 16057 16069 16081 16093 16105 16117 16129 16141 16153 16165 16177 16189 16201 16213 16225 16237 16249 16261 16273 16285 16297 16309 16321 16333 16345 16357 16369 16381 16393 16405 16417 16429 16441 16453 16465 16477 16489 16501 16513 16525 16537 16549 16561 16573 16585 16597 16609 16621 16633 16645 16657 16669 16681 16693 16705 16717 16729 16741 16753 16765 16777 16789 16801 16813 16825 16837 16849 16861 16873 16885 16897 16909 16921 16933 16945 16957 16969 16981 16993 17005 17017 17029 17041 17053 17065 17077 17089 17101 17113 17125 17137 17149 17161 17173 17185 17197 17209 17221 17233 17245 17257 17269 17281 17293 17305 17317 17329 17341 17353 17365 17377 17389 17401 17413 17425 17437 17449 17461 17473 17485 17497 17509 17521 17533 17545 17557 17569 17581 17593 17605 17617 17629 17641 17653 17665 17677 17689 17701 17713 17725 17737 17749 17761 17773 17785 17797 17809 17821 17833 17845 17857 17869 17881 17893 17905 17917 17929 17941 17953 17965 17977 17989 18001 18013 18025 18037 18049 18061 18073 18085 18097 18109 18121 18133 18145 18157 18169 18181 18193 18205 18217 18229 18241 18253 18265 18277 18289 18301 18313 18325 18337 18349 18361 18373 18385 18397 18409 18421 18433 18445 18457 18469 18481 18493 18505 18517 18529 18541 18553 18565 18577 18589 18601 18613 18625 18637 18649 18661 18673 18685 18697 18709 18721 18733 18745 18757 18769 18781 18793 18805 18817 18829 18841 18853 18865 18877 18889 18901 18913 18925 18937 18949 18961 18973 18985 18997 19009 19021 19033 19045 19057 19069 19081 19093 19105 19117 19129 19141 19153 19165 19177 19189 19201 19213 19225 19237 19249 19261 19273 19285 19297 19309 19321 19333 19345 19357 19369 19381 19393 19405 19417 19429 19441 19453 19465 19477 19489 19501 19513 19525 19537 19549 19561 19573 19585 19597 19609 19621 19633 19645 19657 19669 19681 19693 19705 19717 19729 19741 19753 19765 19777 19789 19801 19813 19825 19837 19849 19861 19873 19885 19897 19909 19921 19933 19945 19957 19969 19981 19993 20005 20017 20029 20041 20053 20065 20077 20089 20101 20113 20125 20137 20149 20161 20173 20185 20197 20209 20221 20233 20245 20257 20269 20281 20293 20305 20317 20329 20341 20353 20365 20377 20389 20401 20413 20425 20437 20449 20461 20473 20485 20497 20509 20521 20533 20545 20557 20569 20581 20593 20605 20617 20629 20641 20653 20665 20677 20689 20701 20713 20725 20737 20749 20761 20773 20785 20797 20809 20821 20833 20845 20857 20869 20881 20893 20905 20917 20929 20941 20953 20965 20977 20989 21001 21013 21025 21037 21049 21061 21073 21085 21097 21109 21121 21133 21145 21157 21169 21181 21193 21205 21217 21229 21241 21253 21265 21277 21289 21301 21313 21325 21337 21349 21361 21373 21385 21397 21409 21421 21433 21445 21457 21469 21481 21493 21505 21517 21529 21541 21553 21565 21577 21589 21601 21613 21625 21637 21649 21661 21673 21685 21697 21709 21721 21733 21745 21757 21769 21781 21793 21805 21817 21829 21841 21853 21865 21877 21889 21901 21913 21925 21937 21949 21961 21973 21985 21997 22009 22021 22033 22045 22057 22069 22081 22093 22105 22117 22129 22141 22153 22165 22177 22189 22201 22213 22225 22237 22249 22261 22273 22285 22297 22309 22321 22333 22345 22357 22369 22381 22393 22405 22417 22429 22441 22453 22465 22477 22489 22501 22513 22525 22537 22549 22561 22573 22585 22597 22609 22621 22633 22645 22657 22669 22681 22693 22705 22717 22729 22741 22753 22765 22777 22789 22801 22813 22825 22837 22849 22861 22873 22885 22897 22909 22921 22933 22945 22957 22969 22981 22993 23005 23017 23029 23041 23053 23065 23077 23089 23101 23113 23125 23137 23149 23161 23173 23185 23197 23209 23221 23233 23245 23257 23269 23281 23293 23305 23317 23329 23341 23353 23365 23377 23389 23401 23413 23425 23437 23449 23461 23473 23485 23497 23509 23521 23533 23545 23557 23569 23581 23593 23605 23617 23629 23641 23653 23665 23677 23689 23701 23713 23725 23737 23749 23761 23773 23785 23797 23809 23821 23833 23845 23857 23869 23881 23893 23905 23917 23929 23941 23953 23965 23977 23989 24001 24013 24025 24037 24049 24061 24073 24085 24097 24109 24121 24133 24145 24157 24169 24181 24193 24205 24217 24229 24241 24253 24265 24277 24289 24301 24313 24325 24337 24349 24361 24373 24385 24397 24409 24421 24433 24445 24457 24469 24481 24493 24505 24517 24529 24541 24553 24565 24577 24589 24601 24613 24625 24637 24649 24661 24673 24685 24697 24709 24721 24733 24745 24757 24769 24781 24793 24805 24817 24829 24841 24853 24865 24877 24889 24901 24913 24925 24937 24949 24961 24973 24985 24997 25009 25021 25033 25045 25057 25069 25081 25093 25105 25117 25129 25141 25153 25165 25177 25189 25201 25213 25225 25237 25249 25261 25273 25285 25297 25309 25321 25333 25345 25357 25369 25381 25393 25405 25417 25429 25441 25453 25465 25477 25489 25501 25513 25525 25537 25549 25561 25573 25585 25597 25609 25621 25633 25645 25657 25669 25681 25693 25705 25717 25729 25741 25753 25765 25777 25789 25801 25813 25825 25837 25849 25861 25873 25885 25897 25909 25921 25933 25945 25957 25969 25981 25993 26005 26017 26029 26041 26053 26065 26077 26089 26101 26113 26125 26137 26149 26161 26173 26185 26197 26209 26221 26233 26245 26257 26269 26281 26293 26305 26317 26329 26341 26353 26365 26377 26389 26401 26413 26425 26437 26449 26461 26473 26485 26497 26509 26521 26533 26545 26557 26569 26581 26593 26605 26617 26629 26641 26653 26665 26677 26689 26701 26713 26725 26737 26749 26761 26773 26785 26797 26809 26821 26833 26845 26857 26869 26881 26893 26905 26917 26929 26941 26953 26965 26977 26989 27001 27013 27025 27037 27049 27061 27073 27085 27097 27109 27121 27133 27145 27157 27169 27181 27193 27205 27217 27229 27241 27253 27265 27277 27289 27301 27313 27325 27337 27349 27361 27373 27385 27397 27409 27421 27433 27445 27457 27469 27481 27493 27505 27517 27529 27541 27553 27565 27577 27589 27601 27613 27625 27637 27649 27661 27673 27685 27697 27709 27721 27733 27745 27757 27769 27781 27793 27805 27817 27829 27841 27853 27865 27877 27889 27901 27913 27925 27937 27949 27961 27973 27985 27997 28009 28021 28033 28045 28057 28069 28081 28093 28105 28117 28129 28141 28153 28165 28177 28189 28201 28213 28225 28237 28249 28261 28273 28285 28297 28309 28321 28333 28345 28357 28369 28381 28393 28405 28417 28429 28441 28453 28465 28477 28489 28501 28513 28525 28537 28549 28561 28573 28585 28597 28609 28621 28633 28645 28657 28669 28681 28693 28705 28717 28729 28741 28753 28765 28777 28789 28801 28813 28825 28837 28849 28861 28873 28885 28897 28909 28921 28933 28945 28957 28969 28981 28993 29005 29017 29029 29041 29053 29065 29077 29089 29101 29113 29125 29137 29149 29161 29173 29185 29197 29209 29221 29233 29245 29257 29269 29281 29293 29305 29317 29329 29341 29353 29365 29377 29389 29401 29413 29425 29437 29449 29461 29473 29485 29497 29509 29521 29533 29545 29557 29569 2958																		

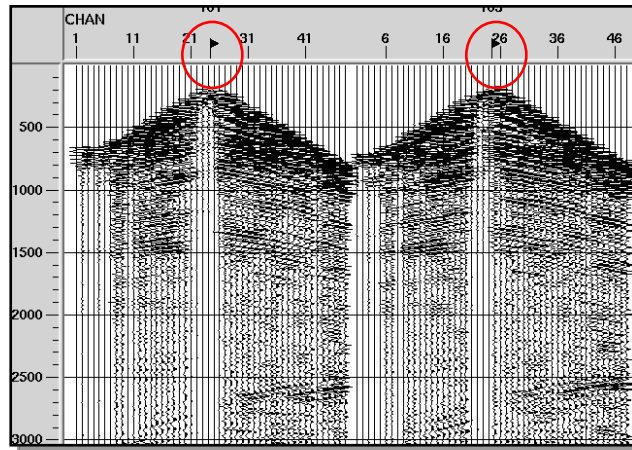


Figura 18. Gathers con geometría cargada correctamente, se observa la banderita en el centro indicando que fue tiro central.

2.2.1.2 Edición de trazas.

En este paso, todas las malas grabaciones pueden ser removidas, por lo que se revisa gather por gather para observar las trazas ruidosas (ocasionadas por ruidos externos como motores, ganado, viento) o trazas muertas (generalmente por problemas con los cables) y eliminarlas. Esto no daña los otros datos, por el contrario al dejarlas solo nos ocasionarían más ruido a la hora de hacer el apilamiento. En caso de que las 48 trazas de un gather estén mal grabadas se elimina por completo, pero debe conservarse su geometría para no afectar la ubicación de las siguientes trazas.

Los filtros utilizados durante la edición de trazas fueron:

- Top mute: este filtro nos ayuda a eliminar la señal que llega antes que las reflexiones (debido a que tienen mayores amplitudes), evitando que al aplicar futuros algoritmos se afecten las amplitudes de los registros (Figura 19).

- Kill trace: este elimina aquellas trazas que presentan ruido superficial o aquel debido al mal funcionamiento de los sensores. Funciona igualando a 0 la traza a la que se le aplica, para anular la interferencia con la señal.

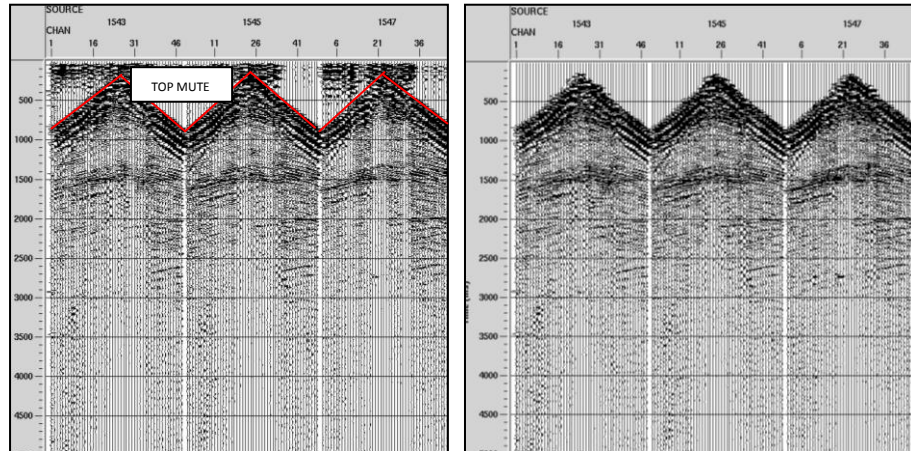


Figura 19. Gathers: donde se muestran los datos originales en el antes (izq) y el después de filtrarlos con el top mute (der).

2.2.1.3 Correcciones estáticas de elevación.

Los tiempos de arribo de las ondas sísmicas, desde las fuentes hasta los receptores, se ven alterados debido a las variaciones en las elevaciones del terreno donde se encuentra el tendido de fuentes y receptores así como también por la presencia de la capa meteorizada. Esta capa está compuesta de rocas que se han debilitado o están fracturadas por causa de la meteorización por lo que su velocidad de propagación es muy lenta. Al realizar esta corrección se llevan los datos tomados en campo a un plano imaginario común, con lo que se minimiza la distorsión en los tiempos de viaje, es decir, se hace esta corrección vertical a fin de colocar la fuente y el receptor en el mismo plano horizontal.

2.2.1.4 Atenuación de onda directa o air blast.

Es una onda que viaja por la parte superior de la primera capa y se observa en los tiempos iniciales de los registros, siendo el primer tren de ondas que genera la fuente y que es detectada por los sensores.

2.2.1.5 Atenuación de ground roll.

Este filtro sirve para atenuar la onda o ground roll, típicamente una onda Rayleigh, que se propaga a lo largo de la superficie del suelo con una frecuencia característicamente baja, velocidad baja y con una amplitud relativamente alta. Estas ondas se degradan la calidad del registro sísmico al enmascarar las reflexiones del subsuelo (Figura 20).

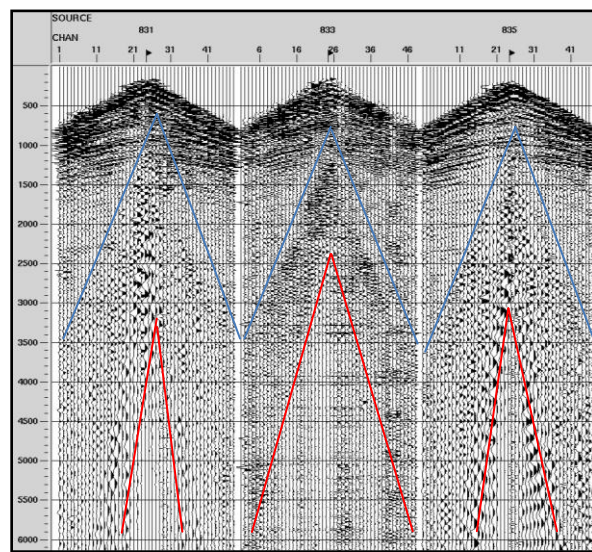


Figura 20. Imagen donde se delimita la zona de amplitudes que indican la presencia del round roll. En azul se observa el límite superior y en rojo el límite inferior.

2.2.1.5 Filtrado pasa banda.

Los filtros se utilizan con la finalidad de eliminar o atenuar el ruido y resaltar los eventos de reflexión. Los filtros, por lo general, operan sobre las bases de la

frecuencia y la amplitud de las trazas, aunque también se pueden usar filtros que actúan sobre su coherencia o su longitud de onda

El filtro pasa banda trabaja en el dominio de las frecuencias. Se encarga de atenuar las señales cuya frecuencia sea menor a la frecuencia de corte inferior que se le indique y aquellas de frecuencia mayor a la frecuencia de corte superior, a fin de dejar pasar la señal o energía de reflexión coherente y se eliminan las frecuencias asociadas al ruido (ondas superficiales y aéreas, ruido ambiental, etc). Para determinar los valores se realiza un análisis de frecuencias en cada una de las líneas sísmicas, teniendo en promedio valores de 10-12-75-85.

2.2.1.6 Filtrado FK.

Este filtro opera en el dominio frecuencia-número de onda, por lo que se debe aplicar a los datos una transformada de Fourier 2D debido a que se encuentran en el dominio tiempo-espacio. Con este filtro se consigue eliminar ruido coherente con tendencia lineal (como el ground roll) y otros tipos de energía que enmascaran las reflexiones primarias (Figura 21). Además ayuda en la atenuación del *Aliasing*, el cual se genera por un muestreo espacial insuficiente de la señal obteniendo una señal resultante con características diferentes a la señal original (Figura 22).

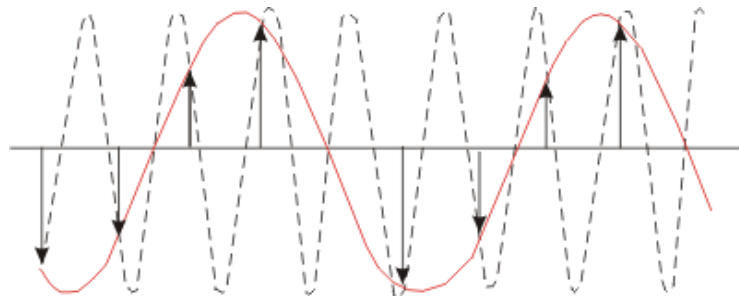


Figura 21. Esquema indicando a grandes rasgos aliasing. En línea punteada señal original, con flechas el muestreo y en rojo la señal resultante.

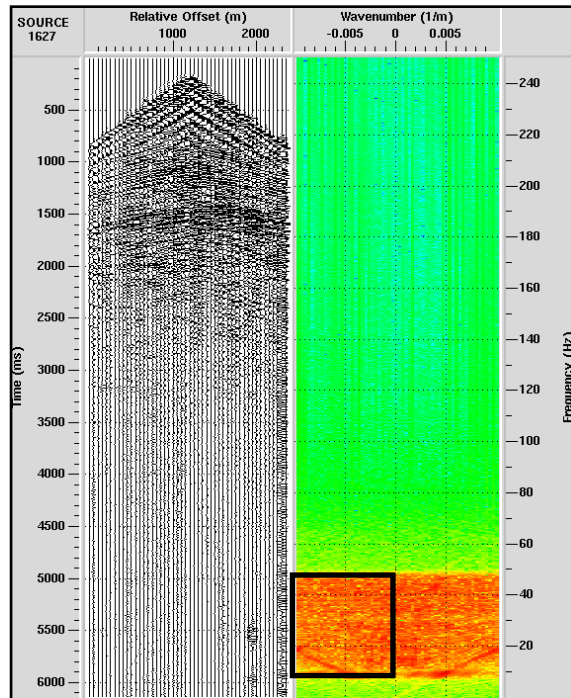


Figura 22. Filtrado FK, se indica en el recuadro negro la zona con la señal que se dejará pasar, lo que se encuentra fuera del recuadro se atenuará.

2.2.1.7 Deconvolución.

La deconvolución es el proceso más importante para recuperar la forma de la onda de la señal sísmica reflejada. Es un algoritmo que se utiliza para eliminar efectos adversos de una operación de filtrado previo, así como para eliminar los efectos que ejercen la fuente por el medio por el que se propagan las ondas sísmicas en la señal registrada (Tierra). La Tierra actúa como un filtro para las ondas sísmicas, por lo que el registro sísmico será una suma de convoluciones entre el pulso sísmico y la respuesta de la Tierra (capas de diferentes litologías y propiedades físicas, las cuales tienen contrastes de impedancia acústica que generan las reflexiones de la señal incidente).

La deconvolución se consigue aplicando un filtro inverso a una ondícula básica. Por lo tanto, se utiliza la autocorrelación para conocer el filtro (Figura 23).

En este trabajo se utilizó la deconvolución predictiva, la cual se utiliza para detectar ruidos coherentes como múltiples, reverberaciones, entre otros para poder eliminarlos. En el software se debe ingresar una longitud de operador (en promedio 100ms), la distancia predictiva (30ms) y ruido blanco, el cual se tomó como 0.5%.

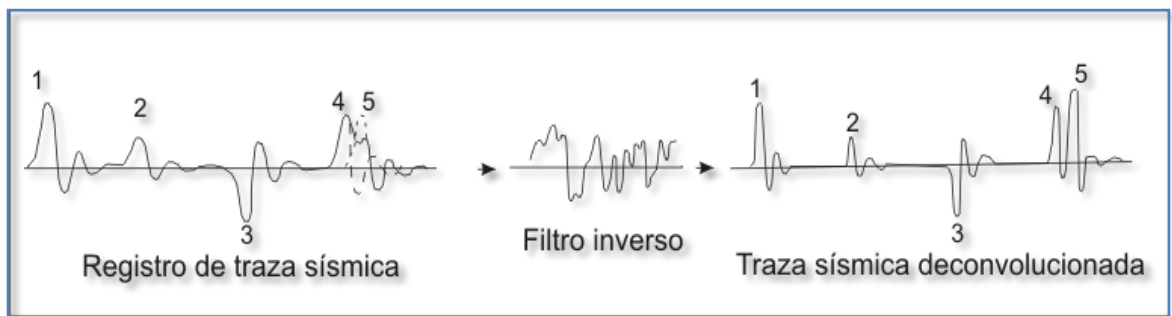


Figura 23. Esquema donde se muestra el proceso ideal de deconvolución, donde el resultado indica los contactos geológicos debido a los cambios de reflexión de la señal.

2.2.2 Apilamiento (Stack).

En esta etapa, el análisis de velocidad es fundamental para un buen resultado.

2.2.2.1 Ordenamiento por CDP.

Los datos ya editados se reordenan en conjuntos con un mismo punto de reflexión común, el cual es denominado punto medio común o CMP (Common MidPoint) cuando es en superficie y geométricamente se encuentra a la mitad de la distancia fuente-receptor. Se llama punto profundo común o CDP (Common Deep Point) su proyección a profundidad. El reordenamiento consiste en agrupar las trazas que debido a su geometría pertenecen a un mismo punto medio entre

una fuente y un receptor determinado, presentando un aspecto hiperbólico dado por el incremento en la distancia y aumento en los tiempos de tránsito (Figura 24).

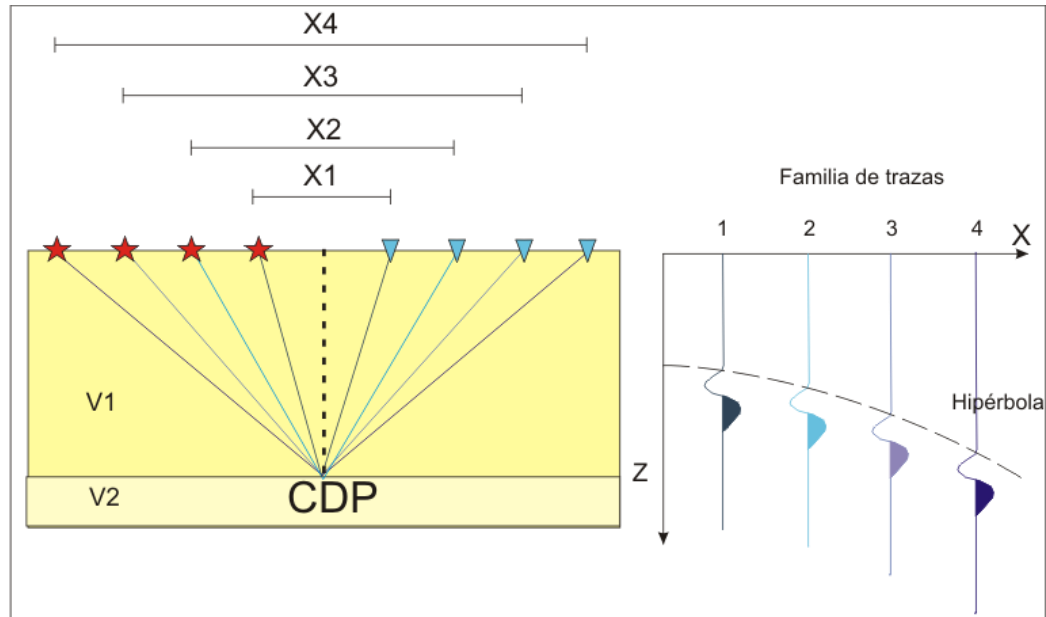


Figura 24. En la imagen se muestra del lado izquierdo las trazas con la misma información de un punto en profundidad, a la derecha como se va registrando debido a la distancia.

2.2.2.2 Análisis de velocidad.

La finalidad de este análisis es obtener las velocidades más exactas posibles del medio en el que se propaga la onda. Para realizar este análisis, el software despliega una imagen en la que muestra la información de semblanza, un panel de CDP's apilados por offset común, la corrección dinámica por NMO y un apilado en este caso de 14 CDP's, lo cual permite hacer un "picado" más acertado de las reflexiones registradas. A su vez, es importante mantener la coherencia entre las velocidades seleccionadas en los diferentes paneles de semblanza a lo largo de la línea (Figura 25).

Ya finalizada la selección de velocidades de todos los CDP's elegidos, el software interpola los valores de velocidades entre los puntos de control, desplegando una imagen con iso-velocidades mostrando la tendencia a lo largo de los CDP's y en caso de ser necesario podrá ser editada para "suavizar" los cambios de velocidades bruscos (Figura 26).

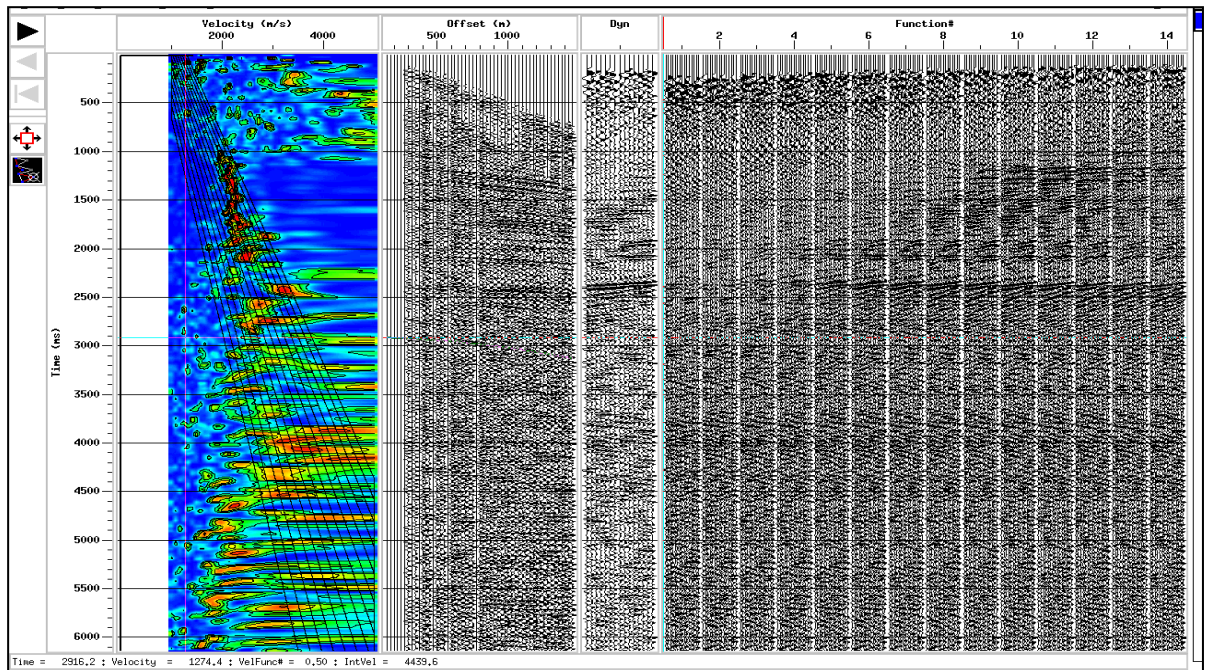


Figura 25. Diferentes páneles que despliega ProMAX para el análisis de velocidad. El primer panel es el de semblanza, el siguiente indica los CDP's a corregir, el tercero nos sirve para observar la corrección del NMO y el cuarto es técnica de velocidad constante donde se muestra un grupo de 10 CDP's repetidos 14 veces, en cada grupo se aplica una velocidad diferente que va de los 1000 a 5000 m/s.

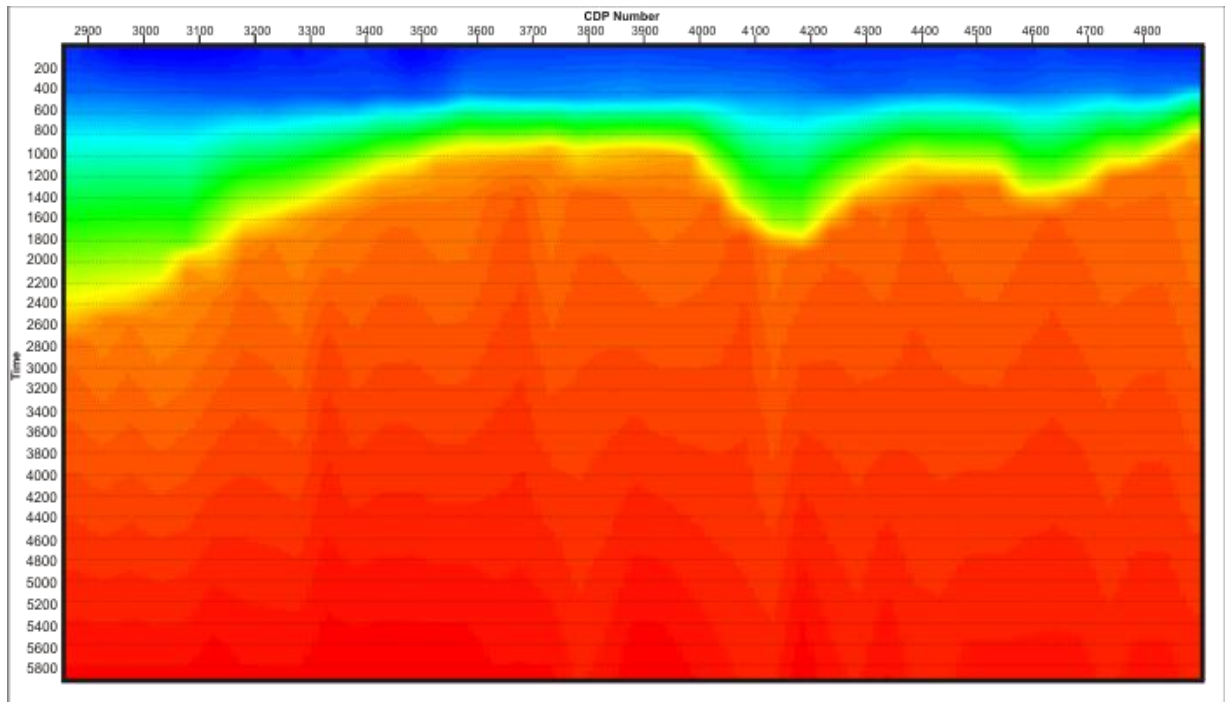


Figura 26. Imagen del editado de velocidades.

2.2.2.3 Corrección por NMO.

La corrección por NMO (Normal Moveout, por sus siglas en inglés) consiste en eliminar el efecto hiperbólico de los reflectores, en cada uno de los registros, como consecuencia de los diferentes tiempos de llegada debido a las distancias entre fuentes y receptores con la finalidad de realizar la suma o apilamiento de las trazas ordenadas por CDP. Para llevarlo a cabo, se utiliza un modelo de velocidades del subsuelo (obtenido en el análisis de velocidad) para ubicar los reflectores en la posición en la que se encontrarían al momento de tomar los datos si el offset hubiese sido igual a cero. Si el modelo es correcto, los registros resultantes tendrán reflectores en posición horizontal (considerando capas planas).

2.2.2.4 Apilamiento.

Al dejar las reflexiones simples en fase y desfasados los ruidos tanto superficiales como profundos, se suman las trazas pertenecientes a un mismo CDP, mejorando la relación señal/ruido, atenuando ruidos (debido a que la suma resulta destructiva en eventos no hiperbólicos) y resalta la señal (se suman constructivamente en la traza CDP). En esta etapa ya se obtiene una sección sísmica interpretable, que aún no es definitiva (Figura 27). La sección, por lo tanto, se constituye de trazas-suma, cada una de las cuales es una serie temporal de valores de amplitud, muestreados cada 2ms.

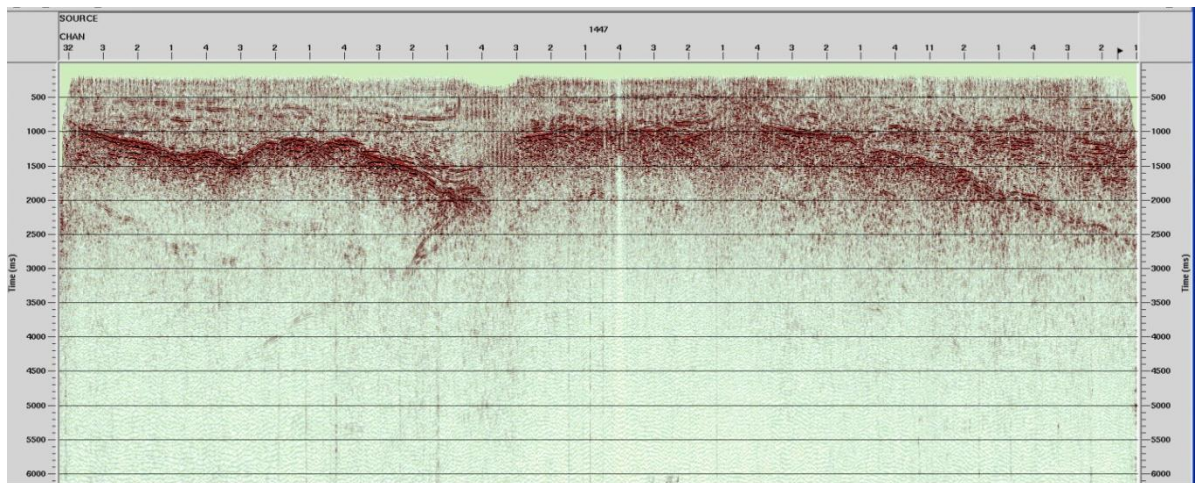


Figura 27. Apilado por CDP de una de las líneas de este trabajo. Primer imagen coherente del subsuelo. Trazas corregidas por NMO.

2.2.3 Post-Apilamiento (Post-stack).

Es la última etapa del procesamiento. Si se realizó una adecuada adquisición de datos en campo así como buen procesamiento, la sección apilada tendrá una relación señal/ruido alta y solo será necesario aplicarle algún tratamiento post-stack muy básico; pero si la sección apilada presente una baja

resolución de los reflectores, es decir, baja energía de los mismos, es necesario realizar un procesamiento más severo que mejore la resolución de la sección, ya que de ella depende la imagen final obtenida en la que se espera obtener una sección sísmica que asemeje, lo mejor posible, la disposición geológica del subsuelo (Teixidó, 2000).

2.2.3.1 Divergencia Esférica.

Este algoritmo recupera las amplitudes perdidas por la disminución de la energía de la onda respecto a la distancia y absorción de los materiales. Los parámetros requeridos, que se encuentran en función de la velocidad, son diversos pares de tiempo-velocidad, tomando en cuenta que para una velocidad constante la amplitud atenuada es inversamente proporcional a la distancia desde el punto de tiro (Sheriff, 1995; Yilmaz, 1987).

2.2.3.2 Filtro variable en tiempo.

A medida que aumentan los tiempos de llegada de la señal sísmica, el espectro de frecuencias del registro va decreciendo, es decir, las frecuencias de los eventos de interés van variando en el tiempo y para poder separarlos de los no importantes se recomienda aplicar un Filtro Paso-Banda Variable en el Tiempo para tomar en cuenta la variación respecto al tiempo. Este filtro elimina en su mayoría los trenes de ondas no deseados (ej. Onda aérea y ground roll). Los filtros pasa-banda utilizados fueron del tipo Ormsby utilizando en promedio los siguientes tiempos y frecuencias:

Tiempo (ms)	Frecuencias (Hz)
0-2500	12-15-70-80
2500-3500	12-15 -60-70
3500- 6000	10-15-50-60

2.2.3.3 Control automático de ganancia.

Es una función de ganancia que trabaja mediante el cálculo del promedio o el promedio del cuadrado de la amplitud de cada traza por medio de una ventana en tiempo para obtener un escalar mediante su valor RMS deseado y el promedio calculado, que será aplicado posteriormente a la sección de cada traza CDP que se encuentre dentro de la ventana. Es muy utilizada debido a que realza las amplitudes, pero se recomienda aplicarla casi al final, ya que se haya recuperado las amplitudes con otros algoritmos, ya que en zonas con amplitudes muy grandes el AGC (Automatic Gain Control, por sus siglas en inglés) crea una zona de sombra con lo que se pierde información. En este trabajo se utilizó el parámetro MEDIAN 300.

2.2.3.4 Migración.

Es la etapa que permite llevar los eventos buzantes a su verdadera posición en espacio y tiempo. Además ayuda a colapsar las difracciones que se originan por las discontinuidades abruptas en el medio por donde se desplaza la energía sísmica. No es muy necesario en caso de que las interfaces del subsuelo sean horizontales (Figura 28a), pero es importante cuando existen buzamientos (Figura 28b). Con sísmica 2D suele haber cierta incertidumbre en los parámetros de migración debido al desconocimiento de las componentes de buzamiento laterales a la línea de adquisición sísmica, por lo que las imágenes finales pueden resultar desenfocadas.

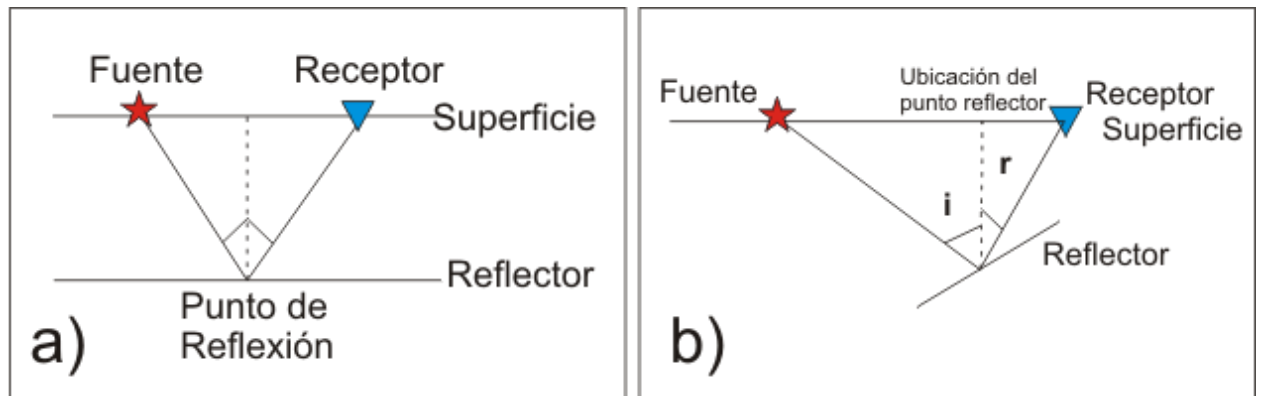


Figura 28. Punto de reflexión: a) con reflector horizontal, b) con reflector inclinado.

Existen varios métodos de migración, para este trabajo se hicieron pruebas con los siguientes (Figura 29):

- * Migración de Kirchhoff : Coloca el punto difractor en su posición verdadera.
- * Migración FK (método Stolt): busca mejorar las variaciones de velocidades verticales, estrechando el eje del tiempo antes de la migración, para hacer que los eventos reflectivos aparezcan como si hubiesen sido adquiridos en un medio de velocidad constante.

Después de probar con ambos métodos, se obtuvieron mejores resultados con la migración de Stolt.

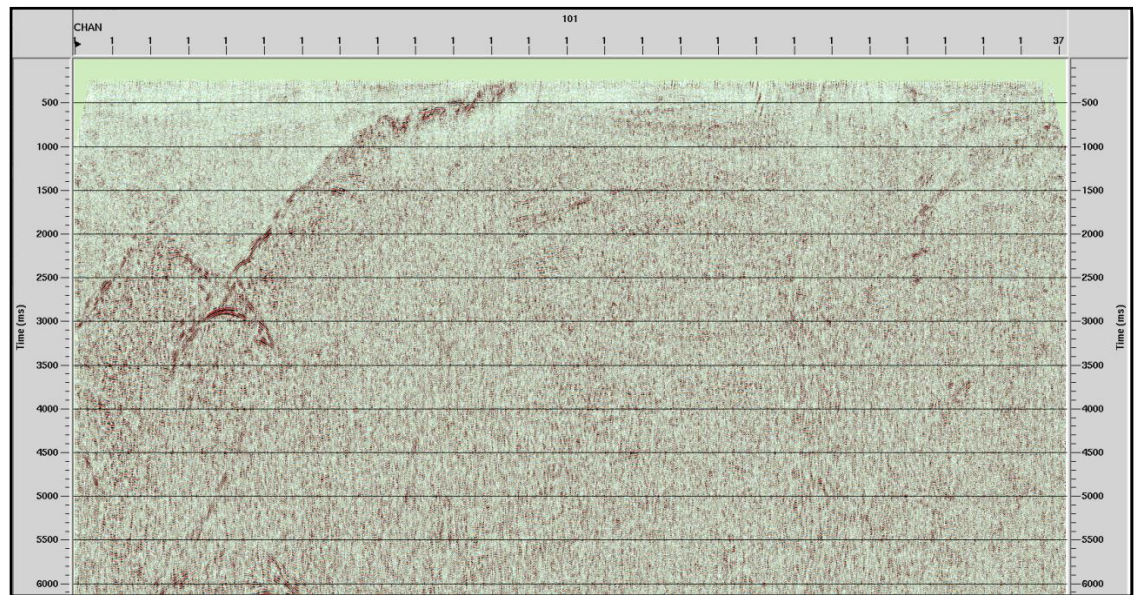


Figura 29. Se muestra un nudo de corbata debido a las difracciones de la onda. Imagen sin migrar.

2.2.3 .5 Conversión a profundidad.

Para realizar este proceso es necesario conocer la distribución de velocidades en el área de estudio, en este caso es el modelo generado a través del análisis de velocidad, para poder convertir los tiempos dobles en que se encuentran la información de reflectores y estructuras geológicas a una profundidad aproximada. Para una mejor conversión, se requiere disponer de registros de pozos. En este trabajo se realizó esta conversión al momento de migrar.

Capítulo 3. Resultados

La interpretación de las líneas sísmicas procesadas y convertidas en profundidad consistió en la identificación, configuración y descripción de reflectores sismoestratigráficos, del basamento acústico, de estructuras de falla y sus zonas de deformación, pliegues y acuíferos. En esta sección se describen las secciones sísmicas procesadas y se reconocen los rasgos estructurales y estratigráficos de esta zona del delta del Río Colorado.

En las secciones con dirección NE-SW se identificó la falla Cerro Prieto y las fallas Pangas Viejas (PV), Indiviso-S (FI-S) y Mesa (FM) (Chanes-Martínez, 2012).

Los perfiles convertidos en profundidad con dirección NW-SE proporcionan información de una posible estructura, hasta ahora desconocida relacionada al cambio de dirección en la sismicidad en esta zona (Figura 11). La correlación del basamento acústico mostró una profundidad mínima de ~470 m la parte más cercana a la sierra Las Pintas y máxima 2800 m hacia el este. La mejor resolución en las imágenes sísmicas se observa entre los 500-3000 m de profundidad, aunque en el perfil 5056 se observa un fuerte reflector a partir de los ~4500 m. Datos del pozo W-3 propiedad de PEMEX que corta el basamento a una profundidad de ~4260 m (Pacheco et al., 2006) son consistentes con la profundidad del basamento acústico obtenido con las velocidades de apilamiento utilizadas en el procesamiento de las líneas sísmicas (Figura 37).

3.1 Secciones Sísmicas.

Las secciones 5056, 5060 y 5064 tienen un rumbo NW-SE, con una separación de aproximada de 7 Km entre sí, mientras que los perfiles 4987, 4989-1 y 4989-2 con una orientación NE-SW tienen una separación aproximada de 5 Km.

Todos los perfiles se muestran con una escala 4:1 y se describen a continuación de manera individual.

3.1.1 Sección 5064.

La línea sísmica 5064 se conforma de dos segmentos, los cuales se pegaron cerca del CDP 5000 para interpretarlos como una sola sección (Figura 30). Esta línea sísmica se encuentra al poniente de la zona de estudio, y tiene un rumbo N33°W y una longitud total de 54 km.

En este perfil, el basamento solo puede observarse de la parte central hacia el SE, donde alcanza una profundidad de entre 2500 a 3000 m. Del centro al extremo NW de la sección, el basamento se encuentra a una menor profundidad (entre 500 y 1000 m), pero debido a la baja resolución en este sector del perfil no puede distinguirse claramente. (Figura 30). La profundidad del basamento se correlaciona de forma aceptable con las profundidades reportadas para este por las líneas de Chanes-Martínez (2012) que cortan transversalmente esta línea, en su sector noroeste.

Se interpretaron dos fallas, de tipo normal con caída al SE ubicadas hacia el norte, pero la estratigrafía hacia el sur muestra reflectores lateralmente continuos y no hay evidencia de fallamiento importante, observándose una continuidad casi horizontal en los reflectores en el sector SE de las líneas sísmicas (figuras 30 y 31). Hacia el noroeste el basamento se vuelve más somero y las líneas sísmicas muestran acuñamientos y cambios laterales de facies

sísmicas de formas lenticulares. Esta transición lateral se interpreta como de depósitos deltaicos intercalados con depósitos de abanicos aluviales de la Sierra Las Pintas limitados lateralmente por los depósitos de supramarea.

Como se mencionó anteriormente, el basamento se vuelve más somero hacia el NW de la sección, esto es debido a que es el sector más cercano a la Sierra Las Pintas y en caso de encontrarse a menos de 500m de profundidad no puede observarse ya que la adquisición de los datos es con fines petroleros, por lo que la información a profundidades someras no son registradas.

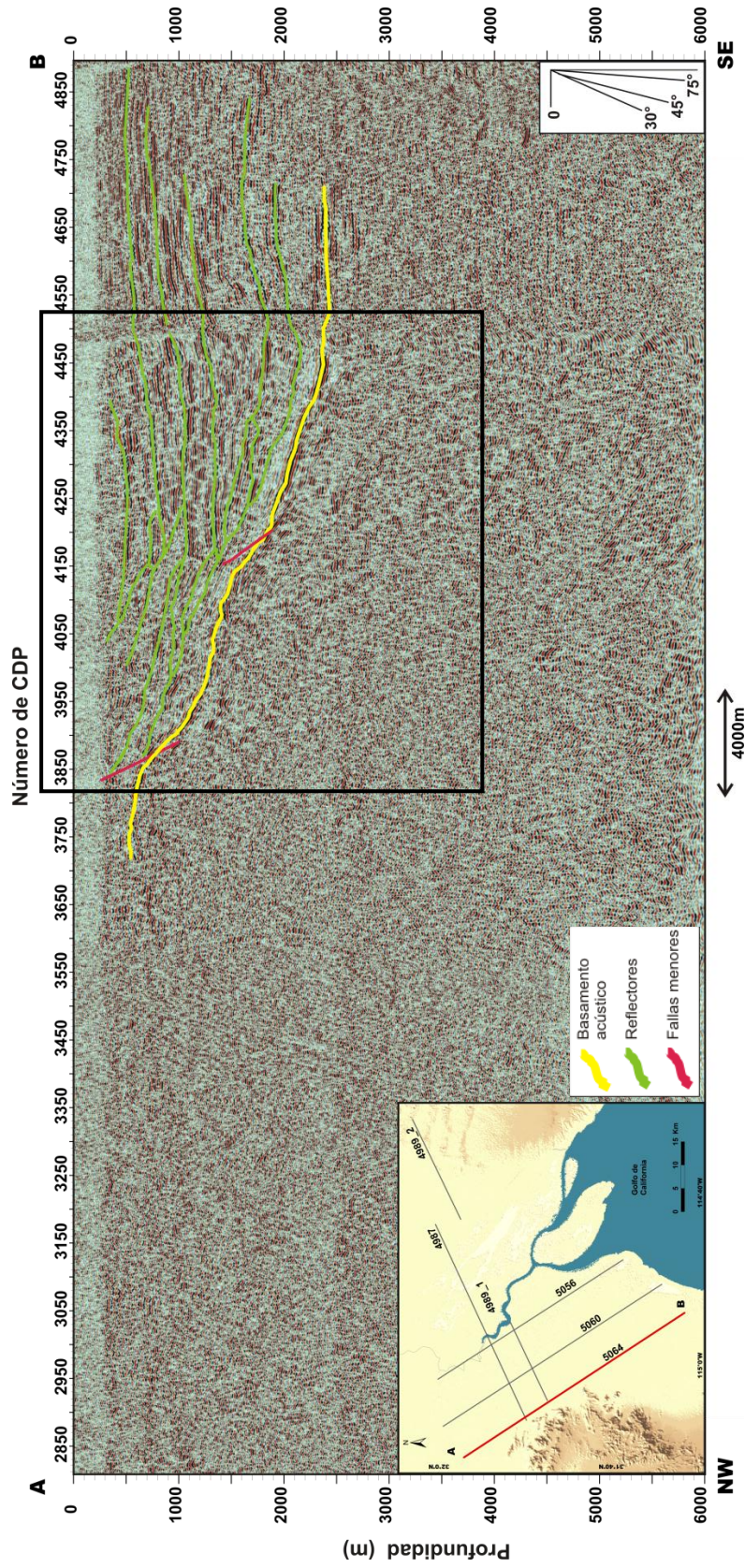


Figura 30 Perfil A-B interpretado de la línea 5064. Líneas delgadas en verde representan facies sedimentarias. En recuadro negro se encierra el sector de la imagen al que se realizará un acercamiento (Figura 31).

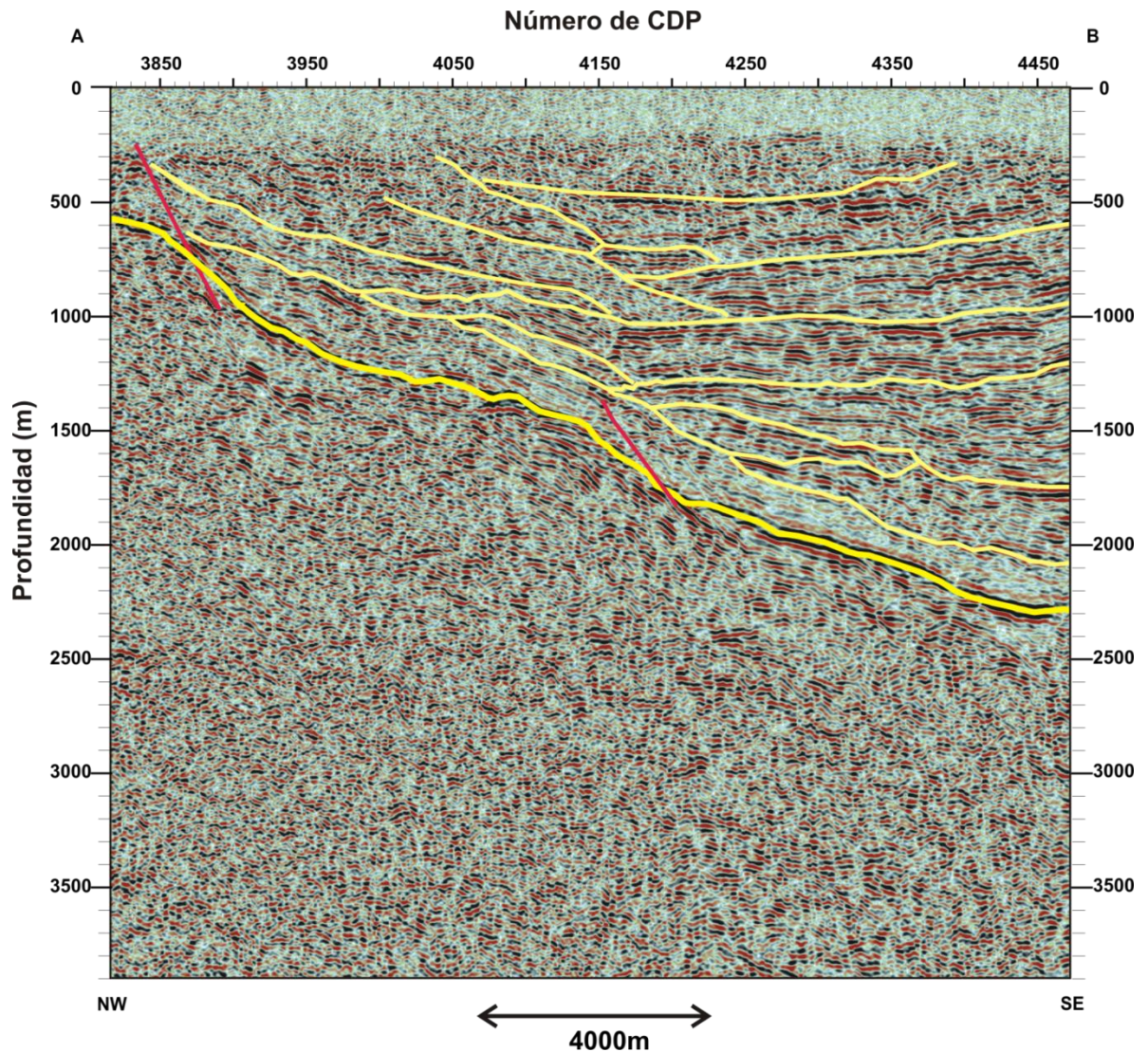


Figura 31 Acercamiento del perfil A-B de la línea 5064. Se observa pequeños acuñamientos y cambios laterales de facies de depósitos deltaicos y abanicos aluviales de la Sierra Las Pintas.

Por debajo de los 2500 m no existen eventos coherentes debido a la presencia de rocas cristalinas que solo dejan pasar una pequeña porción de la energía sísmica, no obstante el perfil muestra que la cuenca se profundiza a hacia el SE hacia la cuenca de Wagner en el Golfo de California.

3.1.2 Sección 5060.

La línea sísmica 5060 también presenta una orientación N33°W, con una longitud de 52 km. En esta sección se identificaron mayor cantidad de fallas (Figura 32). En el extremo SE el basamento profundiza y en la zona central disminuye su profundidad ligeramente. Entre los CDPs 3375 y 4100 hay una interrupción en el trazo del basamento, pero en estas zonas se vuelve difusa la información. Esto puede interpretarse como zona de fallamiento donde la energía se dispersa a través de las falla. Entre los CDP's 3590 y 3650 el basamento tampoco se observa continuo, pero indica una tendencia a subir. Sobre éste los reflectores están ligeramente plegados.

En el extremo sur del perfil, la profundidad del basamento y el espesor de los sedimentos se incrementa hacia la región de la Cuenca Wagner (Figura 32). En esta sección la profundidad del basamento se correlaciona de forma aceptable con la profundidad reportada en las líneas de Chanes-Martínez (2012), que cortan transversalmente la línea 5060 en su sector noroeste.

Con respecto a la sección 5064, aquí se observa casi en su totalidad el basamento, debido a que de poniente a oriente los perfiles van acercándose a la Cuenca Montague con lo que el basamento se encuentra a mayor profundidad que la línea descrita anteriormente. Se observa una mayor cantidad de fallas de tipo normal, siendo la mayor de esta sección la que comienza en el CDP 4000 con un desplazamiento vertical de ~800m y caída hacia el norte. No se observa una tendencia en buzamiento de las fallas. Los reflectores marcados con líneas en verde son rasgos con mayor impedancia acústica y mantienen un comportamiento casi horizontal en su zona más septentrional y hacia el sur tiene comportamiento similar a la línea 5064, donde se observan algunas facies, indicando la interacción entre los depósitos deltaicos y aluviales.

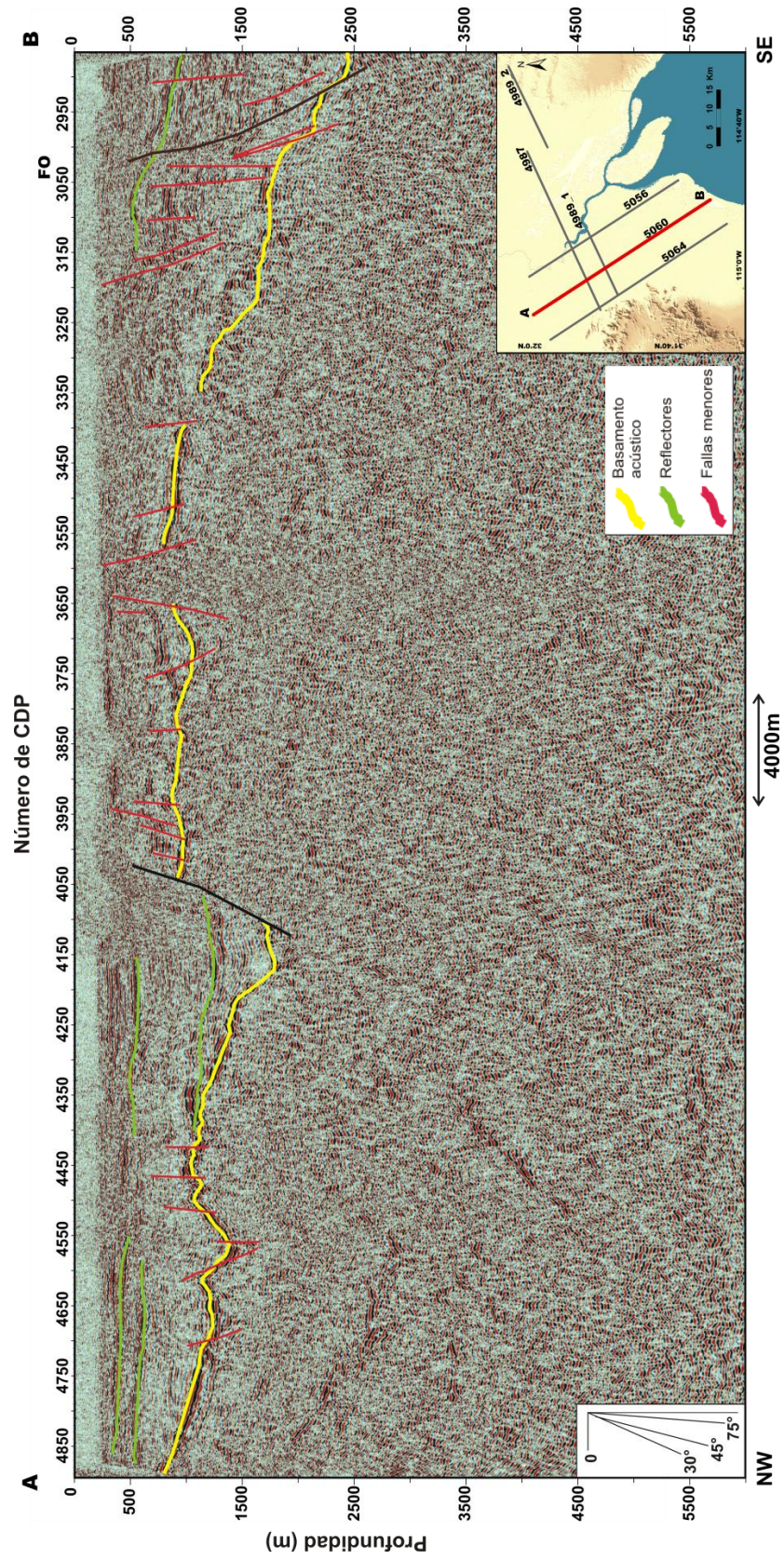


Figura 32 Perfil A-B interpretado de la línea 5060. En el CDP 4000 se observa una falla normal con caída al norte, la cual muestra un desplazamiento vertical del basamento acústico de alrededor de 800m. FO= Falla Ometepepec.

Se puede observar una estructura lístrica hacia la parte sureste del perfil a la que se le ha designado el nombre de Falla Ometepepec (FO) y que más adelante se mencionara. Dicha estructura resulta de importancia ya que pudiera ser el límite suroeste de la cuenca Montague o tuviera que ver con el límite noroeste de la Cuenca Wagner.

3.1.3 Sección 5056

La sección sísmica 5056 mantiene una orientación N33°W y una longitud de 45 km. El basamento acústico se define bien (Figura 33) y se observa que en los extremos la profundidad es menor respecto al centro del perfil. Respecto a los perfiles 5064 y 5060, el perfil 5056 muestra un basamento acústico a mayor profundidad, que bordea la Cuenca Montague (Chanes-Martínez, 2012).

La falla que controla la pequeña cuenca entre los CDPs 4400 y 4600 se ubica debajo de la zona en donde se define el cambio el alineamiento de las réplicas del sismo de 2010 en la falla Indiviso (Figura 11). El número de fallas es mayor en esta línea a comparación de las anteriores, especialmente en el extremo sur del perfil. En la zona central las fallas son más escasas.

La imagen sísmica obtenida no permite ver por arriba de los ~500 m, por lo que no se puede definir cuales fallas se encuentra más cerca de la superficie.

Las líneas en verde, indican el comportamiento de algunos reflectores, donde se puede apreciar que no son horizontales. Es de particular interés un reflector de gran amplitud que se encuentra a mayor profundidad de la sección (~4500 m).

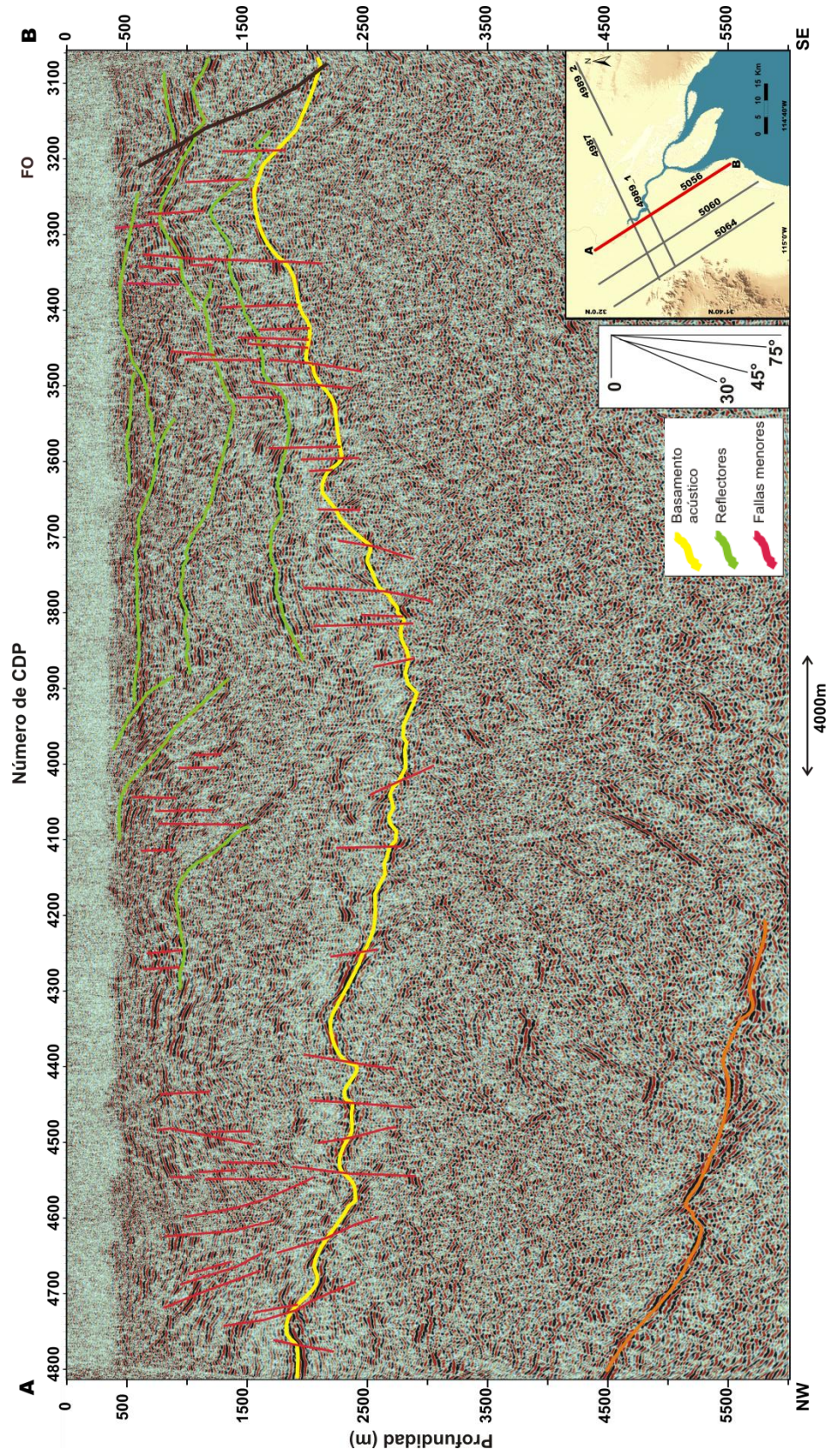


Figura 33 Perfil A-B interpretado de la línea 5056. Al NW de la sección puede observarse el basamento acústico profundo que se define como basamento B en este trabajo. FO= Falla Ometepec.

Este reflector profundo difiere en algunos rasgos del reflector somero que interpretamos como basamento acústico. Se decidió considerarlo ya que este basamento acústico profundo podría ser un paquete de roca diferente. La profundidad de este reflector coincide con la profundidad del basamento granítico reportado en el pozo W-3 de PEMEX (Pacheco *et al.*, 2006), el cual reportó roca ígnea intrusiva a ~4300 m. El reflector sísmico profundo identificado en esta línea sísmica se define como basamento B. Este perfil y la línea 5060 muestran la orientación de una nueva falla de nombre falla Ometepepec.

3.1.4 Sección 4987

La línea sísmica 4987 se conforma de dos segmentos, los cuales fueron pegados cerca del CDP 890. Esto permitió obtener un perfil continuo con una orientación N64°E y una longitud total de 41 km.

En este perfil el basamento acústico solo se observa en la parte poniente, iniciando a una profundidad aproximada de 400 m, pero es posible que continúe ascendiendo hacia el SW hasta aflorar en la Sierra Las Pintas. Hacia el otro lado, se va profundizando al NE de la sección, alcanzando una profundidad de ~3000 m., perdiendo su trazo hacia el CDP 870, donde Chanes-Martínez (2012) indica la presencia de la falla Indiviso-S. Del centro hacia el oriente de la sección ya no se alcanza a distinguir el basamento, pero sí un reflector (anaranjado), el cual podría indicar la cima de la secuencia de lodolita y arenisca intercalada descrita por Pacheco *et al.*, (2006).

Las líneas en verde indican el comportamiento caótico de algunos reflectores que se encuentran a menos de 1000 m de profundidad; no se puede observar claramente su continuidad lateral debido a la baja resolución de la imagen.

La mayor cantidad de fallas se observan en el sector SW de la sección y además se encuentran las cuatro estructuras mayores reportadas en Chanes-Martínez (2012) a lo largo de su sección sísmica 4985. De SW a NE se observan las estructuras interpretadas como falla Pangas Viejas (PV), falla Indiviso-S (FI-S), falla Mesa (FM) y falla Cerro Prieto (CP). Ésta última se encuentra en el CDP 1580, con una inclinación casi vertical y corta algunos reflectores superficiales, pero a profundidad la imagen se ve difusa posiblemente se debe a que la falla genera una zona de deformación en donde la señal se pierde por la dispersión de la energía en las fracturas de la roca.

Una cuenca que se encuentra limitada al NE por un alto estructural controlado por la falla Pangas Viejas se observa entre los CDP's 470 – 730. La falla Pangas Viejas es una falla lístrica y al occidente de esta falla, puede observarse una estructura que parece controlar la caída del basamento entre los CDP's mencionados. Esta nueva falla se propone en este trabajo como falla Yurimuri, con una orientación NW-SE. Dicha estructura es una falla mayor, la cual tiene una inclinación hacia el NE y un echado aparente de $\sim 60^\circ$. Esta estructura se pudo correlacionar con una estructura observada pero no interpretada en los perfiles sísmicos de Chanes-Martínez (2012), siendo una estructura con una longitud aproximada de 22 km y se localiza al oeste de la Falla Pangas Viejas. El basamento acústico al oeste de la falla se encuentra a ~ 700 m de profundidad y cae hasta los ~ 2500 m de profundidad a través de esta zona de falla en una distancia de 4 km en la horizontal. . Esta estructura y la falla Pangas Viejas escalonan el basamento que se va profundizando hacia la cuenca Montague.

Se puede observar que entre los CDP's 700 -1000 la configuración de los reflectores tienen una inclinación hacia el SW formando una estructura de abanico tipo "rollover". Esta estructura indica una zona de extensión al oeste de la falla Cerro Prieto.

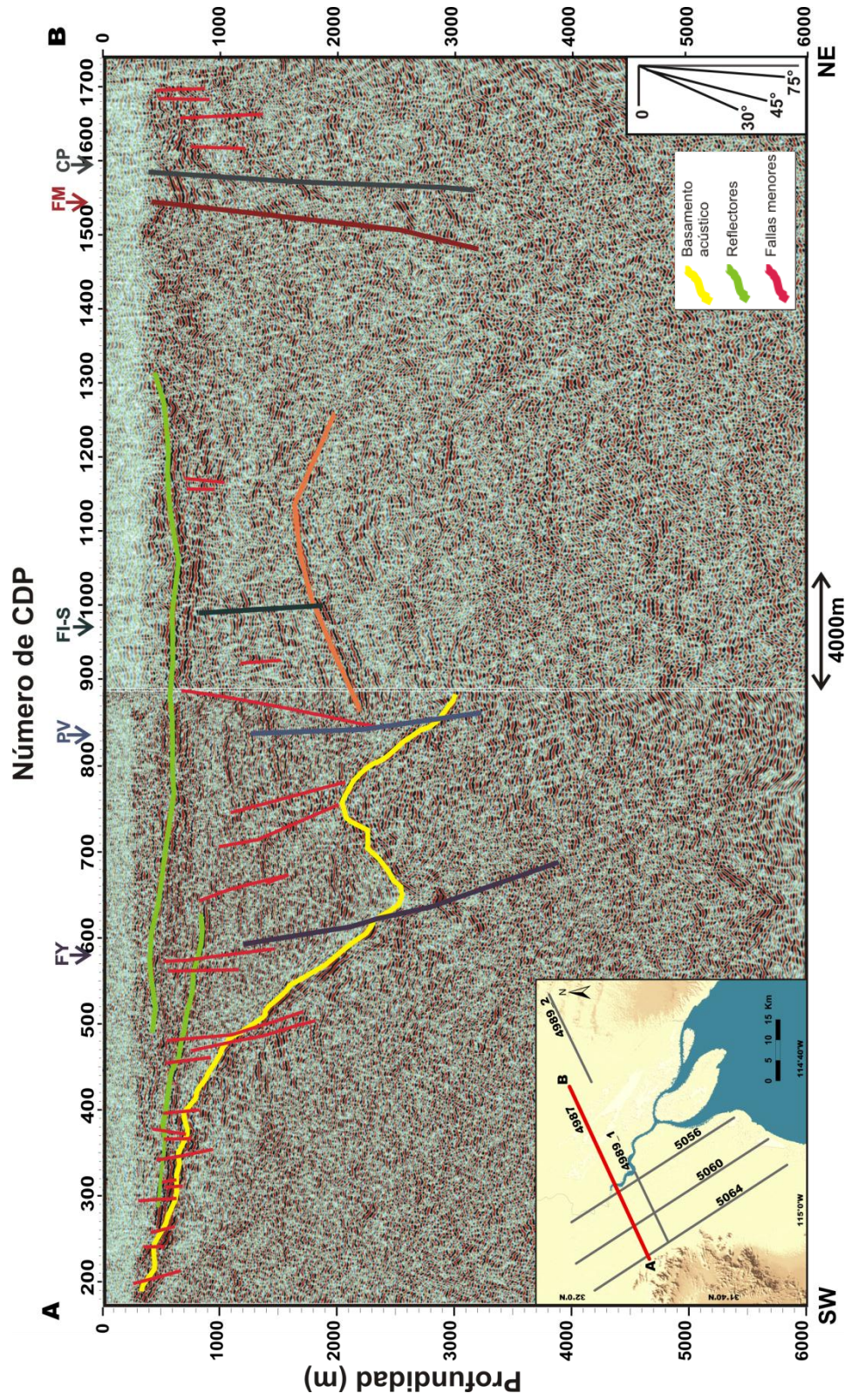


Figura 34. Perfil A-B interpretado de la línea 4987. En color anaranjado se indica un horizonte que posiblemente podría indicar la cima de una secuencia estratigráfica (Pacheco et al., 2006), en rojo las fallas geológicas menores y en colores distintos fallas mayores que se observan en este trabajo y que ya han sido descritas anteriormente, siendo de SW a NE: Falla Yurimuri (FY), Pangas Viejas (PV), Falla Indiviso-S (FI-S), Falla Mesa (FM) y Falla Cerro Prieto (FCP) (Fonseca-López, 1982; Chanes-Martínez, 2012).

3.1.5 Sección 4989

Esta sección consta de dos segmentos con una orientación N64°E. La sección 4989_1 tiene una longitud de 16 km y la sección de 4989_2 de 20 km. En el perfil 4989_1 (Figura 35.a), se indica el basamento acústico en toda la sección, profundizando de SW a NE. El basamento más somero se encuentra cercano a la Sierra Las Pintas y lo más profundo se ubica hacia la Cuenca Montague.

El perfil muestra algunas fallas menores, en el CDP 2380 se identifica una falla mayor de aspecto lítrica que se correlacionó con la falla Yurimuri (FY). Con esta correlación la FY tiene un buzamiento al NE y echado aparente de $\sim 75^\circ$, y se encontraría al poniente de falla Pangas Viejas, pero esta última no se observa en la debido a que no se tiene la información de ese sector. En este perfil el rollover que se indica en la sección 4987 no se pudo identificar debido a la baja calidad de la imagen y a que los dos segmentos de línea se encuentran separados y no se puede ver la continuidad lateral de los reflectores.

El segmento 4989_2 se ubica parcialmente sobre la cuenca de Altar (Figura 35.b) y se observan dos fallas mayores que separan la zona de deformación activa al oeste y la cuenca abandonada al este. Interpretamos que la falla Mesa (FM) y la falla Cerro Prieto (FCP) se ubican en la parte oeste del perfil y son consistentes con su ubicación anteriormente propuesta (c.f. Fonseca-López, 1982; Chanes-Martínez, 2012). Hacia la parte SW de la sección los horizontes sismoestratigráficos son difusos, mientras que al NE del perfil se identifican reflectores semi-continuos con tendencia horizontal que marcan el relleno de la cuenca de Altar de edad Mioceno Tardío-Plioceno (Pacheco *et al.*, 2006; Pérez-Tinajero, 2007).

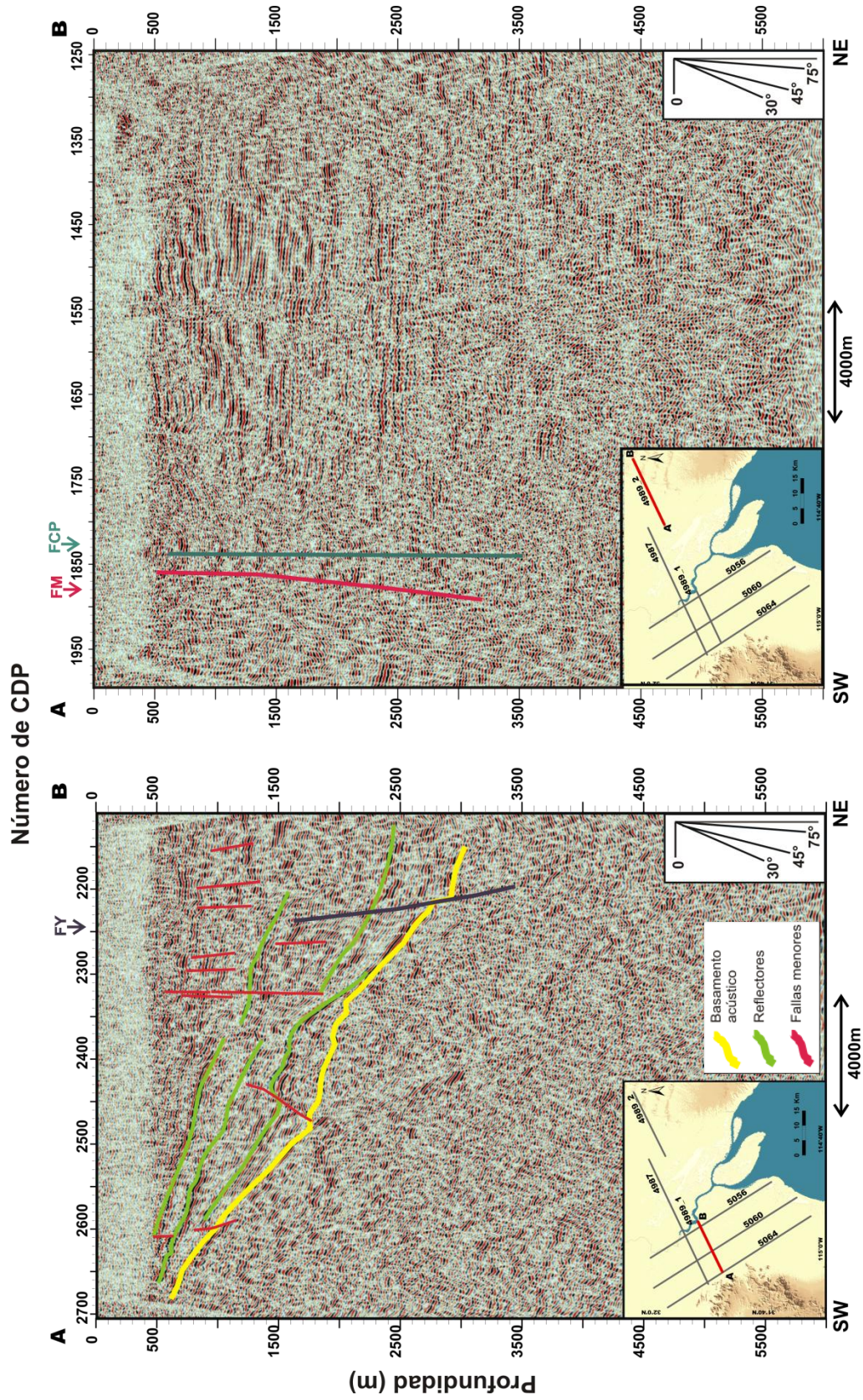


Figura 35. a) Perfil 4989_1. Se indica la caída del basamento hacia el NE. En color morado la Falla Yurimuri (FY). b) De SW a NE se encuentran las fallas mayores: Mesa (FM) y Cerro Prieto (CP) (Fonseca-López, 1982; Chanes-Martínez, 2012). Esta imagen indica que el basamento acústico es más profundo en este sector de la zona de deformación.

3.2 Mapa de anomalías gravimétricas.

Para realizar una correlación con la interpretación de las estructuras a partir de los perfiles sísmicos, se utilizó una malla de datos de anomalía de Bouguer en miligales (mgal) proporcionados por PEMEX (Figura 36).

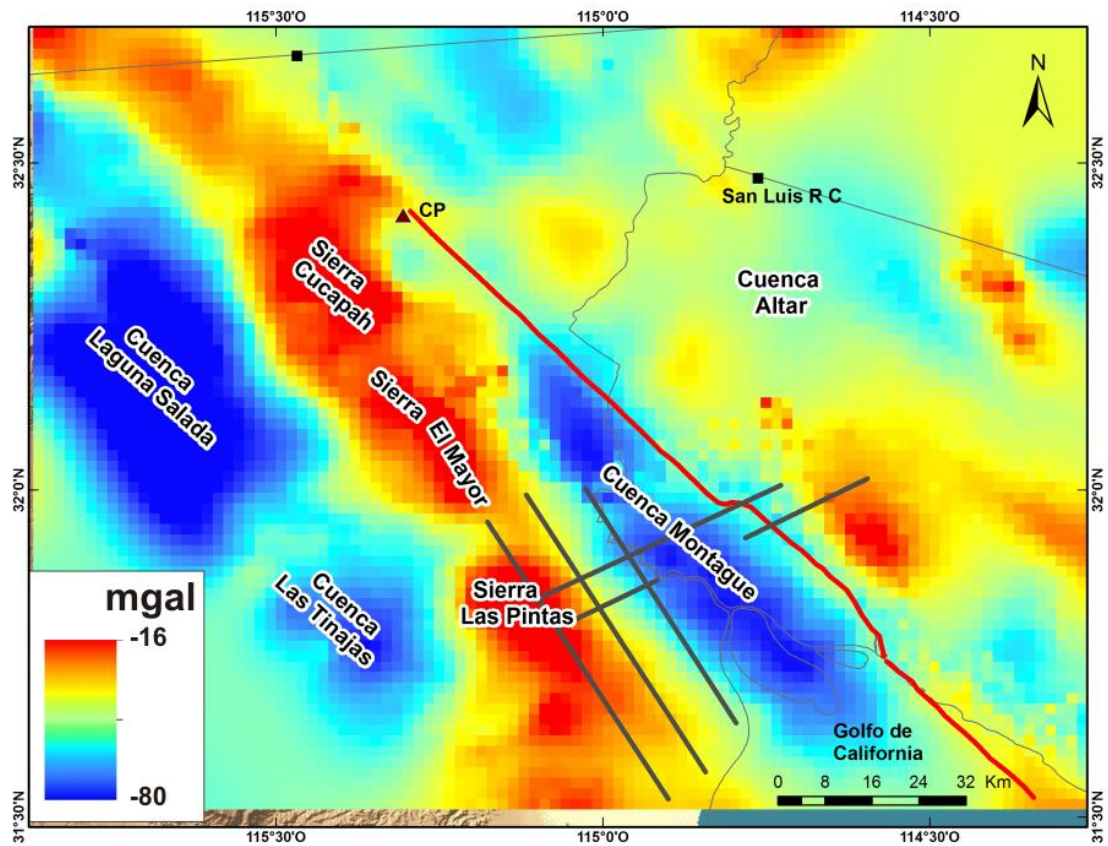


Figura 36. Mapa de anomalía de Bouguer en la región del delta del Río Colorado y Altar elaborado con una malla de datos de anomalía de Bouguer proporcionados por PEMEX. En rojo se indican los valores altos de gravimetría y en azul los valores bajos. Las líneas negras indican las secciones sísmicas interpretadas en este trabajo. CP= Volcán Cerro Prieto. La línea roja indica el trazo de la falla Cerro Prieto.

En la Figura 36 se observa que las anomalías positivas al poniente de la zona de estudio corresponden a las Sierras Cucapah, El Mayor y Las Pintas, mientras que las anomalías negativas indican al poniente de estas sierras las

cuencas Laguna Salada y Las Tinajas, mientras que al oriente se encuentran las cuencas Montague y Altar. La tendencia regional de las anomalías indica una orientación NW-SE y están controladas por falla mayores, como la falla Cerro Prieto en el margen oriental de la anomalía negativa de la cuenca Montague.

Con la anomalía de Bouguer se elaboraron con el programa Surfer 11 los perfiles sobre las secciones sísmicas. Los perfiles con dirección NW-SE se muestran en la figura 37.

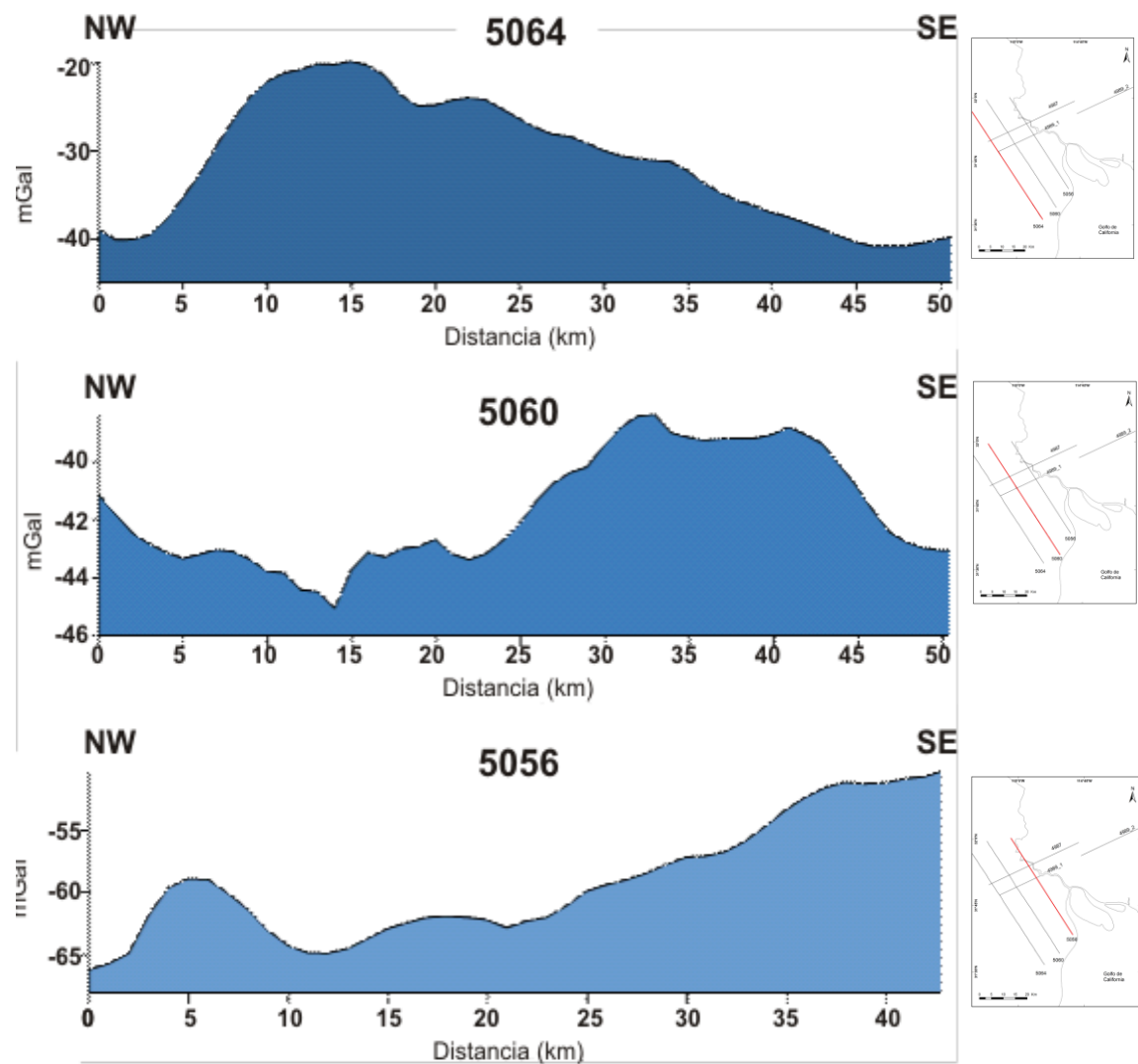


Figura 37. Perfiles gravimétricos de las secciones longitudinales NW-SE, 5064, 5060 y 5056. Datos proporcionados por PEMEX.

Al observar los perfiles de anomalías en dirección NW-SE, podemos observar lo siguiente:

En la sección 5064 la anomalía positiva (aprox. -20mgal) del lado izquierdo (NW), indica que el basamento estaría más somero en esa dirección lo cual se explica debido a que bordea Sierra Las Pintas. Por otro lado la anomalía negativa ($\sim$ -40mGal) indica un bajo al SE que coincide con el incremento en la profundidad del basamento hacia el Golfo de California.

En la sección 5060 se observa un bajo gravimétrico al noroeste (izquierda) de $\sim$ -45 mgal) y un alto hacia la derecha ($\sim$ -38 mgal). La diferencia de 7 mgal aunque no es mucha, nos indica que hacia el SE se puede interpretar como una posible influencia de la raíz de Sierra las Pintas, la cual en esa línea podría presentar el basamento un poco más somero, mientras que en hacia el NW del perfil se podría explicar que la raíz de la sierra profundiza en algún punto entre las secciones 5064 y 5060 teniendo mayor cantidad de sedimentos sepultándolo. Esto es consistente con lo observado en dichas líneas sísmicas.

En la sección 5056 se muestra una tendencia similar a lo observado en la sección sísmica. La anomalía varía entre $\sim$ -48 a -67 mgal, de SE a NW respectivamente. Se esperaría que al continuar este perfil hacia el SE el basamento profundizara debido a su cercanía con la cuenca Wagner, pero puede observarse un alto en el perfil gravimétrico indicando un cuerpo con mayor densidad en esa zona.

Las secciones de orientación NE-SW proporcionan información a través de la zona de deformación (Figura 38, secciones NE-SW).

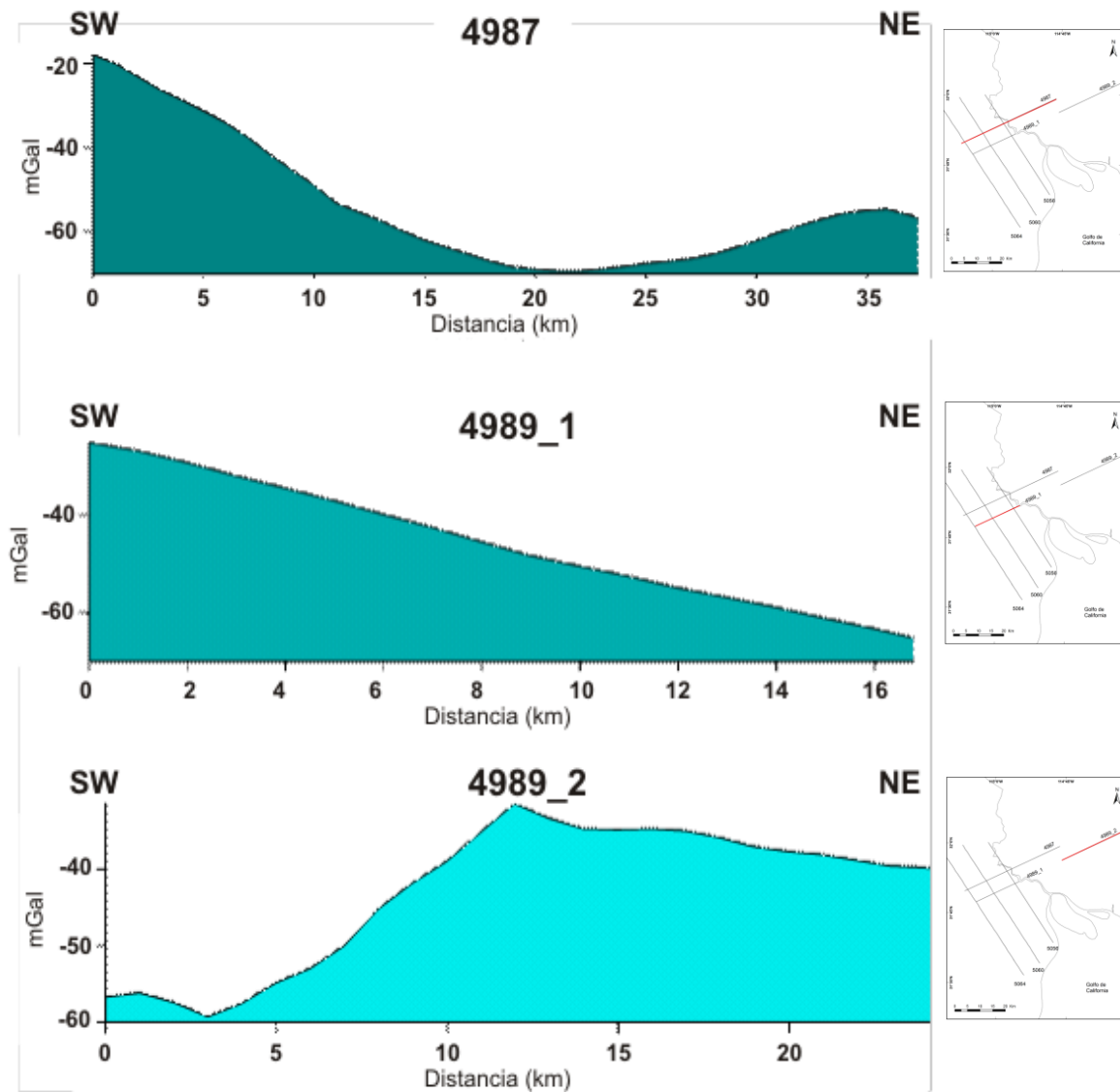


Figura 38. Perfiles gravimétricos de las secciones longitudinales NE-SW, 4987, 4989-1 y 4989-2. Datos proporcionados por PEMEX.

De la sección 4897 la anomalía al NE tiene valores de ~ -18 mgal y disminuye al centro del perfil a -70 mgal con un ligero incremento y al SW con -50 mgal. Esto indica que el basamento se encuentra a mayor profundidad hacia el centro de la sección y coincide con la ubicación de

la cuenca Montague. Hacia el poniente se tiene en superficie la sierra Las Pintas, lo que explicaría el alto gravimétrico en esa dirección.

En la sección 4989_1 los datos de gravimetría descienden hacia el NE del perfil, que al igual que el perfil anterior indica la anomalía negativa (~ -65 mgal) hacia el NE que produce la cuenca Montague. Al SW la anomalía es menor y alrededor de -25 mgal hacia la Sierra Las Pintas.

De la sección 4989_2 se observamos que el perfil se encuentra en el límite oriental de la anomalía negativa, lo que coincide con la cuenca Montague, y un basamento más profundo del lado SW de la sección. Hacia el NE al oriente de la falla Cerro Prieto la anomalía muestra un alto en una zona muy localizada de la cuenca de Altar. Esta anomalía se presenta en una zona profunda de la cuenca, ya que el pozo W-4 de PEMEX situado al sur cortó más de 5000 m de sedimentos sin llegar al basamento.

El pozo más cercano es el W3 (Figura 39) localizado 54 km al SW de San Luis Río Colorado y no atraviesa ninguna de las líneas sísmicas procesadas. Este pozo se perforó hasta 4500 m de profundidad, cortando basamento granítico a ~ 4200 m. El registro estratigráfico en el pozo, se dividió en tres secuencias sedimentarias mayores que sobreyacen al basamento granítico (~ 4500 m - 4200 m), a) secuencia de lodolita basal (~ 4200 m - 3600 m), b) secuencia de lodolita y arenisca intercaladas (~ 3600 m - 1400 m) y c) Secuencia de arena no consolidada (~ 1400 m - 0 m) (Pacheco *et al.*, 2006).

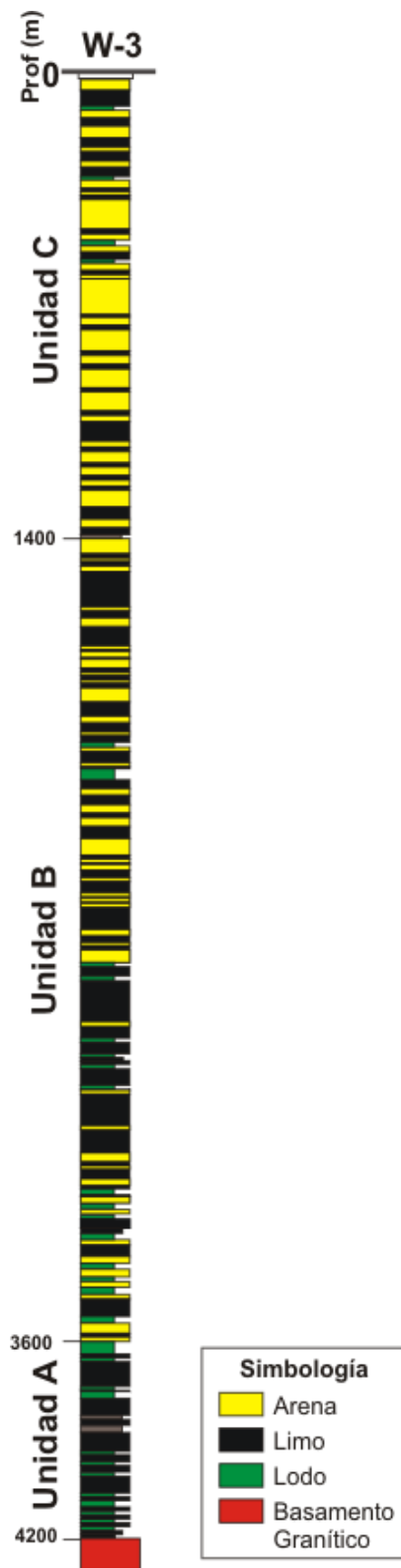


Figura 39. Columna litológica del pozo W3 perforado por PEMEX. Indica la profundidad al basamento granítico. y muestra las tres unidades litológicas del Mioceno Tardío y Plioceno (Pacheco *et.al.*, 2006).

3.3 Configuración del basamento acústico.

En el software OpendTect versión 4.2.0 se trazaron las fallas y el horizonte que define al basamento, permitiendo tener una mejor visualización de la estructura en 3D. El basamento se trazó en cada de las secciones sísmicas, marcando los reflectores de mayor impedancia acústica que se encontraron a mayor profundidad. La interpolación de los datos obtenidos junto con la interpretación de Chanes-Martínez (2012) permitió una configuración del basamento (Figura 40). Esta configuración se discute en el siguiente capítulo.

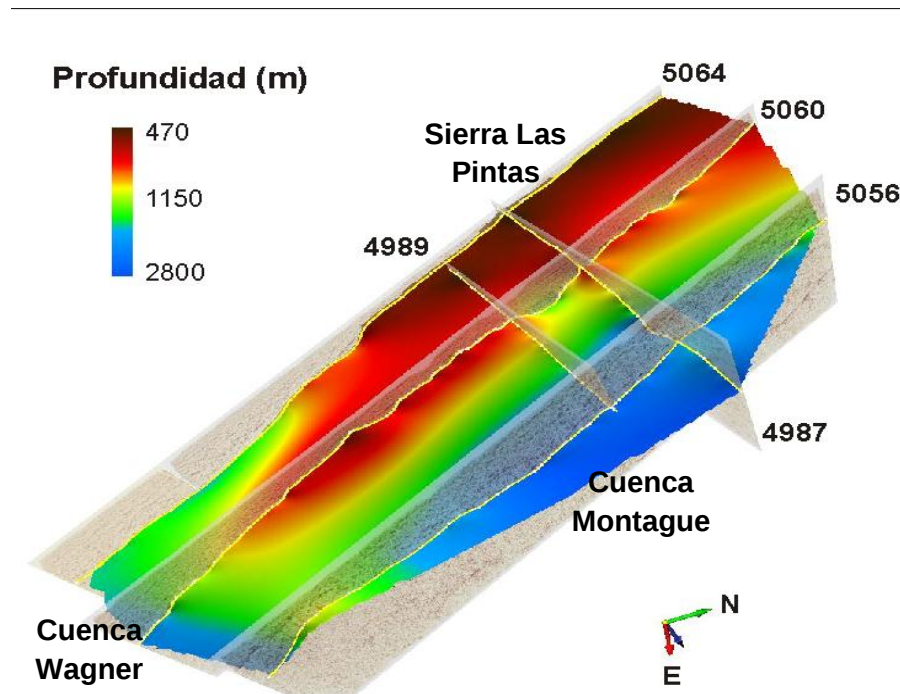


Figura 40. Configuración del basamento acústico en las secciones sísmicas donde estaba presente. En rojo se indica el basamento más somero y en azul las zonas más profundas.

La configuración del basamento acústico muestra que las zonas más someras se encuentran cercanas a la Sierra Las Pintas y las zonas más profundas definen la Cuenca Montague hacia el oriente y hacia la boca del delta al sur. Al centro de la línea 5060 se observa la cuenca situada bajo el área con gran concentración de epicentros de eventos asociados al sismo de M 7.2 de abril de 2010.

En la figura 40 el basamento profundiza hacia el este a través de una serie de estructuras con orientación NW-SE que lo van “escalonando”. Una falla mayor que acomoda parte de esta subsidencia es la falla Yurimuri, propuesta en este trabajo (Figura 41).

3.4 Correlación de fallas

Las fallas que pudieron correlacionarse fueron seis, cuatro de ellas fueron reportadas por Chanes-Martínez (2012) y dos nuevas fallas se están proponiendo en este trabajo. El orden de descripción de las fallas es de SW-NE y (Figura 41) y en la Figura 42 se muestra la interpretación de las fallas en planta. En el perfil 5060 se observa una falla que no se puede correlacionar con los demás perfiles, pero ésta se ubica bajo un patrón de actividad sísmica ocurrida después del evento de abril del 2010 (M=7.2), en las figuras anteriormente mencionadas se muestra la ubicación de ésta, así como su buzamiento al noroeste.

3.4.1 Falla Yurimuri

Esta falla se observa en las secciones 4987 y 4989_1 y se considera de gran importancia debido a que acomoda la mayor extensión a través de la zona de deformación..La FY es parte de una familia de fallas que desplazan el basamento a zonas más profundas. Se comporta como una falla lístrica, donde su echado

aparente es en promedio de $\sim 65^\circ$ con buzamiento al NE. De esta falla no se tiene reportes previos en la literatura.

3.4.2 Falla Ometepec

Esta falla se identificó en el extremo sur de los perfiles 5060 y 5056. Tiene una orientación NE-SW paralela a la línea de costa y aparentemente es el límite occidental de la cuenca Montague, se desconoce si tiene una conexión directa con la cuenca Wagner. Alternativamente esta estructura podría ser un límite entre ambas.

3.4.3 Falla Pangas Viejas

Esta falla pertenece al tren de fallas que profundizan el basamento hacia el oriente y controlan, junto con la falla Cerro Prieto al este, el depocentro de la cuenca Montague. La FPV se ha reportado anteriormente como una falla lístrica con buzamiento al este, con un ángulo promedio de 55° a 2 km de profundidad. Es una estructura compleja con deslizamiento normal del plano de falla que disminuye de ángulo con la profundidad y acomoda secuencias sedimentarias en abanico. Presenta una caída del bloque superior hacia el este en donde se ubica la falla Cerro Prieto y posiblemente se conectan. Debido a que el colapso gravitacional es mayor cerca de la falla de bajo ángulo, crea una estructura abanico tipo “rollover” dando lugar a subsidencia después de los ~ 700 m de profundidad (Chanes-Martínez, 2012).

En la figura 34 la sección sísmica muestra a la FPV como una falla normal lístrica con un echado aparente de $\sim 60^\circ$ a 2 km de profundidad, con buzamiento al NE. A mayor profundidad la placa superior rota sobre el plano de falla de bajo ángulo a partir de una charnela o flexión ubicada a ~ 6 km de distancia del plano

de falla. Los sedimentos que le sobreyacen forman un pliegue que en forma de abanico, dando lugar a una estructura anticlinal “rollover” (Park, 1997).

3.4.4 Falla Indiviso-S

Se definió esta falla con rumbo N70°W, con inclinación al este casi vertical, siendo de 85° al oeste en su parte más septentrional y 85° al este en su parte meridional. La falla Indiviso corta y acomoda un paquete sedimentario de ~4 km de espesor tendiendo a interceptarse a profundidad con el basamento acústico y posiblemente con la falla Pangas Viejas. Esta falla fue identificada en las secciones sísmicas por Chanes-Martínez (2012) quien identificó que es la misma estructura reportada por González-García (2010) en la zona de ruptura del sismo de abril de 2010.

En este trabajo se interpreta que la FI-S se extiende al sur hasta la sección 4987, en donde tiene un echado aparente de ~75° al noreste y corta el eje del rollover.

3.4.5 Falla Mesa

Nombrada así porque se encuentra al oeste de la Mesa de Andrade. Flanquea el extremo oriental del “anticlinal rollover” con una orientación NW-SE, bordeando la franja de la región de réplicas del sismo del 4 de abril de 2010. Su rumbo es ligeramente oblicuo al trazo de la falla Cerro Prieto y presenta un buzamiento de ~75° al oeste (Chanes-Martínez, 2012).

En las secciones sísmicas 4987 y 4989_2 se observa como una falla normal con echado aparente de ~70° con buzamiento al SW, no se alcanza a observar si corta el basamento acústico debido a que la resolución sísmica de las secciones a profundidad es mala (pobre).

3.4.6 Falla Cerro Prieto

Se define como una falla dextral que marca la frontera entre las placas Pacífico y Norteamérica. Chanes-Martínez (2012) la observó en las secciones sísmicas que trabajó, describiéndola como una falla con caída al oeste y una inclinación promedio de 85° . Observó que deformación de los sedimentos ocurre del lado oeste de la falla. Además su ubicación coincide en el sector sur con el trazo propuesto por Fonseca-López (1982).

Esta falla se observa en los perfiles 4987 y 4989_2, con un echado aparente de $\sim 80^\circ$ con buzamiento al SW. En la sección 4987 se observa que los reflectores sísmicos muestran facies caóticas o más desordenadas, mientras que en la segunda sección los reflectores al oriente de la FCP están casi horizontales y la deformación cercana a la falla no es tan evidente.

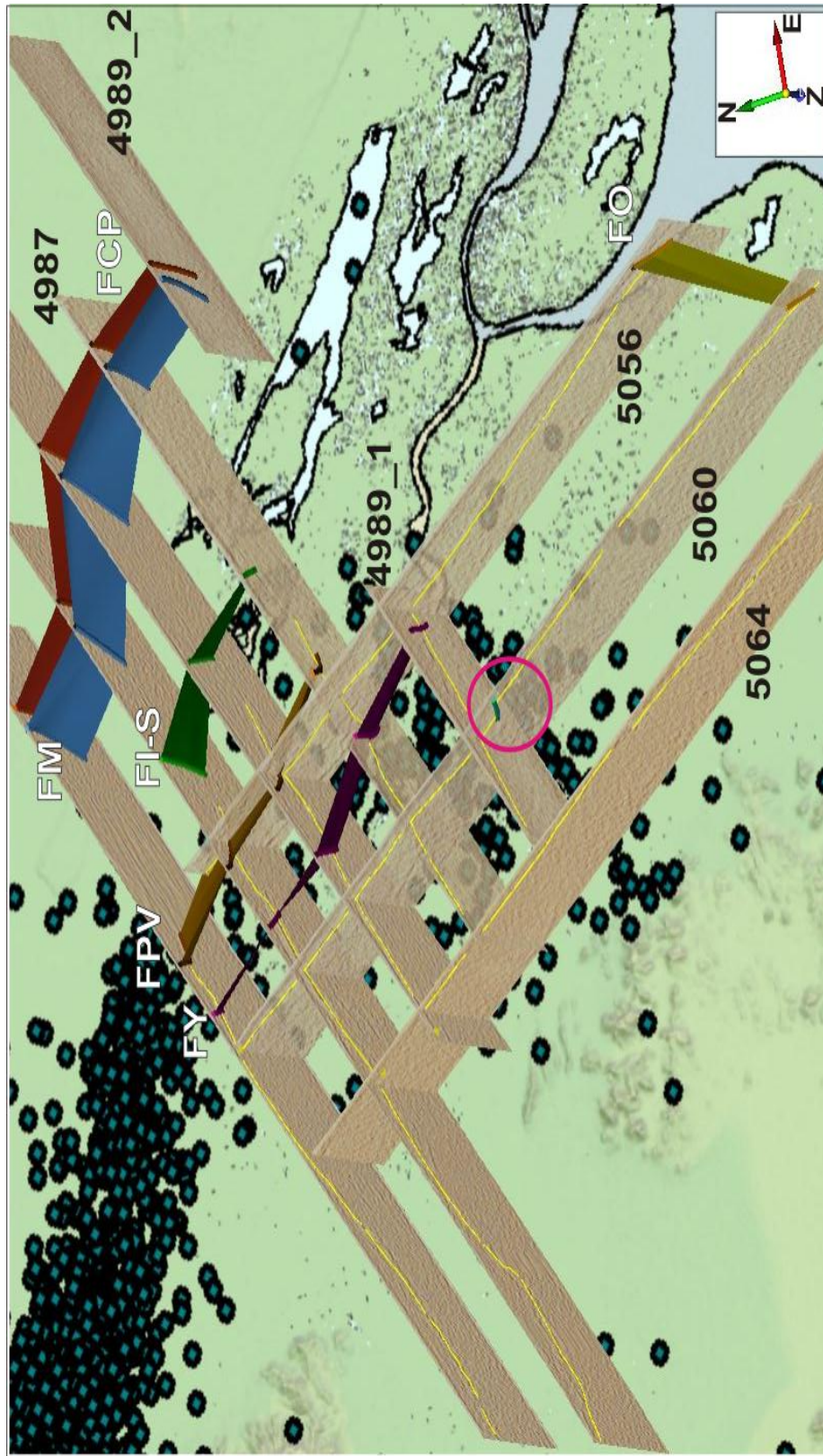


Figura 41. Interpretación de las fallas observadas en el área de estudio incluyendo lo reportado por Chanes- Martínez. De oeste a este, se tienen las fallas: Yurimuri (FY), Pangas Viejas (FPV), Indiviso-S (FI-S), Mesa (FM), Cerro Prieto (FCP). Al sur la Falla Ometepepec (FO) y en el círculo rojo se indica la falla que se pudiera relacionar con el cambio en la sismicidad en esta zona. En círculos azules se indican los epicentros registrados por RESNOM después del sismo del 4 de abril de 2010. En amarillo se indica la configuración del basamento.

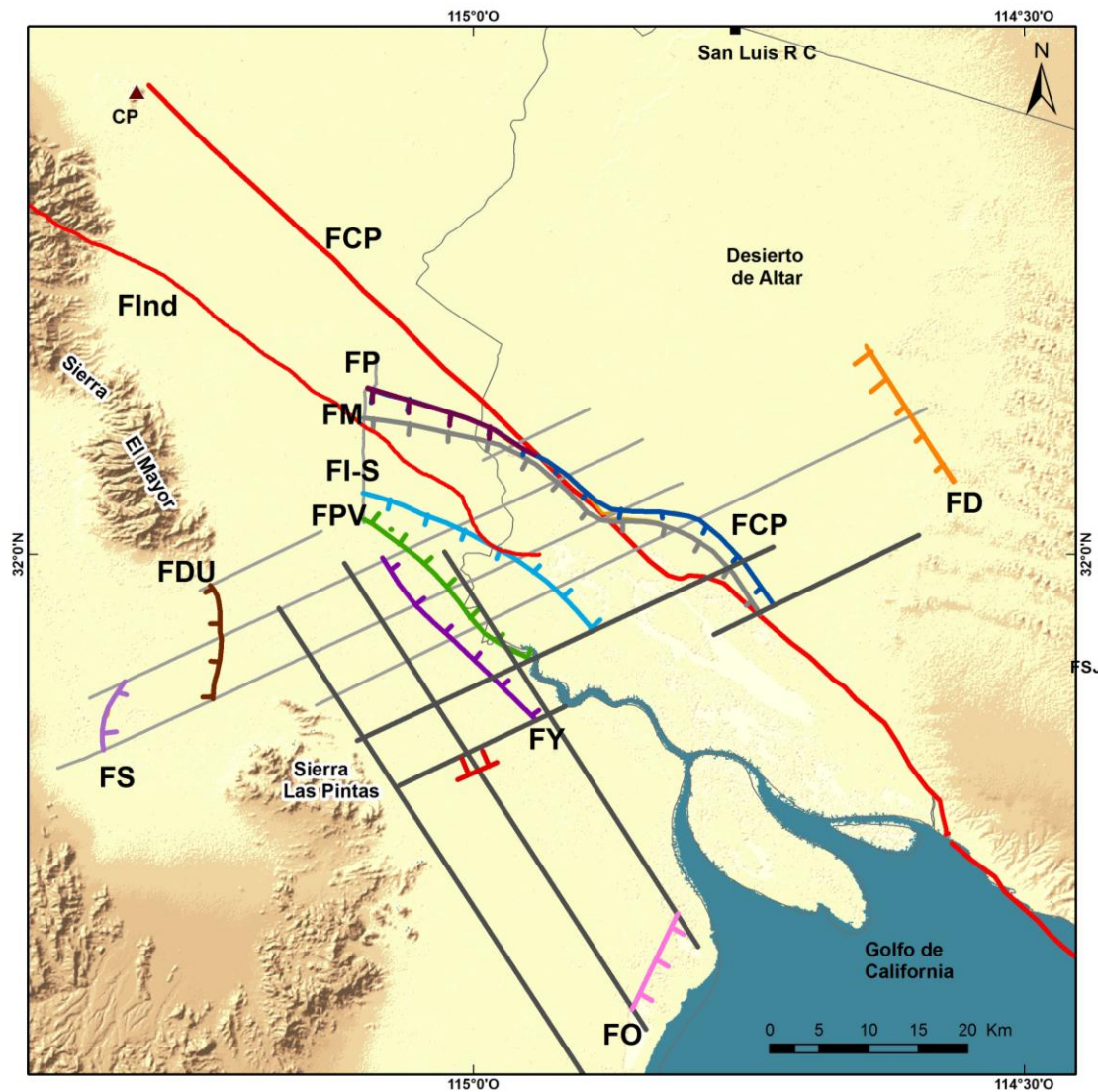


Figura 42. Interpretación de las fallas en planta observadas en el área de estudio. De oeste a este, se tienen las fallas: Saldaña (FS), Dunas (FDU), Yurimuri (FY), Pangas Viejas (FPV), Indiviso-S (FI-S), Mesa (FM), Palmas (FP), Cerro Prieto (FCP) y Desierto (FD). Al Sur Falla Ometepec (FO). Las líneas en rojo con dirección NW-SE, son las fallas: Cerro Prieto (FCP) (Fonseca-López, 1982) e Indiviso (FInd) (González-García, 2010). La falla en rojo con dirección NE-SW y caída al norte es la falla que posiblemente se relacione con el cambio de dirección de la sismicidad en la zona de estudio.

Capítulo 4. Discusión.

Para realizar la configuración del basamento en el delta del Río Colorado se integraron las líneas aquí trabajadas y los perfiles reportados por Chanes-Martínez (2012) en la región de estudio (Figura 43).

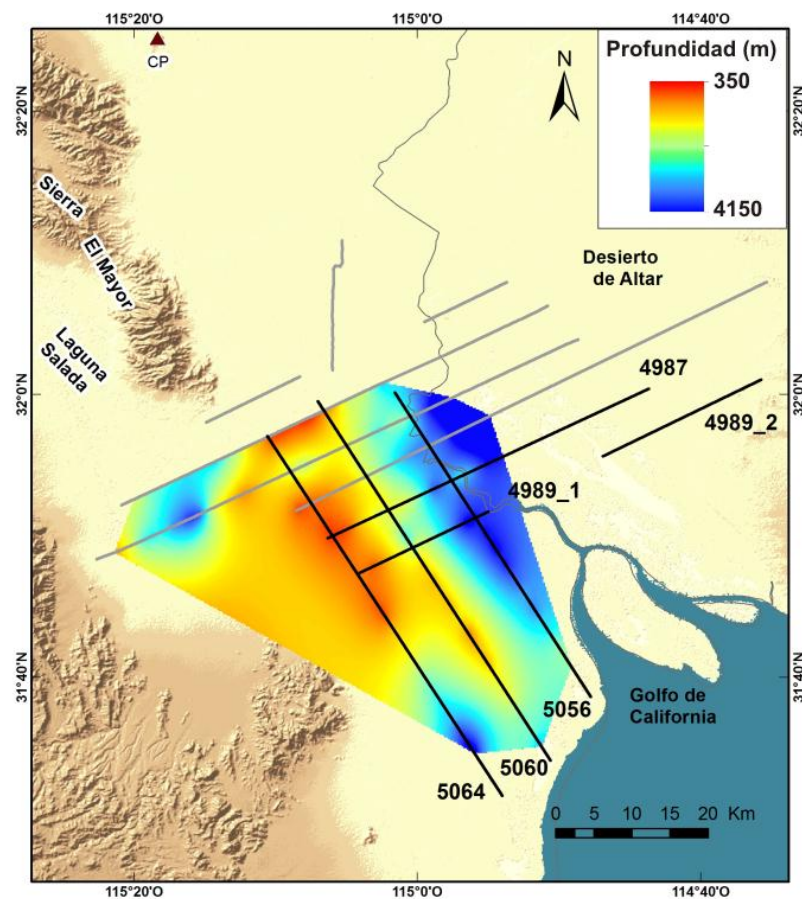


Figura 43. Configuración del basamento acústico utilizando las secciones interpretadas por Chanes-Martínez (2012) y las líneas procesadas en esta tesis. Las zonas más someras corresponden a la proyección este y sur de las sierritas El Mayor y Las Pintas, respectivamente. Se observa al este la caída del basamento hacia la cuenca Montague, y también hacia el Golfo de California.

4.1 Implicaciones tectónicas

Al referirnos al delta del Río Colorado, nos ubicamos en sobre la zona de mayor deformación en el límite de placas y recurrimos a un modelo de fallas de rumbo dextral, en donde los traslapes de las fallas generan cuencas romboidales que inician como pequeñas cuencas sigmoidales (tipo “S”). Llegando a etapas más maduras forman cuencas “pull-apart” en la zona de traslape de los segmentos de falla involucrados (Einsele, 2000). Estas cuencas suelen ser estrechas a lo largo de una falla de rumbo y se pueden formar varias cuencas de este tipo de manera simultánea a lo largo de la zona de falla. Estas cuencas pequeñas son comúnmente subyacidas por una delgada corteza continental, pero al acumular grandes desplazamientos de las fallas de rumbo da lugar a la formación de nueva corteza oceánica, tal es el caso del Golfo de California.

En la zona del delta se observan tres zonas donde el basamento se encuentra más profundo, siendo que de norte a sur las cuencas Las Tinajas, Montague y una cuenca al sur donde la caída se puede interpretar debido a su cercanía con la cuenca de Wagner en el Golfo de California (Figura 43). La cuenca Montague es la de mayor profundidad y corresponde a la zona de deformación de la Falla Cerro Prieto. En esta zona la Falla Cerro Prieto parece controlar el desplazamiento lateral del movimiento relativo de las placas PAC-NAM, mientras que las fallas Pangas Viejas y Yuriyuri acomodan la extensión a través de esta zona de deformación de 20 km de ancho.

4.1.1 Fallas

Los cambios locales en la dirección de las fallas de rumbo, generan zonas donde la tendencia de fallamiento es oblicua a la dirección de desplazamiento, originando compresión o extensión a través de la falla (Park, 1997). Cuando el desplazamiento de esta falla se combina con extensión al proceso se le denomina de transtensión mientras que al combinarse con compresión el resultado es transpresión.

Al existir cualquiera de estos dos se forman pliegues y fallas, los cuales pueden formar estructuras flor, ya sean positivas con bloques levantados, o bien, negativas, cuando los bloques caen (Park, 1997).

Al interpretar las secciones de esta región del delta del Río Colorado, se puede hacer una correlación con un modelo de estructura en forma de flor negativa (originado por esfuerzos transtensivos) donde la falla principal podría ser la Falla Cerro Prieto encontrando fallas antitéticas que forman un tren de fallas escalonadas con caída al este (Figura 44) con las fallas Pangas Viejas e Indiviso-S.

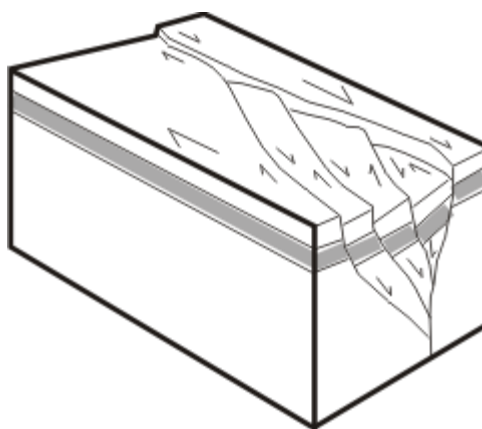


Figura 44. Esquema en donde se representa el modelo tectónico en el área de estudio, en forma de flor negativa, mostrando el escalonamiento hacia el este, tal como sucede en el área de estudio, donde limitan al oriente con la falla de rumbo dextral Cerro Prieto (modificado de Woodcock, and Fischer, 1986).

En el valle de Mexicali y en el noreste de Baja California se reportan fallas de bajo ángulo (Siem and Gastil, 1994; Axen, and Fletcher, 1998; Pacheco *et al.*, 2006). Las fallas con orientación NW-SE Yurimuri y Pangas Viejas son fallas lítricas que a profundidad cambian a ser de bajo ángulo.

Entre las cuencas Montague y Wagner se observa una anomalía gravimétrica positiva, la cual se explica con un alto en el basamento en forma de un “horst”, el cual estaría separándolas. La Falla Ometepepec puede considerarse como el flanco este del horst identificado en el extremo sur de las secciones 5060 y 5056 (Figuras 32 y 33).

4.1.2 Cambio en el régimen de sismicidad regional

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), definen un tren de deformación con una orientación preferencial NW-SE. En una zona de deformación transtensiva deberían observarse estructuras perpendiculares u oblicuas a la dirección preferencial. Esto es consistente con el cambio en la dirección del alineamiento de las réplicas con rumbo NE-SW, que explicaría de forma más sencilla al cambio en el patrón de sismicidad (Figura 11). En la línea 5060 se observan dos estructuras, una falla principal y su falla antitética, La falla principal tiene un desplazamiento vertical de ~ 800 m y se ubica por debajo de la zona con la actividad sísmica en esa dirección. Esta estructura esta sepultada por los sedimentos deltaicos y sucede lo mismo que lo observado en la región de la Falla Indiviso por Chanes-Martínez (2012), la cual estaba sepultada por los sedimentos y no se conocía su existencia. Tampoco se tenían reportada actividad sísmica hasta antes del evento del 4 de abril 2010. Esto sugiere que las fallas mayores identificadas en este trabajo pueden tener actividad sísmica importante en esta región.

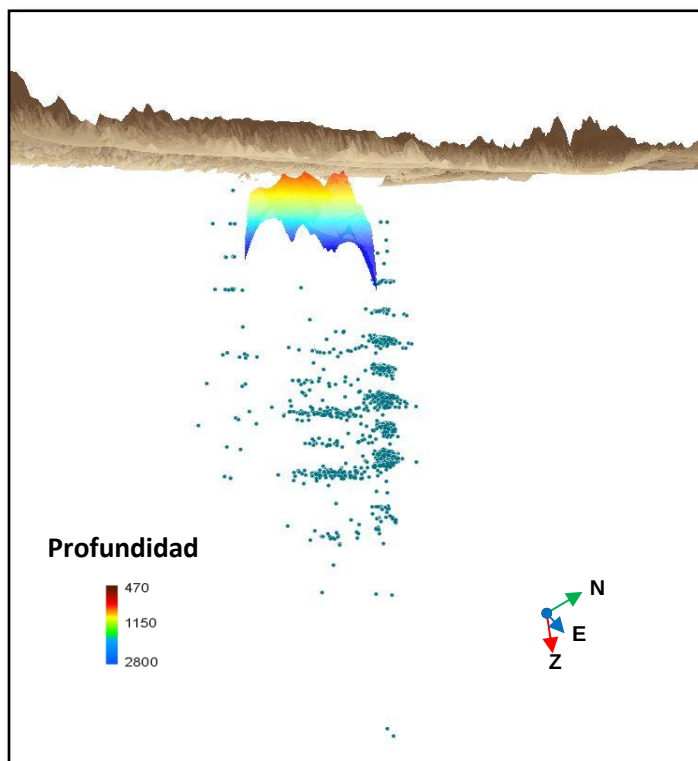


Figura 45. Interpretación del basamento acústico en las secciones sísmicas y la ubicación de los hipocentros generados después del sismo del 4 de abril de 2010 de $M=7.2$, indicando en diferentes capas cada kilómetro de profundidad (Datos registrados por RESNOM del 4 de abril de 2010 a 31 de mayo de 2012).

Otra posible explicación es la formación de una zona de distensión entre dos fallas principales, pero no esto es más difícil de explicar debido a que no se tiene una estructura que controle el sector oeste, considerando que al este está la Falla Indiviso, por lo que no se observa claramente la formación de un depocentro que pudiera estar controlando la subsidencia en este sector.

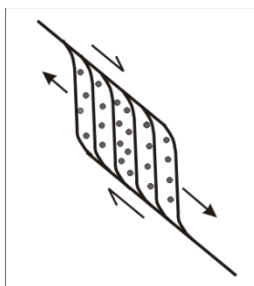


Figura 46. Esquema de formación de una zona de distensión con fallas normales entre dos fallas principales de desplazamiento lateral derecho (modificado de Woodcock and Fischer, 1986).

La última discusión se refiere al reflector de alta impedancia acústica encontrado a una profundidad de alrededor de los 4500 m en la sección 5056. Esta estructura o cuerpo rocoso podría tener varias explicaciones, una de ellas es el reciclaje de la roca debido a que se encuentra en un rift activo, en el cual el sedimento es rápidamente sepultado y se calienta, con lo que se genera un metamorfismo en la roca sedimentaria, formando una nueva generación de corteza reciclada a lo largo del límite de placas activa (Dorsey, 2010).

En un estudio geofísico y geológico en el campo geotérmico de Cerro Prieto, Baja California, México (Lyons and Van de Kamp, 1980), indican que en una sección sísmica presenta un fuerte reflector con una inclinación al oeste en el suroeste del campo, que fue interpretado como basamento por Fonseca y Razo (1979), pero Lyons y Van de Kamp lo interpretaron como una capa volcánica que subyace a estratos sedimentarios, las razones para considerarlo volcánico y no basamento cristalino fueron:

- 1) Reflexiones aparentemente primarias pueden ser vistas debajo del registro de este evento.
- 2) Parece gradar lateralmente hacia reflexiones de amplitud más baja en el perfil en lugar de terminar por fallas.

- 3) Al noreste de este fuerte reflector, las velocidades de apilamiento indican velocidades de intervalo sedimentarias que parece ser equivalente a la reflexión primaria vista debajo de la reflexión del “basamento”.
- 4) El mapa de anomalía de Bouguer, muestra un mínimo de la anomalía lo que sugiere que el espesor de la sección sedimentaria se engrosa y luego adelgaza en dirección al oeste, a través del área de la fuerte reflexión. Esto parece requerir capas sedimentarias por debajo de la reflexión del supuesto basamento.

En esta región del delta, el reflector profundo identificado en la sección 5056 (Figura 33) podría interpretarse como una intrusión debido a que en esa sección también parece haber sedimentos debajo del reflector descrito como basamento acústico A, lo cual no se pudo definir si es el mismo que el basamento cristalino.

Aun cuando no se tiene más evidencia para corroborar que lo observado en la región de campo geotérmico de Cerro Prieto por Lyons y Van de Kamp (1980), referente al reflector interpretado como una capa volcánica que subyace estratos sedimentarios, el reflector observado en algunas de las líneas aquí interpretadas pudiera corresponder a un intrusivo, esto nos estaría diciendo que se tuvo un evento geológico de carácter regional en la zona, del cual hasta ahora no se tiene reporte alguno. Sin embargo, no se reporta ningún horizonte volcánico en el Pozo W-3 localizado al centro entre el área aquí estudiada y la región de Cerro Prieto.

Capítulo 5. Conclusiones.

El procesamiento e interpretación de ocho perfiles sísmicos de PEMEX (cinco procesados durante esta tesis y tres de la tesis de Chanes-Martínez, 2012) en la región sur del delta del Río Colorado permitió identificar la estructura de la zona de falla Cerro Prieto. Esta zona de deformación tiene alrededor de 20 km de ancho en la zona de estudio y se reconocieron varias fallas discretas que cortan a los depósitos sedimentarios. Las fallas Pangas Viejas, Indiviso-S, Mesa y Cerro Prieto reportadas por Chanes-Martínez se reconocieron hacia el sur en la zona de estudio.

Dos nuevas fallas mayores se reconocieron en esta tesis. Al occidente de la falla Pangas Viejas (Chanes-Martínez, 2012), se identificó una estructura de carácter regional que se le asigna el nombre de falla Yurimuri, la cual está controlando el escalonamiento del basamento hacia el este junto con la falla Pangas Viejas. El conjunto de fallas mayores definen una estructura en forma de flor negativa a través de la zona de deformación.

En el extremo sur de la zona de estudio se identificó la falla Ometepepec, que es una falla normal con rumbo NE-SW y caída hacia el sur. Esta falla controla el límite al suroeste de la cuenca Montague.

La configuración del basamento acústico con base en el reflector de mayor impedancia observado en las secciones sísmicas indica la presencia de una zona de subsidencia de ~12 km de ancho por ~35 km de largo que define a la cuenca Montague. Los perfiles de la anomalía de Bouguer muestran a esta depresión como un mínimo gravimétrico al oeste del trazo de la falla Cerro Prieto y al este del alto de basamento de Sierra Las Pintas y la parte sur de la Sierra El Mayor.

Una estructura tipo horst de orientación E-W limitado al sur por la falla Ometepepec marca una separación con la cuenca de Wagner al sur.

La línea 5056 en su extremo noroeste contiene un reflector de fuerte contraste de impedancia a una profundidad de ~4500 m. Este basamento acústico profundo podría ser el basamento cristalino e indicaría que las fallas Yurimuri y Pangas Viejas con dirección noroeste-sureste desplazaron el basamento de una profundidad inicial de ~1000 a una profundidad final de ~4500 m en una distancia de 7 km visto en planta.

Se identificó una falla con desplazamiento en la vertical de ~ 800 m en la línea 5060, la cual controla un depocentro local que coincide con la actividad sísmica de tendencia NE-SW de las réplicas del sismo de M 7.2 de abril de 2010. Esta falla solo se identificó en este perfil sísmico, pero se infiere que tiene una orientación ENE-WSW.

La estratigrafía en el delta del Río Colorado es compleja por la variación vertical y lateral de ambientes sedimentarios. Esto se refleja por cambios laterales de facies sísmicas que producen la interacción de depósitos deltaicos y de los abanicos aluviales que progradan hacia la cuenca a partir de las sierras Cucapah-El Mayor y Las Pintas. La interpretación de horizontes estratigráficos está limitada por la regular calidad de las líneas sísmicas y la deformación generada por la actividad de las fallas. Los escarpes de falla en superficie tienden a ser borradas por la hidrodinámica del sistema deltaico.

Referencias bibliográficas.

- Allen, G. P. (1989). Les deltas et les bassins deltaïques, in *Dynamique et Methodes d'Etudes des Bassins Sedimentaires*, Association des Sédimentologistes Français. Editions Technip, Paris, 383-421.
- Alles, D. L. (2011). Geology of the Salton Trough. Retrieved on February 25, 2012 from <http://fire.biol.wvu.edu/trent/alles/GeologySaltonTrough.pdf>
- Aragón-Arreola, M., Martín-Barajas, A. (2007). Westward migration of extension in the northern Gulf of California, México. *Geology*, 35, 571–574.
- Atwater, T. (1989). Plate tectonic history of the northeast Pacific and western North America. In: Winterer, E. L., Hussong, D. M. and Decker, R. W., eds., *The Eastern Pacific Ocean and Hawaii: Geological Society of America*. Boulder, Colorado, *The Geology of North America*, v. N, 21-73.
- Axen, G. J., Fletcher, J.M. (1998). Late Miocene-Pleistocene extensional faulting, Northern Gulf of California, Mexico and Salton Trough, California. *International Geology Review*, 40, 217-244.
- Axen, G. J., Grove, M., Stockli, D., Lovera, O. M., Rothstein, D. A., Fletcher, J. M., Farley, K., and Abbott, P. L. (2000). Thermal evolution of Monte Blanco Dome-Late Neogene low-angle normal faulting during the Gulf of California rifting and late Eocene denudation of the eastern Peninsular Ranges. *Tectonics*, 19, 197-212. doi: 10.1029/1999TC001123.
- Brandenberg, S. J., Fletcher, J., Gingery, J. R., Hudnut, K. W., McCrirk, T., Meneses J. F., Murbach, D., Rockwell, T., Stewart, J. P., and Tinsley, J. (2010). Preliminary Report on seismological and geotechnical engineering aspects of the April 4 2010 Mw 7.2 El Mayor-Cucapah (Mexico) Earthquake. http://www.geerassociation.org/Post_EQ_Reports.html
- Burnett, E., Kandi, E. and Croen, F. (1993). Ciénega de Santa Clara: geologic and hydrologic comments. U.S. Bureau of reclamation, Yuma, AZ.
- Carbajal, N., Sousa, A., and Durazo, R. (1997). A numerical study of the ex-ROFI of the Colorado River. *Journal of Marine Systems*, 12, 17-33.
- Carriquiry, J. D., Sánchez, A. (1999). Sedimentation in the Colorado River delta and Upper Gulf of California after nearly a century of discharge loss. *Mar Geol* 158, 125-145.
- Chamley, H. (1989). *Clay sedimentology*. Springer. Berlin.

- Chanes-Martínez, J. J. (2012). Características estructurales y sismoestratigráficas en un sector del delta del Río Colorado, noroeste de México, a partir de sísmica de reflexión. (Tesis de maestría). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Baja California, México. Recuperada de <http://www.biblioteca.cicese.mx>
- Coleman, J.M. (1982): Deltas: Processes of deposition and models for exploration, Second Edition, Boston, International Human Resources Development Corporation.
- Cruz-Castillo, M. (2002). Catálogo de fallas regionales activas en el norte de Baja California, México, GEOS, abril, 37-42.
- Dixon, T., Farina, F., DeMets, C., Suarez-Vidal, F., Fletcher, J., Marquez-Azua, B., Miller, M., Sanchez, O., and Umhoefer, P.J. (2000). New kinematic models for Pacific–North America motion from 3 Ma to present, II: Evidence for a “Baja California shear zone”: Geophysical Research Letters, 27, 3961–3964, doi: 10.1029/2000GL008529.
- Dorsey, R. J., Fluette, A., McDougall, K., Housen, B. A., Janecke, S. U., Axen, G. J., and Shirvell, C. R. (2007). Chronology of Miocene-Pliocene deposits at Split Mountain Gorge, Southern California: A record of regional tectonics and Colorado River evolution, *Geology* January: 35, 57-60. doi: 10.1130/G23139A.
- Dorsey, R.J. (2010). Sedimentation and crustal along an active oblique-rift margin: Salton Trough and northern Gulf of California. *Geology*. 38, 443-446.
- Einsele, G. (2000). Sedimentary Basins. Evolution, Facies and Sediment Budget. Second Edition. Springer. Berlin.
- Elders, W.A., Rex, R.W., Meidav, Tsvi, Robinson, P.T. and Biehler, S. (1972). Crustal spreading in Southern California: *Science* 178, 15-24.
- Elliot, T. (1986), Siliciclastic shorelines. In: Reading HG (ed) *Sedimentary environments and facies*. Blackwell, Oxford, 155-188.
- Ellsworth, W.L. (1990). Earthquake history, 1769-1989. In Wallace, R.E., ed., *The San Andreas Fault System, California*: U.S. Geological Survey Professional Paper 1515, 152-187.
- Ferrari, L., López-Martínez, M., Aguirre-Díaz, G. and Carrasco-Núñez, G. (1999). Space-time patterns of Cenozoic arc volcanism in central Mexico - from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt, *Geology* 27, 303-306.
- Filloux, J. H. (1973). Tidal patterns and energy balance in the Gulf of California, *Nature* 243, 217-221.

- 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, 1, 1-39.
- Frez, J., González-García, J.J. (1991). Crustal structure and seismotectonics of northern Baja California. in: J.P. Dauphin and B.R.T. Simoneit, editors, The Gulf and Peninsular Province of the Californias, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 47, 261-283.
- Frez, J., Frías-Camacho, V. M. (1998), Mapas anuales de sismicidad para la región fronteriza de ambas californias. GEOS, 18, No. 2, 112-130.
- Fuis, G. S., Kohler, W. M. (1984). Crustal structure and tectonics of the Imperial Valley region, California. In The Imperial Basin- Tectonics, Sedimentation, and Thermal Aspects, Rigsby., C. A., Editor, Soc. Of Econ. Pal. And Min (SEPM), Pacific Section, 1-13.
- Gastil, R.G., Philipps, R.P., and Allison, E.C. (1975). Reconnaissance Geology of the State of Baja California: Boulder, CO, Geological Society of America, Memoir 140, 170 p.
- González-Escobar, M., Martín-Barajas, A., García-Abdesalem, J. y Aragón-Arreola, M. (2006). Evolución tectonoestratigráfica de las cuencas del norte del Golfo de California, vol 2. Procesamiento e interpretación de datos de sísmica de reflexión. PEMEX, Mexico, Rep Técnico no 410303843.
- González-Escobar, M., Aguilar-Campos, C., Suárez-Vidal, F. and Martín-Barajas, A. (2009). Geometry of the Wagner basin, upper Gulf of California based on seismic reflections. Int Geol Rev 51(2),133– 144.
- González-Escobar, M., Suárez-Vidal, F., Hernández-Pérez, J.A. and Martín-Barajas, J.A. (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 Letters. doi:10.1007/s00367-010-0204-0.
- González-García, J. J., Prawirodirdjo, L., Bock, Y. and Agnew, D. (2003). Guadalupe Island, Mexico as a new constraint for Pacific plate motion. Geophysical Research Letters. 30. doi:10.1029/2003GL017732, 2003.
- González-García, J. J., González-Ortega, J. A., Bock, Y., Fialko, Y., Fielding, E., Fletcher, J., Mackrain, J. Galetzka, K. W., Hudnut, L., Munguía-Orozco, S.,

- Nelson, T., Rockwell, K., Sandwell, D. and Stock, J. (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.
- Gutiérrez, G., González, J.I. (1989). Predicciones de marea de 1990: estaciones mareográficas del CICESE, Informe Técnico OC-89-01, CICESE, Ensenada.
- Hauksson E., Stock, J., Hutton, K., Yang, W., Vidal-Villegas, J.A. and Kanamori, H. (2010). The 2010 Mw 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*, 168, 1255-1277. doi: 10.1007/S00024-010-009-7.
- Hausback, B. P. (1984). Cenozoic volcanic and tectonic evolution of Baja California Sur, Mexico. In: Frizzell, V.A., Jr., ed., *Geology of the Baja California Peninsula: Pacific Section*. Society of Economic Paleontologist and Mineralogist. Special Publication 39, 219-236.
- Helenes-Escamilla, J., Carreño, A. L., Carrillo-Berumen, R. M. (2009). Middle to late Miocene chronostratigraphy and development of the northern Gulf of California . *Marine Micropaleontology*. 72: 10-25.
- Jaillard, E. (1993). *Deltas*. Office de recherche scientifique d'outre-mer, ORSTOM, Paris, 85 p.
- Kairouz, M.E. (2005). *Geology of the Whale Peak region of the Vallecito Mountains: Emphasis on the kinematics and timing of the West Salton detachment fault, southern California*. [M.S. thesis]: Los Angeles, University of California, 156 p.
- King, N. (2010). Report of USGS Activities, El Mayor-Cucapah Earthquake of Sunday, April 4, 2010, Nancy King, Scientific Response Coordinator, Retrieved Tuesday May 25, 2010. http://tec.earth.sinica.edu.tw/tec/images/El_Mayor_Cucapah_earthquake_Report.pdf
- Lee, J., Miller, M. M., Crippen, R., Hacker, B. and Ledesma-Vazquez, J. (1996). Middle Miocene extension in the Gulf Extensional Province, Baja California: Evidence from the southern Sierra Juarez. *Geological Society of America Bulletin* 108, 505-525.
- Lyons, D. J., Van de Kamp, P. C. (1980). Subsurface geological and geophysical study of the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico: Lawrence Berkeley Lab. rep. LBL-10540.

- Lizarralde, D., Axen, G.J., Brown, H.E., Fletcher, J., Gonzalez, A., Harding, A.J., Holbrook, W.S., Kent, G.M., Paramo, P., Sutherland, F. and Umhoefer, P.J. (2007). Variation in styles of rifting in the Gulf of California. *Nature*, 448, 466-469. doi:10.1038/nature06035.
- Lomnitz, C., Mooser, F., Allen, C.R., Brune, J.N. and Thatcher, W. (1970). Seismicity and tectonics of the northern Gulf of California region, Mexico. Preliminary results. *Geofísica Internacional*. 10, 37-48.
- Lonsdale, P. (1989). Geology and tectonic history of the Gulf of California. In: Hussongs, D., Winterer, E. and Decker, R. (eds) *The Eastern Pacific Ocean and Hawaii. The Geology of North America*. Geological Society of America, Boulder, 499–522.
- Martín-Barajas, A. (2000). Volcanismo y extensión en la Provincia Extensional del Golfo de California. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* LIII, 72-83.
- Meckel, L.D. (1975). Holocene sand bodies in the Colorado River Delta area, Northern Gulf of California: in *Deltas*, Houston Geological Society, 3, 239-265.
- Mora-Alvarez, G. (1993). Relaciones estratigráficas y geocronológicas entre las unidades volcánicas de la Sierra Santa Úrsula en Sonora y el magmatismo de la región del Golfo de California. En: Delgado-Argote, L. y Martín-Barajas, A. (eds.). *Contribuciones a la tectónica del occidente de México*, Unión Geofísica Mexicana, Monografía 1, 123-146.
- NEIC (2010). USGS National Earthquake Information Center USGS/NEIC (PDE) database search. http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/epic_rect.php
- Nelson, S., Zamora-Arroyo, F. and Flessa, K. (2010). Environmental and geomorphic effects on the lower Colorado River delta from the april 4, 2010 earthquake, Baja California, Mexico. *Geol. SOc. Am. Denver Annual Meeting*, Abstract 25-1, Denver, Colorado, USA.
- Oskin M. E, Stock, J. and Martín-Barajas, J. A. (2001). Rapid localization of Pacific-North America plate motion in the Gulf of California. *Geology*. 29, 459-462.
- Oskin, M. E., Stock, J. (2003). Marine incursion synchronous with plate boundary localization in the Gulf of California, *Geology*, 31, 23-26.
- Oskin, M. E., Arrowsmith, J.R., Hinojosa-Corona, A., Elliott, A.J., Fletcher, J.M., Fielding, E.J., Gold, P.O., González-García, J.J., Hudnut, K.W., Liu-Zeng, J. and Terán, O.J. (2012). Near-Field Deformation from the El Mayor–Cucapah Earthquake revealed by differential LIDAR. *Science*, 335, 702-705. doi: 10.1126/science.1213778, 2012.

- Pacheco-Romero M.F., Martín-Barajas, J.A., Elders, W.A., Espinosa-Cardena, J.M., Helenes, J. and Segura, A. (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.
- Park, R.G. (1997). *Foundations of Structural Geology*, Third Edition, Chapman & Hall, London.
- Pederson, J.L., Mackley, R.D., and Eddleman, J.L. (2002). Colorado Plateau uplift and erosion: Amounts and causes evaluated with GIS: *GSA Today*, 12 (8), 4–10, doi: 10.1130/1052-5173(2002)012<0004:CPUAEE>2.0.CO;2.
- Pérez-Cruz, G. (1982). Algunos resultados de la investigación geológico-geofísica en la porción noroccidental del Golfo de California. *Bol Soc Mexicana Geól Petrol* 34,71–77.
- Pérez-Tinajero, C. (2007). *Sísmica de reflexión en el desierto de Altar, Sonora, México* (Tesis de Maestría). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Baja California, México.
- RESNOM (2012). Catálogo de eventos sísmicos: periodo de 1976-2012. Recuperado de <http://sismologia.cicese.mx/resnom/catálogos/eventos.php>.
- Sawlan, M. G., Smith, J. G. (1984). Petrologic characteristics, age and tectonic setting of Neogene volcanic rocks in northern Baja California Sur, Mexico. En: Frizzell, V. A. (ed.). *Geology of the Baja California Peninsula*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Pacific Section 39: 237-252.
- Sheriff, R. E. (1995). *Exploration Seismology*, Second Edition, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K.
- Shirvell, C.R. (2006). Pliocene exhumation along the West Salton Detachment system and tectonic evolution of the Fish Creek–Vallecito supradetachment basin, Salton Trough, southern California. (M.S. thesis). Los Angeles, University of California.
- Siem, M. E., Gastil, G. R. (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, 107–119.
- Spencer, J. E., Normark, W. R. (1989). Neogene plate-tectonic evolution of the Baja California Sur continental margin and the southern Gulf of California, Mexico.

- In Winterer, E. L., Hussong, D. M. and Decker, R. W., (eds)., The eastern Pacific Ocean and Hawaii: Boulder, Colorado. The geology of North America: Geological Society of America Bull, 489-497.
- Spencer, J.E., Peters, L., McIntosh, W.C. and Patchett, P.J. (2001). $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Hualapai Limestone and Bouse Formation and implications for the age of the lower Colorado River, in Young, R.A. and Spamer, E.E., (eds)., The Colorado River: Origin and evolution: Grand Canyon, Arizona, Grand Canyon Association Monograph 12, 89–91.
- Steely, A.N. (2006). The evolution from Pliocene West Salton detachment faulting to cross-cutting Pleistocene oblique strike-slip faults in the SW Salton Trough, southern California (M.S. thesis). Logan, Utah State University.
- Stock, J. M., Hodges, K. V. (1989). Pre-Pliocene extension around the Gulf of California and the transfer of Baja California to the Pacific Plate. *Tectonics*, 8: 99-115. doi:10.1029/TC008i001p00099.
- Stock, J. M., Lee, J. (1994). Do microplates in subduction zones leave a geological record?. *Tectonics*, 13: 1472-1487.
- Suárez, F. (1999). Sismos de $M > 6$ en el Valle de Mexicali-Imperial, generación y distribución de estructuras asociadas a licuefacción. *GEOS*, 19 (1), 15-23.
- Suarez-Vidal, F., Armijo, R., Morgan, G. (1991). Framework of recent and active faulting in northern Baja California. In: Dauphine, P. y Simoneit, B., Cap. 16, Editores. The Gulf and Peninsular Province of the California. Memoir 47. (PA: CESIH9103)
- Teixidó-iUllod, Ma. T. (2000). Caracterización del subsuelo mediante sísmica de reflexión de alta resolución. (Tesis de Doctorado).. Departamento de Geodinámica y Geofísica, Universidad de Barcelona, España.
- Van Andel, Tj. H. (1964). Recent marine sediments of Gulf of California. In: Marine Geology of the Gulf of California. AAPG, Memoir 3, 216-310.
- Wei, S., Fielding, E., Leprince, S., Sladen, A., Avouac, J-P., Helmberger, D., Hauksson, E., Chu, R., Simons, M., Hudnut, K., Herring, T. and Briggs, R. (2011). Superficial simplicity of the 2010 El Mayor-Cucapah earthquake of Baja California in Mexico. *Nature Geoscience*. 4, 615-618. doi: 10.1038/ngeo1213, 2011.
- Winker, C.D., Kidwell, S.M. (1986). Paleocurrent evidence for lateral displacement of the Colorado River delta by the San Andreas fault system, southeastern California, *Geology*, 14, 788–791.

- Woodcock, N.H., Fischer, M. (1986). Strike-slip duplexes. *Journal of Structural Geology*, 25, 725-735.
- Yilmaz, O. (1987). Seismic data processing. *Investigations in Geophysics*, vol I, Second Edition. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa.
- Yilmaz, O. (2001). Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data, vol II, *Invest. Geophys.*, vol. 10, Second Edition, Soc. Explor. Geophys., Tulsa, Okla.