

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD CIENCIAS DE LA TIERRA**



**ESTRUCTURA EN EL SECTOR NOROESTE DEL
GOLFO DE CALIFORNIA A PARTIR DE SÍSMICA DE
REFLEXIÓN**

TESIS

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OPTAR AL GRADO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:

YOANA DE JESÚS VARGAS MAGAÑA

LINARES, N.L.

AGOSTO DE 2011



UANL



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA

La Tesis:

**ESTRUCTURA EN EL SECTOR NOROESTE DEL
GOLFO DE CALIFORNIA A PARTIR DE SÍSMICA DE
REFLEXIÓN**

Elaborada por:

YOANA DE JESÚS VARGAS MAGAÑA

Ha sido aceptada como requisito parcial para optar al grado
académico de:

MAESTRO EN CIENCIAS

Vo. Bo.

DIRECTOR DE TITULACIÓN

Dr. Mario González Escobar

LINARES, N.L.

AGOSTO DE 2011



UANL



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA

La Tesis:

ESTRUCTURA EN EL SECTOR NOROESTE DEL GOLFO DE CALIFORNIA A PARTIR DE SÍSMICA DE REFLEXIÓN

Elaborada por:

YOANA DE JESÚS VARGAS MAGAÑA

Ha sido aceptada como requisito parcial para optar al grado
académico de:

MAESTRO EN CIENCIAS

Vo. Bo.

COMITÉ DE TITULACIÓN

Dr. Mario González Escobar

Dr. Juan Carlos Montalvo Arrieta

Dr. Gabriel Chávez Cabello

LINARES, N.L.

AGOSTO DE 2011

Por este medio declaro bajo protesta haber realizado esta tesis de manera personal, y haber utilizado únicamente, los medios, procedimientos y asesorías descritas en la misma.

Yoana de Jesús Vargas Magaña

Linares, Nuevo León, México, Agosto de 2011

DEDICATORIAS

A Dios,

A mis hermosos padres

Gerardo Vargas Hernández y María Elena Magaña Sánchez

*Que siempre me han dado su amor incondicional,
Me han fomentado la educación, el esfuerzo y la perseverancia,
Por ser esos ángeles que Dios me dio
para guiar mis pasos aquí en la tierra,
y que hasta ahora
lo han hecho de maravilla.*

A mis hermosas hermanas

María Elena y Guadalupe

*Por ser la luz en mi caminar,
Convirtiéndose en mis amigas, compañeras y cómplices de vida.
Los amo familia mía, sin ustedes esto no sería posible.*

A ellos desde el fondo de mi alma y corazón.

GRACIAS!

Encontremos la belleza que existe en nosotros, sonriamos al sabernos vivos, pensantes y sobre todo seres capaces de aportar parte de ese radiante esplendor hacia las personas que no han podido encontrar el camino aun, y es que todavía no estamos conscientes de la magnitud de los efectos de compartir esa alegría, de repartir pedazos de nuestro ser y volvernos infinitos, omnipresentes, inmortales, no en cuerpo... sino en acciones, sentimientos, palabras, ideas, que llevan impregnado un perfume latente que grita que algún día existimos, que estuvimos ahí, no solo para contemplar el mundo sino para moldearlo más de lo que nos tocaba.

Yoana 2011.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a diferentes instituciones por la gran ayuda que me otorgaron. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (**CONACYT**), por brindarme durante dos años, el apoyo económico para realizar mi posgrado en geofísica aplicada. A Petróleos Mexicanos Exploración y Producción (**PEMEX**), por proporcionar los datos sísmicos y de pozo que hicieron posible este trabajo de tesis. A Halliburton University Grant Program/Landmark Software, por las facilidades y apoyo técnico en el uso del software para el procesado e interpretación de datos sísmicos. Al Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (**CICESE**), por la facilidad en el uso de las instalaciones computacionales, por permitir incrementar el conocimiento y fomentar la educación científica. A la Universidad Autónoma de Nuevo León Facultad de Ciencias de la Tierra (**FCT**) porque me dio la oportunidad de desarrollarme profesionalmente.

A mi director de tesis Dr. Mario González Escobar, por la confianza depositada en mí al invitarme a trabajar en este proyecto de tesis, por toda la ayuda, comprensión y paciencia que me brindó durante mi estancia en el CICESE y principalmente por compartir parte de sus conocimientos y sabiduría conmigo.

A mis sinodales: Dr. Juan Carlos Montalvo Arrieta, por creer en mí y proponerme participar en este proyecto de tesis y al Dr. Gabriel Chávez Cabello, por exigirme siempre una calidad como estudiante, gracias a ambos, por su valiosa orientación, enseñanza y formación como profesionista.

Al Dr. Fernando Velasco Tapia, por el apoyo, comprensión y enseñanzas que siempre me ha concedido.

A Sergio Arregui Ojeda, por su gran apoyo en el manejo de la base de datos sísmicos y disposición para resolver inconvenientes técnicos surgidos durante el proyecto.

A Luis Alberto Sánchez Pérez, por el apoyo en el manejo del software de procesado y por compartirme sus conocimientos geofísicos.

A Martín Francisco Pacheco Romero por instruirme en el uso del software de interpretación y brindarme sus conocimientos geológicos.

Al personal de CICESE y de la FCT, Bárbara Uribe Martínez, Guadalupe Zepeda Tapia, Martha Barrera, Juany y Betty, por su buen trato, apoyo y eficiencia en cuestión de trámites.

A un bello ser que me enseñó que en esta vida hay esperanza, sonrisas y felicidad

A todos mis amigos por siempre hacerme reír, escucharme y compartir parte de su vida conmigo.

A todos los catedráticos que formaron mi conocimiento científico tanto en la FCT como en el CICESE y a todos aquellos que de manera directa o indirecta me apoyaron.

A la Nubi por ser leal, fiel, buena compañía y siempre recibirme con toda la alegría del mundo.

GRACIAS !!!!

RESUMEN

En este trabajo de tesis se realizó el procesamiento e interpretación de líneas sísmicas marinas de reflexión 2D multicanal en el noroeste del Golfo de California, con el objetivo de estudiar rasgos estructurales y sismoestratigráficos en esta zona. Se utilizó la información sísmica colectada por Petróleos Mexicanos (PEMEX) entre los años 1978-1980 durante la ejecución del prospecto San Felipe Tiburón. Esta información se obtuvo usando un arreglo de 48 canales, espaciados a cada 50 m, con siete cañones de aire como fuente de energía, tiempo de grabación de 6.144 s e intervalos de muestreo de 2 ms. La metodología de procesado estándar aplicada a los datos sísmicos incluyó las siguientes etapas: 1) Pre-apilamiento: Geometría, edición de trazas, filtro pasa-banda, filtro F-K y deconvolución; 2) Apilamiento: Ordenamiento de CDP, análisis de velocidad, corrección NMO y apilamiento; 3) Pos-apilamiento: Filtro variable en tiempo, divergencia esférica, control automático de ganancia y migración. Las líneas sísmicas se procesaron e interpretaron en el CICESE, a través de las herramientas de Landmark™: ProMAX® y SeisWorks®, respectivamente, estas secciones longitudinales NW-SE no han sido utilizadas en trabajos previos y presentaron una gran oportunidad para analizar y aportar información para un mejor entendimiento de la estructura así como de la evolución tectónica en el noroeste del Golfo de California, además para complementar el seguimiento e interpretación de las estructuras, tanto de fallas como de horizontes sismoestratigráficos, se utilizaron ocho líneas transversales SW-NE, dos E-W y una NW-SE, previamente procesadas en el CICESE, generando un área de 7,254 km² interpretados. En general, se interpretaron alrededor de dos fallas por cada kilómetro, de las cuales se correlacionaron siete estructuras principales a lo largo de la malla sísmica, haciéndose la descripción de sus principales características. Las fallas interpretadas y correlacionadas son: Volcanes, Volcanes Norte 1, Volcanes Norte 2, Volcanes Sur, Delfín Superior Central, Delfín Inferior Este y Delfín Inferior Oeste. Posteriormente, se definieron y dividieron los límites de secuencias sismoestratigráficas en Holoceno, Pleistoceno, Plioceno y Mioceno Tardío, así como la configuración del basamento acústico y el fondo marino para esta área. La determinación de la posición en milisegundos en las secciones sísmicas de los horizontes mencionados, está apoyada con la correlación de los datos del pozo (W2) cercano al área de estudio, propiedad de Petróleos Mexicano. El análisis de los patrones estructurales en dicho sector a través de la sísmica ayudó para determinar si algunas de las principales estructuras o rasgos dentro del área de estudio (zona marina), tienen alguna correlación con las del bloque volcánico Puertecitos (zona continental), localizado en la costa este de la Península de Baja California. Teniendo un alcance de la sísmica de hasta seis kilómetros, no se encontró evidencia de la continuación de la estructura Arroyo-Matomí, la cual en continente acomodó extensión diferencial entre dos dominios diferentes de fallas, a lo que se concluye que posiblemente esta estructura fue borrada por el tectonismo reciente, con base en lo anterior se interpretó que la falla Volcanes representa al límite entre las placas Norteamérica y Pacífico, operando como la falla actualmente dominante, dicha estructura normal-oblicua derecha tiene un rumbo NNW-SSE a lo largo de la costa peninsular y acomoda deformación en los paquetes sedimentarios. Finalmente no se documentó corteza oceánica en el área de estudio, lo que implica que la corteza puede ser de carácter transicional, debido posiblemente a la cercanía con el delta del Río Colorado y su gran aporte sedimentario hacia las cuencas del norte del Golfo de California; es decir, el peso de la capa sedimentaria pudiera estar retrasando la generación de piso oceánico y generando transiciones en la composición de la corteza.

ABSTRACT

In this thesis, marine seismic lines of multichannel 2D reflection were processed and interpreted in the northwest region of the Gulf of California, with the objective of studying structural and seismostratigraphic features in this zone. Seismic information collected by Petroleos Mexicanos (PEMEX) between the years 1978 and 1980, during the execution of the San Felipe Tiburon Prospect, was used. This information was obtained using an array of 48 channels, spaced every 50 m, with 7 air-guns as a source of energy, 6.144 s of recording time and sampling intervals of 2ms. The standard processing methodology applied to the seismic data included the following steps: 1) Pre-stack: Geometry, trace editing, band-pass filter, F-K filter and deconvolution; 2) Stacking: CDP setting, velocity analysis, NMO correction and stacking; 3) Post-stack: Time variable filter, spherical divergence, automatic gain control and migration. Seismic lines were processed and interpreted in CICESE, using LandmarkTM tools: ProMAX[©] and SeisWorks[©] correspondingly, these NW-SE longitudinal sections have not been used in previous works and the represented a great opportunity to analyze and provide information in order to have a better understanding of the structure and tectonic evolution in the northwest region of the Gulf of California, in addition to complement the monitoring and interpretation of the structures, from both faults and seismostratigraphic horizons, eight SW-NE cross lines, two E-W lines and one NW-SE, previously processed at CICESE were used, creating an area of 7,254 km² interpreted. In general, two faults per kilometer were interpreted, from which seven main faults were correlated along the seismic grid, describing their principal features. The interpreted and correlated faults are: Volcanes, Volcanes North 1, Volcanes North 2, Volcanes South, Upper Delfín Central, Lower Delfín East, and Lower Delfín West. Subsequently, the limits of seismostratigraphic sequences were defined and divided in Holocene, Pleistocene, Pliocene and Late Miocene, as well as the configuration of the acoustic basement and seabed for this area. The determination of the position in milliseconds in the seismic sections of the horizons mentioned above, was supported by correlation of well data (W2) owned by Petroleos Mexicanos, located nearby from the study area. The analysis of the structural patterns in such sector through the seismic helped to determine if some of the major structures or features within the study area (offshore) have any correlation with those from the Puertecitos volcanic block (onshore), located in the east coast of the Baja California Peninsula. Having a range up to six kilometers in the seismic data, there was no evidence of the continuation of the Arroyo-Matomí structure, which accomodated differential extension among two different domains of faulting in the continent, which leads to conclusion that this structure might have wiped out by recent tectonism. On the other hand the Volcanes fault was interpreted as the border of North American and Pacific plate and is considered here as the current dominant fault, such normal-oblique structure spreads NNW-SSE along the peninsular coast and accommodates deformation in sedimentary strata. Endly, no oceanic crust was documented in the study area implying that the crust may have a transitional character, possibly due to the proximity to the delta of the Colorado River and its major sedimentary contribution to the basins on the northern Gulf of California; i.e., weight of the sedimentary layer may be delaying the generation of ocean floor and generating transitions in the composition of the crust.

ÍNDICE

Contenido	Página
1. CAPÍTULO I GENERALIDADES	
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 LOCALIZACIÓN	3
1.3 ANTECEDENTES	4
1.4 HIPÓTESIS	7
1.5 OBJETIVOS Y METAS	9
1.5.1 <i>OBJETIVO GENERAL</i>	9
1.5.2 <i>OBJETIVOS PARTICULARES</i>	9
1.5.3 <i>METAS</i>	9
1.6 METODOLOGÍA	10
2. CAPÍTULO II MARCO TECTÓNICO	
2.1 INTRODUCCIÓN	11
2.2 MARCO TECTÓNICO	11
2.3 DELTA DEL RÍO COLORADO	15
2.4 BLOQUE VOLCÁNICO PUERTECITOS	17
2.5 CUENCA CONSAG	21
2.6 CUENCA DELFÍN SUPERIOR	22
2.7 CUENCA DELFÍN INFERIOR	22
3. CAPÍTULO III METODOLOGÍA	
3.1 INTRODUCCIÓN	23
3.1.1 <i>MÉTODO SÍSMICO DE REFLEXIÓN</i>	23
3.2 ADQUISICIÓN	25
3.3 METODOLOGÍA DE PROCESADO	27
3.3.1 <i>PROCESAMIENTO PRE-APILAMIENTO</i>	28

3.3.1a	Cintas de campo	28
3.3.1b	Geometría	28
3.3.1c	Edición de registros	29
3.3.1d	Filtrado Pasa-Banda	35
3.3.1e	Filtrado F-K	37
3.3.1f	Corrección por divergencia esférica	42
3.3.1g	Deconvolución	43
3.3.2	<i>PROCESAMIENTO APILAMIENTO</i>	46
3.3.2a	Ordenamiento por CDP	46
3.3.2b	Análisis de velocidad	47
3.3.2c	Corrección por NMO	49
3.3.2d	Modelo de velocidad	50
3.3.2e	Apilamiento	51
3.3.3	<i>PROCESAMIENTO POST-APILAMIENTO</i>	52
3.3.3a	Filtro variable en tiempo	52
3.3.3b	Control automático de ganancia	52
3.3.3c	Migración	52
3.4	INTERPRETACIÓN	54
3.4.1	ESTRATIGRAFÍA	55
3.4.2	ESTRUCTURA	58

4. CAPÍTULO IV RESULTADOS

4.1	INTRODUCCIÓN	61
4.2	SECCIONES SÍSMICAS PROCESADAS	63
4.3	ANÁLISIS DE LAS SECCIONES SÍSMICAS	65
4.3.1	CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS SECCIONES NW-SE	66
4.3.2	FALLAS	67
4.3.3	CONFIGURACIÓN DE HORIZONTES, BASAMENTO ACÚSTICO Y FONDO MARINO	84
4.3.4	BLOQUE VOLCÁNICO PUERTECITOS	102

5. CAPÍTULO V DISCUSIONES

5.1 INTRODUCCIÓN	105
5.2 FALLAS	106
5.3 HORIZONTES SISMO-ESTRATIGÁFICOS	110
5.4 FONDO MARINO	111
5.5 BASAMENTO ACÚSTICO	112
5.6 BLOQUE VOLCÁNICO PUERTECITOS/ESTRUCTURA ARROYO-MATOMÍ	113
5.7 CORTEZA DEL NOROESTE DEL GOLFO DE CALIFORNIA ¿OCEÁNICA O CONTINENTAL?	113

6. CAPÍTULO VI CONCLUSIONES 115

BIBLIOGRAFÍA 117

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1.1	Mapa estructural del Golfo de California donde se muestra el área de estudio (polígono negro), que incluye las Cuencas Consag y Delfín. También se muestra la Falla San Andrés (FSA) y la Falla Cerro Prieto (FCP). Stock <i>et al.</i> (2010) Proponen cambiar el nombre de esta ultima falla a Indiviso, después del terremoto de magnitud 7.2 ocurrido el 07 de abril de 2010, en la región donde se ubica dicha falla. E - Ensenada, CSL - Cabo San Lucas, PVT - Puerto Vallarta (modificada de González -Escobar <i>et al.</i> , 2010).....	3
1.2	Muestra los depocentros de las cuencas Consag y Delfín (azul claro), las fallas con su echado aparente (líneas rojas) y los volcanes submarinos (triángulos rojos) reportados por Persaud (2003), Persaud <i>et al.</i> (2003), para la región del noroeste del Golfo de California.....	4
1.3	Síntesis estructural regional del norte del Golfo de California realizada con base en la interpretación sísmica de los datos de PEMEX (Aragón-Areola, 2007). Las áreas en gris corresponden a depocentros de las cuencas activas Wagner, Consag, Delfín Superior y Delfín Inferior.....	5
1.4	El polígono azul muestra el área de estudio y en amarillo se visualizan las líneas sísmicas procesadas para este trabajo. Se incluye interpretación de: Aguilar-Campos, 2007; Pérez-Hernández 2007 y Persaud, 2003.....	6
1.5	Modelo tradicional que propone dos etapas, una de extensión ortogonal entre los 12 y 6 Ma. y otra de extensión oblicua entre los 6 y 0 Ma. (Modificada de Stock y Hodges, 1989).....	8
1.6	Modelo que propone una sola etapa de extensión oblicua desde el cese de la subducción hace 12 Ma., plantea que parte de la deformación ocurrió en la región costera de Sonora (Gans, 1997; Fletcher <i>et al.</i> , 2007).....	8
2.1	Mapa mostrando las provincias morfotectónicas Sierra Madre Occidental, Provincia Extensional del Golfo de California y Provincia de Cuencas y Sierras, producto de la interacción de la placa Farallón con el borde continental de Norteamérica (Modificada de González-Escobar <i>et al.</i> , 2010).....	12
2.2	Evolución tectónica del Golfo de California (Tomada de Stock y Lee, 1994).....	14

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
2.3	La figura muestra la zona de captación del Río Colorado y en amarillo la zona de acumulación sedimentaria. La batimetría poco profunda en el norte del Golfo de California se debe al gran influjo de sedimentos del Rio Colorado (Modificada de Dorsey, 2010).....	16
2.4	a) Dominios de fallas normales e inclinación propuestos, así como las principales fallas que los delimitan. b) Mapa geológico mostrando la configuración de fallas en el basamento cristalino después de que las rocas del Terciario se separaran, y la estructura propuesta (falla de rumbo lateral izquierdo) para acomodar extensión diferencial entre el dominio II y III (Tomada y modificada de Dokka y Merriam, 1982).....	20
2.5	Modelo análogo del Clay-Cake para el fallamiento normal del Cenozoico Tardío en el Noroeste de Baja California (Tomada de Dokka y Merriam, 1982).....	21
3.1	Arreglo para la adquisición a través de sísmica de reflexión marina. La energía es producida por pistolas de aire que generan una implosión generando cambios de presión en el agua, dichos cambios son registrados y transformados a volts/Bar por los hidrófonos (receptores) localizados dentro del cable de registro conocido como <i>streamer</i>	24
3.2	Etapas del método sísmico: adquisición, procesado e interpretación de datos sísmicos.....	24
3.3	Líneas sísmicas procesadas en la presente tesis (color amarillo) dentro del polígono azul que muestra el área donde se realizó el estudio. Se incluye interpretación de: Aguilar-Campos (2007); Pérez-Tinajero (2007), Pérez-Hernández (2008) y Persaud (2003).....	26
3.4	Secuencia básica a seguir para el procesamiento de datos sísmicos de reflexión 2D multicanal.....	27
3.5	Tablas donde se modifican los parámetros geométricos de las líneas sísmicas.....	28
3.6	Línea 5072: a) El círculo rojo muestra un <i>gather</i> ruidoso desde la traza 1 a la 48, las flechas rojas indican una traza ruidosa que aparece persistentemente en las fuentes 2-5. b) <i>kill trace</i> aplicado en la fuente 1 eliminando las trazas 1-48.....	30

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
3.7	Las figuras a) y b) muestran dos ejemplos de los ruidos encontrados en las líneas procesadas, donde el formato de estos cambia en los diferentes segmentos. Todos se eliminaron con la aplicación del <i>kill trace</i>	31
3.8	a) Línea 5080 segmento 1 sin ningún proceso, b) Aplicación del <i>kill trace</i> para eliminar las trazas con una relación <i>S/R</i> baja, c) Selección de la señal a eliminar a través del <i>Top Mute</i> , d) Resultado final después de la aplicación de <i>kill trace</i> , <i>Top Mute</i> y definición de etiquetas.....	34
3.9	Análisis del contenido frecuencial: a) <i>gather</i> sin filtro pasa banda; b) registro con filtro pasa banda aplicado, el mayor contenido de la frecuencia se encuentra en 15-85 Hz; c) comparación de (a) y (b).....	36
3.10	En color rojo se muestra la señal original que se desea ser reproducida a través del muestreo y digitalización, b) en color azul se muestra la señal obtenida si la tasa de muestreo no cumple con el criterio de Nyquist (Tomada de Stolfi, 2004).....	37
3.11	Análisis F-K: a) detección de <i>aliasing</i> y visualización del filtro <i>Notch</i> representado por 60 Hz, b) respuesta al remover el <i>aliasing</i> del registro a través de la definición del trapecio en el dominio F-K.....	39
3.12	El ruido muestra una fase consistente y se localiza en la zona donde está la señal de interés, por lo que el filtro F-K se ajusta en los <i>gather</i> s donde este aparece.....	40
3.13	Múltiples eliminados a través de la modificación del polígono en el dominio F-K.....	41
3.14	Propagación de los frentes de onda (Tomada de Nordmann, 2007).....	42
3.15	Modelo de convolución tomando en cuenta solo la respuesta reflectiva de las capas sin la intervención de ruidos).....	44
3.16	Ventanas de correlación de la señal de entrada o impulso, realizan una comparación de la señal en ventanas de tiempo para escoger los parámetros que se estipularán en la deconvolución de <i>spike</i>	45

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
3.17	Muestra la ubicación del CMP y el CDP para la primera capa de un medio, la traza CDP contiene información proveniente de diferentes fuentes y receptores en un mismo punto en profundidad.....	46
3.18	Análisis de velocidad donde se muestra de izquierda a derecha: 1) El espectro de semblanza, en la paleta de colores seleccionada el rojo representa valores altos de semblanza. 2) Registro CDP a corregir. 3) Corrección dinámica por NMO. 4) Método de velocidad constante.....	48
3.19	A través del modelo de velocidades se genera la corrección por NMO en donde los reflectores pasan de hiperbólicos a horizontales.....	49
3.20	Modelo de velocidad generado para la línea 5080, la paleta de colores indica mayores velocidades (m/s) en tonalidades rojas y velocidades menores en tonalidades azules.....	50
3.21	Sección apilada perteneciente a la línea 5084.....	51
3.22	La sección sísmica apilada perteneciente a la línea 5080, contiene migración de <i>Kirchoff</i> . En esta figura no han sido aplicadas las correcciones de amplitud.....	53
3.23	Muestra la sección sísmica apilada perteneciente a la línea 5080, la cual fue migrada utilizando <i>FK-Stolt</i> y contiene el algoritmo de Control Automático de Ganancia.....	54
3.24	Clasificación de terminación de capas en las secciones sísmicas. Las terminaciones estratigráficas son los componentes fundamentales de la sísmica estratigráfica 2D (Modificada de Liner, 2004).....	58
3.25	El desplazamiento en los reflectores indica la presencia de una falla, nótese que el paquete desplazado tiene amplitudes que se correlacionan muy bien con las de su bloque de piso y el espesor se mantiene muy similar.....	59
3.26	Terminación de alineamiento de capa en una sección sísmica, la continuidad lateral del reflector termina en el plano de falla y continúa del otro lado, evidenciando la presencia de esta.....	60

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
4.1 De derecha a izquierda, acercándose a la costa de Baja California se muestran las líneas longitudinales procesadas (líneas rojas): 5072, 5076, 5080, 5084, así como la malla sísmica transversal 2D utilizada como apoyo (líneas amarillas).....	62
4.2 Perfil A-B de la línea 5084 NW-SE (línea blanca), después de proceso post-apilamiento. En esta línea en particular no se tuvo información disponible en el segmento que va del CDP 800-1300, lo cual es visible en el espacio vacío de la parte media de la sección.....	63
4.3 Perfil A-B de la línea 5080 NW-SE (línea blanca), después de proceso post-apilamiento.....	64
4.4 Perfil A-B de la línea 5076 NW-SW (línea blanca) con proceso post-apilamiento. El fondo marino se profundiza hacia el sur (CDP 4800-5150), cerca de los límites de la Cuenca Delfín Inferior.....	64
4.5 Perfil A-B de la línea 5072 NW-SE (línea blanca), después de proceso Post-apilamiento. De igual manera que en la línea 5076, la parte NW es mas somera que la parte SE. El mapa batimétrico muestra las zonas más profundas (tonos en color azul) y someras (tonalidades anaranjadas) dentro del área de estudio.....	65
4.6 Tres diferentes perspectivas para la trayectoria de las fallas a partir de los rasgos observados en las líneas sísmicas.....	68
4.7 Distribución de las estructuras correlacionadas a lo largo de las secciones sísmicas en color blanco y la dirección de su echado aparente.....	71
4.8 Muestra las fallas correlacionadas para este trabajo:1) Falla Volcanes a partir de la cual se genera un gran número de ramificaciones de fallas, ya que funciona como una estructura de <i>horse tail splay</i> “cola de caballo”. Persuad <i>et al.</i> , (2003) denomina a Falla Canal de Ballenas como la continuación sur de la falla Volcanes. La Falla Volcanes, está caracterizada por su oblicuidad, echado hacia el este y una longitud grande, 2) Falla Volcanes Norte1 y 2, con orientación al este, derivadas de la Falla maestra	

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
4.8	Volcanes (así como todas las demás en la figura), 3) Falla Volcanes Sur con echado al oeste, 4) Falla Delfín Superior Central, la cual pasa en medio de la Cuenca Delfín Superior y tiene una caída de los estratos hacia el este, 5) Falla Delfín Inferior Oeste, con un echado aparente hacia el este, 6) Falla Delfín Inferior Este, con echado al oeste. Los colores que muestran los nombres de las fallas son con los que estas aparecen en las secciones sísmicas utilizadas.....	72
4.9	Línea 5084 que muestra un patrón de fallas normales casi verticales y semiparalelas entre ellas, buzando hacia el SE en la porción NW y al NW en la porción SE, que tienden a converger en la parte central.....	73
4.10	Línea 5080, en donde la densidad de fallas de aproximadamente 1/km; estas se comportan de la misma manera que la línea 5084, pero presentan mayor longitud. En la parte NW tienen caída hacia el E y las del SE son casi verticales o muestran una ligera caída hacia el W. Las secuencias sedimentarias tienden a converger hacia el centro alrededor del CDP 2700, las fallas son normales con caídas E y W, lo que hace que haya un desplazamiento de los horizontes o paquetes hasta por varias decenas de metros.....	74
4.11	Línea 5076, que presenta rasgos interpretados como flujos hidrotermales, el primero ubicado del CDP 1,100-1,300, el segundo del CDP 1,500-1,600, el tercero del CDP 1,800-2,000 y, finalmente uno del CDP 4,000-4,200, todos estos cortan verticalmente a las secuencias sedimentarias y por consecuencia están limitados por fallas normales semiparalelas en sus extremos. La densidad de Fallas es de 3/6 km, las estructuras del NW tienen un echado al E y las del SW caen hacia el W, son de ángulo moderado casi verticales y semiparalelas entre ellas, todas tienden a converger hacia la parte central. La falla Volcanes en color rosa toca 2 veces con la línea en el CDP 3,400 y 3,700, generando una geometría parecida a la de un <i>graben</i> en la sección.....	75
4.12	Línea 5072, presenta flujos hidrotermales en el CDP 5450-5350 y en el CDP 2450-2350, la densidad de fallas es de 3/7 km, las fallas tienen un carácter semiparalelo entre ellas y son casi verticales, las del sector NW desde el CDP 7,350 tienen un rumbo	

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
<p>4.12 hacia el este, y las del sector SE hacia el oeste, la secuencia converge en el CDP 3950, en donde se localizan las fallas correlacionadas: 1) Falla Volcanes (rosa), 2) Falla Volcanes Norte 2 (anaranjada), 3) Delfín Superior Central (azul), 4) Volcanes Sur (verde); hacia el SE de la sección, del CDP 1200-950, se encuentra una depresión prominente perteneciente a el área de la cuenca Delfín Inferior, este hundimiento de aproximadamente 12 Km., esta limitado en sus extremos por las fallas que se interpretaron y correlacionaron como: 5) Falla Delfín Inferior Oeste (anaranjada), 6) Falla Delfín Inferior Este (rosa). Las fallas en la sección son normales y a su vez generan antitéticas. La Falla Volcanes limita en la parte oeste a las Cuencas Delfín y se considera como la falla actualmente dominante y activa.....</p>	76
<p>4.13 Línea 5451 con dirección W-E, muestra la falla Volcanes (rosa), falla Volcanes Norte 2 (anaranjada), falla Delfín Superior Central (azul), ubicada en el depocentro de la Cuenca Delfín Superior y falla Volcanes Sur (verde), todas ellas funcionando como límites de la cuenca Delfin Superior. El mapa en la esquina inferior izquierda muestra la ubicación del segmento A-B de la línea sísmica.....</p>	77
<p>4.14 Sección en Zig-Zag de las líneas 5471, 5064, 5067 con dirección W-E, SE-NW y NE-SW respectivamente. La falla Volcanes Sur esta representada en color verde y la falla Delfín Superior Central en azul. Las secuencias tienden a hundirse en el trazo B-C y C-D, debido a su ubicación cerca del depocentro de la Cuenca Delfín Superior. En el mapa inferior se incluye la interpretación de los depocentros de las cuencas del norte realizada por Persuad <i>et al.</i>, (2003), las siete estructuras correlacionadas para este trabajo, así como la malla sísmica de PEMEX en su totalidad. Nótese que la dirección de los segmentos A-B-C-D indica la trayectoria que sigue el despliegue de Zig-Zag.....</p>	78
<p>4.15 Sección en Zig-Zag de las líneas 5471W-E, 5064 SE-NW, 5067 NE-SW, en el segmento A-B se visualiza el echado aparente hacia el E de las fallas Volcanes (rosa), Delfin Superior Central (azul) y Volcanes Sur (verde) hacia el W. En el sector B-C la caída de la falla Volcanes Sur concuerda con lo interpretado en el segmento A-B y finalmente en el segmento C-D el plano de la falla Delfín superior Central converge, esta convergencia se usa como criterio de correlación de fallas; es decir, de acuerdo al ángulo que forman las líneas correlacionadas, su orientación, forma y echado natural</p>	

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
4.15	de la falla, se determina cómo será el comportamiento de una misma falla en diferentes secciones, esto es; si debe ser convergente o divergente. El mapa inferior muestra en color azul las secciones A-B-C-D y su interacción con las fallas mencionadas. La cuenca Delfín Superior esta delimitada en su parte oeste por la Falla Volcanes, la cual controla actualmente la deformación en el area y presenta gran actividad volcánica; las otras tres fallas correlacionadas dentro de esta cuenca, parecen derivarse de esta falla principal. El mapa inferior muestra las siete estructuras correlacionadas en este trabajo y estan representadas con los colores con los que aparecen en los perfiles sísmicos.....	79
4.16	Sección en Zig-Zag de las líneas 5093 con dirección SW-NE y 5064 SE-NW, en la zona Delfín Inferior. El segmento A-B muestra de derecha a izquierda: 1) Falla Volcanes (rosa) buzando al E, tiene una componente normal y un desplazamiento lateral derecho, 2) Falla Delfín Inferior Oeste (anaranjado) con echado al E, 3) Falla Delfín Inferior Este (rosa) hacia el W. Otra característica importante en este segmento es la obvia profundización del fondo marino hasta 1,200 ms y el pico prominente ubicado entre el CDP 550-650, este levantamiento en la secuencia del Holoceno-Pleistoceno es originado posiblemente por la alta actividad volcánica del Plioceno Tardío, en esta cuenca activa. En el Segmento B-C la falla Delfin inferior oeste converge con la de la sección A-B y la Falla Delfín Inferior Este diverge con su respectiva en la sección A-B, esto concuerda con los criterios de correlación, ya que el segmento B-C tiene una dirección SE-NW.....	80
4.17	Sección en Zig-Zag de las líneas 5067 con dirección SW-NE y 5064 NW-SE en la zona Delfín Superior. El segmento A-B despliega de izquierda a derecha a la fallas Volcanes, Volcanes Norte, Delfin Superior Central y la B-C a las fallas Delfin Superior central, la cual converge con su respectiva en el segmento A-B y a la falla Volcanes Sur, ésta última no aparece en la primera sección por que no es tocada por la línea, como se puede visualizar en el mapa inferior que despliega la ubicación de los segmentos A-B-C en color azul.....	81

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
<p>4.18 Sección en Zig-Zag de las líneas 5076 con dirección NW-SE, 5471 W-E y 5075 NE-SW respectivamente, en la zona Delfín Superior, Las fallas volcanes, Delfín Superior Central y Volcanes Sur son desplegadas de izquierda a derecha en el segmento B-C, estas fallas acomodan subsidencia en la cuenca, modificando la geometría en las secuencias estratigráficas que están representadas en la sección por las líneas de colores horizontalmente semicontinuas. En el CDP 1,700- 2,100 hay un hundimiento de aproximadamente 400 m, representando el depocentro de la cuenca Delfín Superior. Las fallas juegan un papel fundamental, controlando la subsidencia de las cuencas, para esta área predominan las fallas de carácter normal y oblicuo. El mapa inferior muestra en color amarillo la ubicación de los segmentos A-B-C-D.....</p>	82
<p>4.19 Sección en Zig-Zag de las líneas 5071 con dirección E-W y 5467 SW-NE, la falla Volcanes en rosa y la Delfín Superior Central divergen en las secciones, ya que las dos tienen una caída hacia el E; el mapa inferior muestra en amarillo la ubicación de los segmentos A-B-C.....</p>	83
<p>4.20 Línea 5084 NW-SE localizada en las cercanías de la costa peninsular, muestra las secuencias estratigráficas correlacionadas. La profundidad del fondo marino no es mayor de 100 ms, los espesores para las secuencias del Holoceno, Pleistoceno y Plioceno no supera los 500 ms, mientras que el Mioceno Tardío alcanza un espesor máximo de 2300 ms.....</p>	88
<p>4.21 Línea 5080 localizada paralelamente a 10 km de distancia de la costa peninsular. El lecho marino se muestra somero, no superando los 150 ms, el Holoceno presenta espesores de 100-500 ms, el Pleistoceno de 400-1,300 ms, el Plioceno de 300-1,000 ms y el Mioceno Tardío 1000-2000 ms; los valores máximos en los espesores ocurren del CDP 3,100-2,300 para el Holoceno-Pleistoceno y del CDP 2,300-1,300 para el Plioceno-Mioceno Tardío, y los valores mínimos, se localizan para todas las secuencias, en el extremo NW de la sección. El mapa inferior muestra la ubicación de la sección A-B.....</p>	89
<p>4.22 Línea 5076 NW-SE, muestra un lecho marino muy somero de aproximadamente 150 ms, el cual profundiza 400 ms al acercarse a la Cuenca Delfín Inferior. Los espesores aproximados para el Holoceno, Pleistoceno y Plioceno están acunados en su parte NW de la sección y no supera los 200 ms, en el rango del</p>	

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
4.22	CDP 700-1200 y el CDP 2,000-2,600, se visualiza un aumento considerable en el espesor de estas tres secuencias, llegando a un máximo de 650 ms, ambos crecimientos en la secuencia están limitados en sus extremos por fallas que caen en sentido contrario. En la secuencia Miocénica, el espesor es de 2,100 ms en los extremos y 2,700 ms del CDP 2,800-400. El basamento acústico profundiza hacia Delfín Inferior.....	90
4.23	Línea 5072 con orientación NW-SE donde se muestra que el fondo marino en el sector NW es muy somero en comparación con la parte sur , donde alcanza los 1,300 ms al delinear los extremos E y W de la Cuenca Delfín Inferior, representados por la falla Delfín Inferior Este (rosa) en el CDP 950 y falla Delfín Inferior Oeste (anaranjada) en el CDP 1,350. El espesor en el sector NW para el Holoceno, Pleistoceno, Plioceno y Mioceno Tardío es de 100, 600, 650 y 500 ms, respectivamente; el espesor aumenta 300 ms en el CDP 4750-3150 donde se encuentran las fallas Volcanes, Volcanes Norte, Delfín Superior Central y Volcanes Sur, las cuales delinear a la Cuenca Delfín Superior.....	91
4.24	Línea 5072 con orientación NW-SE, muestra al pozo W2 y el despliegue de sus cimas para cada secuencia estratigráfica. Los marcadores ajustan con los horizontes interpretados.....	92
4.25	Acercamiento de la trayectoria del pozo W2 en la línea 5072, los marcadores del pozo que representan la cima de las secuencias coincidiendo satisfactoriamente con la ubicación de los horizontes interpretados; por otro lado, el pozo incluye a las cimas de las diferentes facies dentro de las secuencias principales, las cuales no fueron correlacionadas en este trabajo. El mapa en la parte inferior derecha muestra dentro del recuadro amarillo la localización del pozo W2.....	93
4.26	Línea 5076 con orientación NW-SE; muestra el pozo W2 y el despliegue de sus cimas para cada secuencia estratigráfica. Los marcadores ajustan con los horizontes interpretados.....	94
4.27	Sección en Zig-Zag de las líneas 5076, 5053, 5072 con dirección SE-NW, SW-NE y NW-SE, respectivamente, en donde hay una coherencia en el comportamiento de los reflectores interpretados en los tres segmentos y un ajuste ideal con los datos del pozo W2. El mapa inferior muestra la ubicación de los segmentos A-B-C-D en color amarillo. Nótese que el basamento acústico tiende a subir en el segmento B-C y que el comportamiento de las secuencias esta controlado por el patrón de fallas.....	95

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
4.28	Mapa de isolíneas para la secuencia Holoceno, la cima de esta secuencia de sedimentos juvenes ≤ 1 Ma. es mas somera al oeste, cerca de la línea de costa, con valores en tiempo doble que varían entre 100 y 200 ms máximo hacia el este; al tocar la zona de la Cuenca Delfín Superior toma valores de 284-639 ms, el contraste más fuerte se visualiza al SE acercandose a la Cuenca Delfín Inferior donde profundiza hasta 1,000 ms.....	96
4.29	Mapa de isolíneas para la secuencia Pleistoceno, los colores en las líneas representan los lugares donde se interpretó y correlacionó el horizonte sismo-estratigráfico, esta secuencia alcanza valores máximos de 2,200 ms al acercarse a la zona de la Cuenca Delfín Inferior y los valores mínimos en las zonas pegadas a la costa peninsular, estas son de aproximadamente 200-600 ms, en la zona de la Cuenca Delfín Superior, los valores característicos están en 650-900 ms.....	97
4.30	Mapa de isolíneas para la secuencia Pliocénica, los colores en las líneas representan los lugares donde se interpretó y correlacionó el horizonte sismo-estratigráfico, esta secuencia tiene valores de que van de 250 – 2,250 ms, los valores más altos forman una línea recta desde Delfín Superior hasta Delfín Inferior, siendo en esta última cuenca donde se alcanza un valor máximo de 2,250 ms, en la zona de costa peninsular los valores son mínimos y estan representados en el mapa por los colores amarillo-rojo-verde.....	98
4.31	Mapa de isolíneas para la secuencia perteneciente al Mioceno Tardío, este horizonte sismoestratigráfico está caracterizado por espesores mayores de 1,500 ms, su cima alcanza valores que van desde 900 hasta los 2,800 en las zonas más profundas o depocentros de las cuencas, su gran despliegue se debe a el inicio de la incursión marina en la Provincia Extensional del Golfo de California y a toda la carga sedimentaria que se depositó durante esta época. En la secuencia interpretada, así como en los datos de pozo, no se reporta Mioceno Medio, posiblemente debido a una erosión.....	99
4.32	Mapa de isolíneas para la configuración batimétrica o del lecho marino, la profundización de el fondo submarino se hace evidente en la zona SW de La Cuenca Delfín Inferior llegando hasta los 1,500 en la línea 5072 y 700 ms en la línea 5076, las líneas pegadas a la margen peninsular presentan una somerización que puede llegar hasta un mínimo de 50 ms y no rebasa los 200 ms. La Cuenca Delfín Superior profundiza hasta a no más de 700 ms.....	100

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
4.33	Mapa de isolíneas para la configuración del basamento acústico; como se visualiza en el mapa, el basamento se presenta desde los 2,500 ms hasta los 5,300 ms. El mapeo del basamento no es tarea fácil, ya que en varias líneas su cima suele ser muy difusa, lo que complica su seguimiento; por esta razón, el mapa que aquí se presenta es solamente una propuesta de la posible ubicación inferida a través de la pérdida de señal en las secciones.....	101
4.34	Línea 5076 y 5072 que muestran una falla que controla estructuralmente el área de estudio, con una echada al Este, inclinando a las secuencias sedimentarias hacia esa misma dirección, lo que contrasta con lo que se esperaría si existiera la continuación de la estructura Arroyo-Matomí.....	104
5.1	Distribución de las siete fallas interpretadas y correlacionadas en el área de estudio, representadas en el mapa por los siguientes números: 1) Volcanes, 2) Volcanes Norte 1, 3) Volcanes Norte 2, 4) Delfín Superior Central, 5) Volcanes Sur, 6) Delfín Inferior Oeste y 7) Delfín Inferior Este. El mapa también incluye la interpretación de los depocentros de las cuencas del norte realizada por Persuad <i>et al.</i> (2003.....	109
5.2	Configuración final del Fondo Marino para el área de estudio. Los colores indican el tiempo doble en milisegundos en el que se encuentra el lecho marino, siendo los amarillos los más bajos y los purpura los máximos (no rebasan los 1,000 ms). Cabe mencionar que la equivalencia de milisegundos y metros, es de uno a uno aproximadamente.....	111
5.3	Configuración final para el basamento acústico en el área de estudio. Los colores indican el tiempo doble al que se encontró el basamento acústico en las secciones analizadas para este trabajo.....	112

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
3.1	Parámetros de adquisición de los datos sísmicos marinos multicanal 2D en el área San Felipe-Tiburón.....	25
3.2	Valores de resolución vertical para diferentes velocidades y frecuencias, nótese que la resolución está en función de los valores de la longitud de onda.....	57
4.1	Muestra la extensión en kilómetros de las cuatro líneas sísmicas marinas 2D Procesadas para este trabajo.....	66

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación		Página
1	Ecuación del modelo deconvolucional de un registro.....	43
2	Ecuación para calcular los coeficientes reflectivos.....	43
3	Ecuación del radio de Fresnel.....	56
4	Ecuación para la longitud de onda.....	57
5	Ecuación para la resolución vertical.....	57

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

La provincia extensional del Golfo de California es un ejemplo de transición de *rifting* continental a dispersión de piso oceánico y su apertura está directamente relacionada con el movimiento dextral del sistema de falla de San Andrés (Larson *et al.*, 1968). El Golfo de California constituye un segmento del límite de placas Norteamérica y Pacífico. Las fallas activas en el norte del Golfo de California se localizan en su región occidental que comprenden las cuencas Wagner, Consag, Delfín Superior e Inferior, frente a las costas de Baja California entre la Bahía de los Ángeles y San Felipe (Fig.1.1). Estas cuencas se han desarrollado dentro de la frontera de las placas Norteamérica-Pacífico y están caracterizadas por contener una alta densidad de fallas, aproximadamente 18/5km (Persaud *et al.*, 2003). La deformación está distribuida en varias zonas de *rift* dominadas por fallamiento normal y oblicuo (Persaud *et al.*, 2003). Sin embargo, en todo el Golfo las cuencas son producidas por un sistema extensional oblicuo en el cual la deformación a rumbo se acomoda en fallas transformes en el sur y en fallas de rumbo y oblicuas en el norte (Fenby y Gastil, 1991; Nagy y Stock, 2000; Stock, 2000). A diferencia de la boca del Golfo, donde la formación de corteza oceánica inició alrededor de los 3.5 Ma (DeMets, 1995; Lonsdale, 1989), el norte del Golfo carece de corteza oceánica “*sensu stricto*” ya que no presenta anomalías magnéticas simétricas y no se ha documentado corteza oceánica (Persaud *et al.*, 2003). La frontera de las placas al sur del Golfo y en su parte central abarca zonas más estrechas de deformación, por ejemplo; la Cuenca de Guaymas y la zona de falla del Canal de Ballenas (Fig. 1.1). El norte del Golfo, en contraste, contiene zonas amplias de deformación difusa semejantes a las que se tienen en el continente, como es en la región del Valle de Mexicali e Imperial y por lo tanto, se considera que la frontera de placa en dicha zona, puede ser delgada ya que es el paso de un régimen continental a un régimen oceánico como lo es el sur del Golfo de California (Molnar, 1988). Debido a la alta tasa de sedimentación y la ausencia de evidencia de formación de piso oceánico, la corteza del norte del Golfo se espera que pueda ser similar a una corteza transicional (Persaud, 2003).

Con la finalidad de incrementar el conocimiento sobre la tectónica y estructura cortical entre las placas Norteamericana-Pacífico en el norte del Golfo de California, se propuso en esta tesis realizar el procesamiento e interpretación de líneas sísmicas marinas de reflexión 2D multicanal, propiedad de Petróleos Mexicanos (PEMEX), centrandó el análisis en determinar en dicha zona: 1) el comportamiento de las estructuras; 2) la caracterización estructural y estratigráfica; 3) la presencia de piso oceánico y; 4) la existencia de la estructura Arroyo-Matomí en la zona marina. Es importante mencionar que las líneas sísmicas aquí procesadas no habían sido utilizadas en trabajos previos. A la información procesada se le anexaron líneas sísmicas previamente procesadas en el CICESE (Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007, González-Escobar *et.al.*, 2007), como apoyo se empleó la información del pozo W2 cercano al área de estudio, los datos de pozo fueron proporcionados por PEMEX, estos sirvieron para ajustar un modelo de velocidad y poder hacer la correlación de horizontes reflectores, lo que contribuyó a una mejor interpretación estructural y estratigráfica.

El contar con información sísmica de la industria petrolera, representa una excelente oportunidad para estudiar las características tectónicas de esta región. El conocimiento y aplicación correcta de las metodologías tanto de adquisición como de procesado dan como resultado secciones sísmicas de alta calidad, lo que ayuda a los intérpretes a reconocer estructuras geológicas importantes así como localizar con mayor facilidad las zonas de interés, cabe remarcar que es grande la importancia de la calidad del procesado de datos, pero no significa que resuelva del todo los enigmas a los que se enfrentan los intérpretes.

1.2 LOCALIZACIÓN

El área de estudio se localiza en la parte noroeste del Golfo de California, las principales fallas transformantes y cuencas extensionales del norte del Golfo de California incluyen, de norte a sur: Falla Cerro Prieto, la Cuenca de Wagner, Cuenca Consag, Cuencas Delfín Inferior y Superior y el sistema de falla transformante de Ballenas (Fig. 1.1).

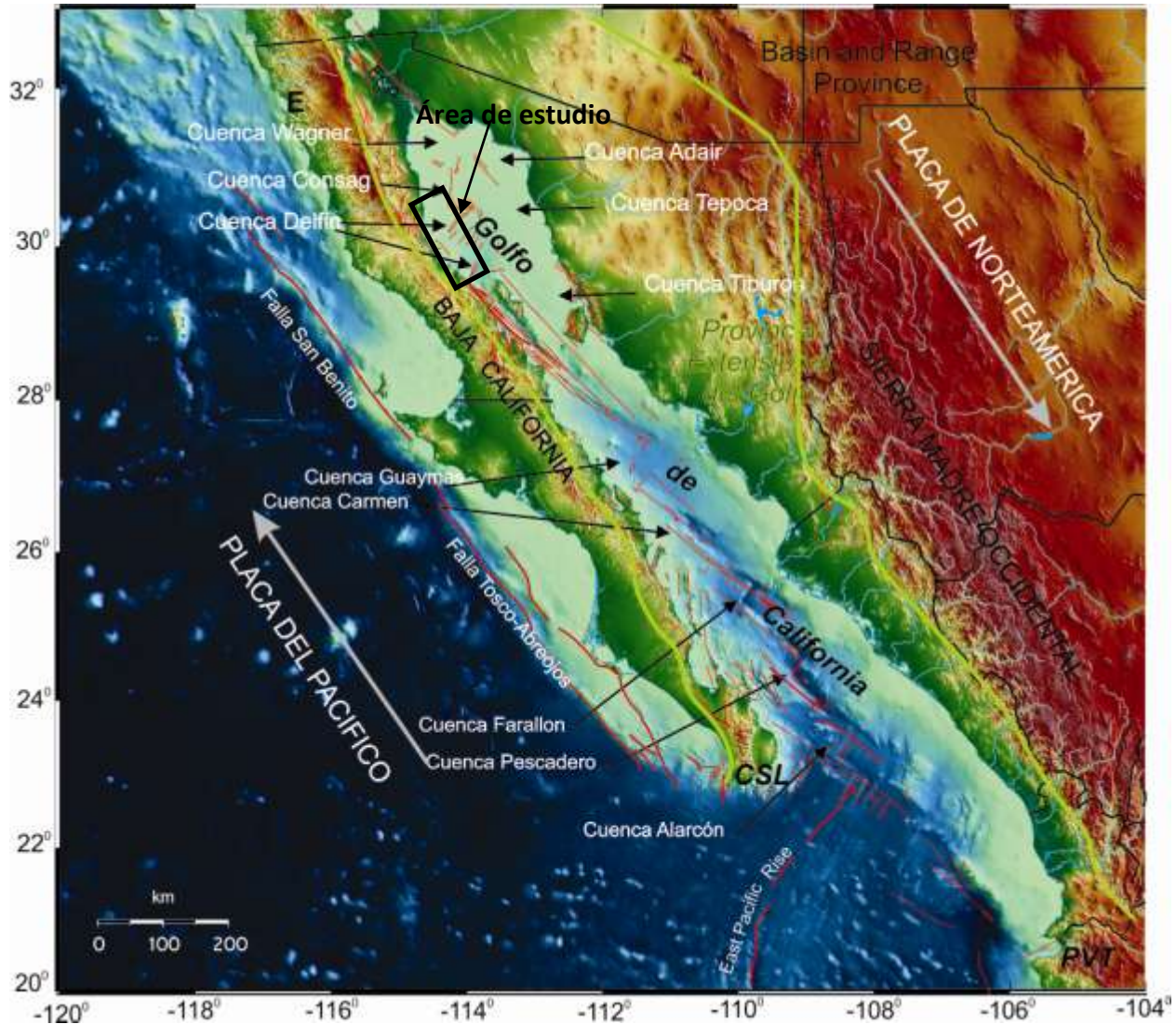


Figura 1.1 Mapa estructural del Golfo de California donde se muestra el área de estudio (polígono negro), que incluye las Cuencas Consag y Delfín. También se muestra la Falla San Andrés (FSA) y la Falla Cerro Prieto (FCP). Stock *et al.*(2010) Proponen cambiar el nombre de esta ultima falla a Indiviso, después del terremoto de magnitud 7.2 ocurrido el 04 de abril de 2010, en la región donde se ubica dicha falla. E - Ensenada, CSL - Cabo San Lucas, PVT - Puerto Vallarta (modificada de González -Escobar *et al.*, 2010).

1.3 ANTECEDENTES

Hasta los años 90's la interpretación más detallada de la tectónica del norte del Golfo, fue a partir de datos obtenidos de sísmica de reflexión de un solo canal adquiridos en 1970 (Bischoff y Henyey, 1973). Estos investigadores conformaron un mapa de fallas del norte del Golfo; su interpretación a partir de los datos sísmicos fue; sin embargo, limitada por reflexiones múltiples generada por estructuras y por reverberaciones derivadas de la señal de la fuente. Persaud *et al.* (2003) reportaron una gran cantidad de estructuras en el noroeste del Golfo de California (Figs. 1.2 y 1.3), así como algunas características de los depocentros en dichas cuencas a partir de la interpretación de datos sísmicos de alta resolución colectados en 1999, con una penetración de hasta 2 km por debajo del fondo marino. Sin embargo, los datos no permiten ver las estructuras profundas. Posteriormente, en CICESE se realizó una primera interpretación a partir de datos sísmicos propiedad de PEMEX (Fig. 1.3) (Aragón-Arreola, 2007; González-Escobar *et al.*, 2006).

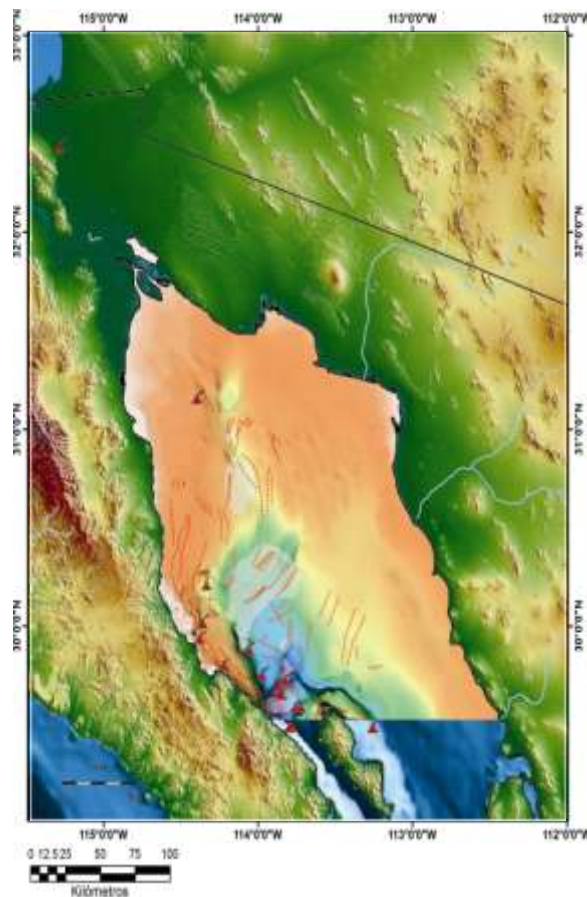


Figura 1.2 Muestra los depocentros de las cuencas Consag y Delfín (azul claro), las fallas con echado aparente (líneas rojas) y los volcanes submarinos (triángulos rojos) reportados por Persaud (2003), Persaud *et al.* (2003), para la región del noroeste del Golfo de California.

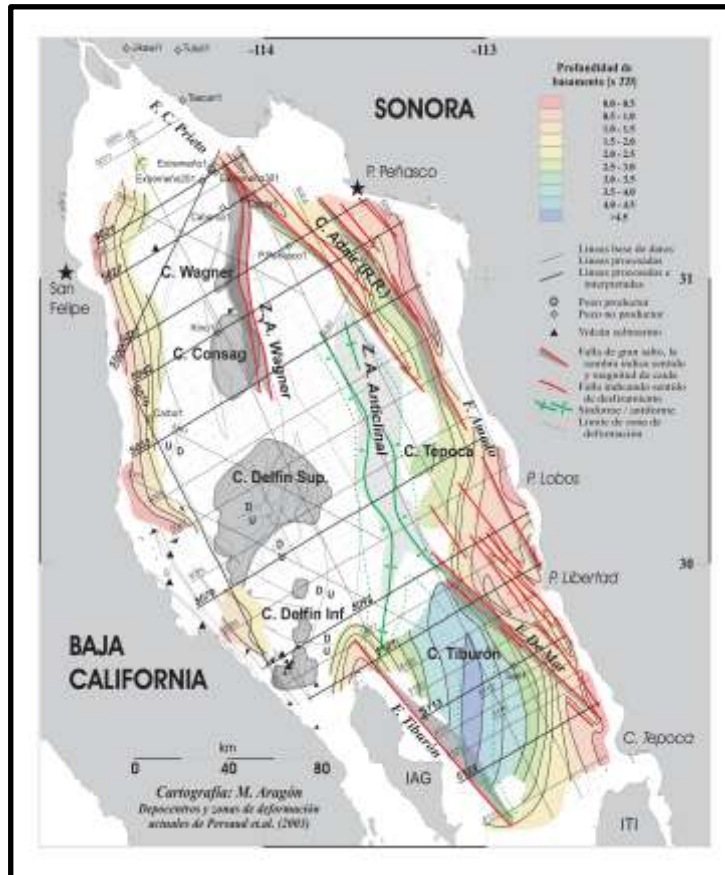


Figura 1.3 Síntesis estructural regional del norte del Golfo de California realizada con base en la interpretación sísmica de los datos de PEMEX (Aragón-Areola, 2007). Las áreas en gris corresponden a depocentros de las cuencas activas Wagner, Consag, Delfín Superior y Delfín Inferior.

Sin embargo, la estructura profunda de la frontera de placas y la historia sedimentaria del norte del Golfo de California, región donde se localiza el área de estudio (Fig. 1.1), tienden a ser oscurecidos por la alta tasa de sedimentación y la poca presencia de sismos fuertes. Hasta ahora no se ha podido explicar el contraste geológico entre el norte y sur del Golfo de California así como tampoco se cuenta con una cartografía detallada de las fallas y los esfuerzos que controlaron la subsidencia regional (Persaud *et al.*, 2003; Aragón-Areola, 2007; Pacheco *et al.*, 2005; Pérez-Tinajero, 2007; Aguilar-Campos, 2007; Hernández Pérez, 2008, González-Escobar *et al.*, 2009; 2010).

Por lo tanto, la región de estudio, la cual se muestra en la Figura 1.4, representa una excelente oportunidad para analizar las características tectonoestratigráficas de una zona

altamente volcánica (Persaud *et al.*, 2003), la cual se localiza al oeste de las fallas transcurrentes que acomodan la extensión oblicua en la zona del *rift* y que corresponde a la Falla Wagner Sur (González-Escobar *et al.*, 2010) y Falla Volcanes (González-Escobar *et al.*, 2006). Por lo que el principal interés del presente trabajo es obtener el modelo estructural del sector noroeste del Golfo de California, el cual se localiza entre las cuencas del norte del Golfo, la costa oriental de la península de Baja California y las secuencias sedimentarias que se puedan correlacionar, a partir de líneas sísmicas de reflexión propiedad de PEMEX. En la interpretación se incluirá la información sísmica de Persaud *et al.* (2003).

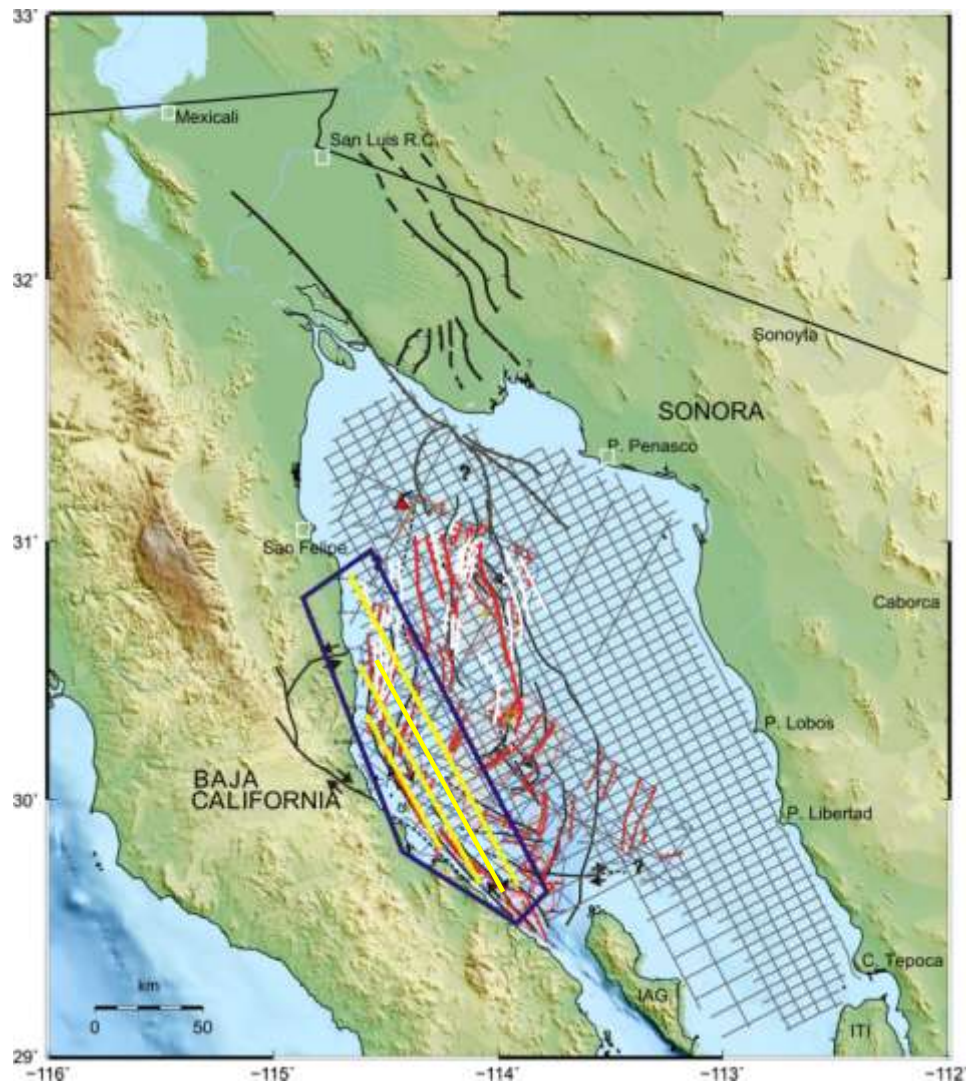


Figura 1.4 El polígono azul muestra el área de estudio y en amarillo se visualizan las líneas sísmicas procesadas para este trabajo. Se incluye interpretación de: Aguilar-Campos, 2007; Pérez-Hernández 2007 y Persaud, 2003.

1.4 HIPÓTESIS

A partir del procesado e interpretación de la información sísmica marina 2D, se contribuyó a ampliar el conocimiento sobre la evolución tectónica del norte del Golfo de California, en virtud de que existen varios modelos que tratan de explicar dicha evolución. Un mejor conocimiento de la estructura en dicho sector también ayudara para determinar si algunas de las principales estructuras del área de estudio tienen alguna correlación con las del bloque volcánico Puertecitos, localizado en la parte costera de la Península de Baja California.

La importancia de estudiar la estructura en el sector noroeste del Golfo de California, radicó en que podía aportar información para aclarar el debate actual que existe entre los dos modelos que explican evolución tectónica del Golfo de California. Un modelo, el cual es considerado como el tradicional (Fig.1.5), propone dos etapas; una de extensión ortogonal entre 12 y 6 Ma. y otra etapa de extensión oblicua entre 6 y 0 Ma. (Stock y Hodges, 1989). El otro modelo (Fig.1.6), propone una sola etapa de extensión oblicua desde el cese de la subducción hace 12 Ma. (Gans, 1997; Fletcher *et al.*, 2007).

Este último modelo propone que parte de la deformación ocurrió en la región costera de Sonora a partir de los 12 Ma. Por este motivo, el sector noroeste tiene una importancia medular en el estudio de la evolución del Golfo de California, ya que dos de los aspectos más controversiales de la evolución geológica del Golfo de California son: (1) definir si la etapa temprana obedece a una extensión ortogonal que cambió a una extensión oblicua en el periodo de 12 a 6 Ma. y (2) definir la edad de las primeras incursiones marinas en esta región.

La hipótesis más aceptada sobre el inicio de la incursión de aguas marinas en el norte del Golfo de California, es que ocurrió alrededor de ~6.5-6.3 Ma. (Oskin y Stock, 2003); sin embargo, recientemente (Helenes *et al.*, 2009), reportaron la presencia de sedimentos marinos con microfósiles del Mioceno medio (12.6 Ma.) con muestras del pozo T-1 (propiedad de PEMEX) en la cuenca Tiburón, por lo que dicha hipótesis está en duda.

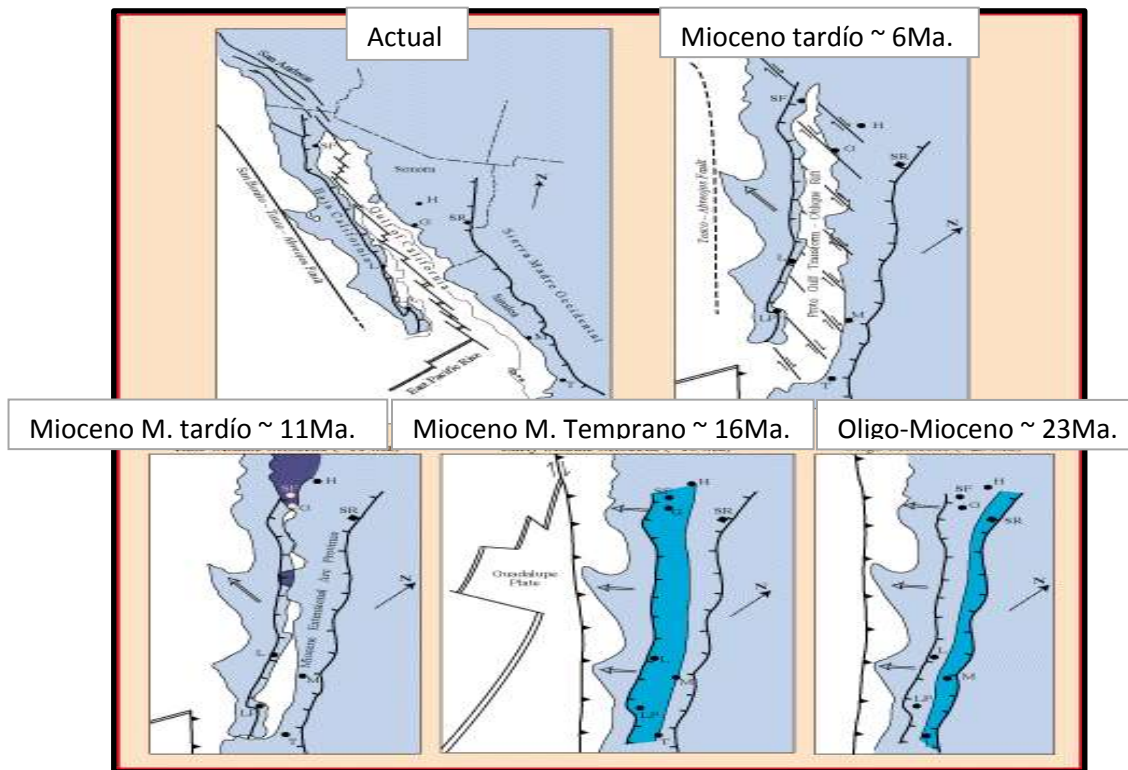


Figura 1.5 Modelo tradicional que propone dos etapas, una de extensión ortogonal entre los 12 y 6 Ma. y otra de extensión oblicua entre los 6 y 0 Ma. (Modificada de Stock y Hodges, 1989).

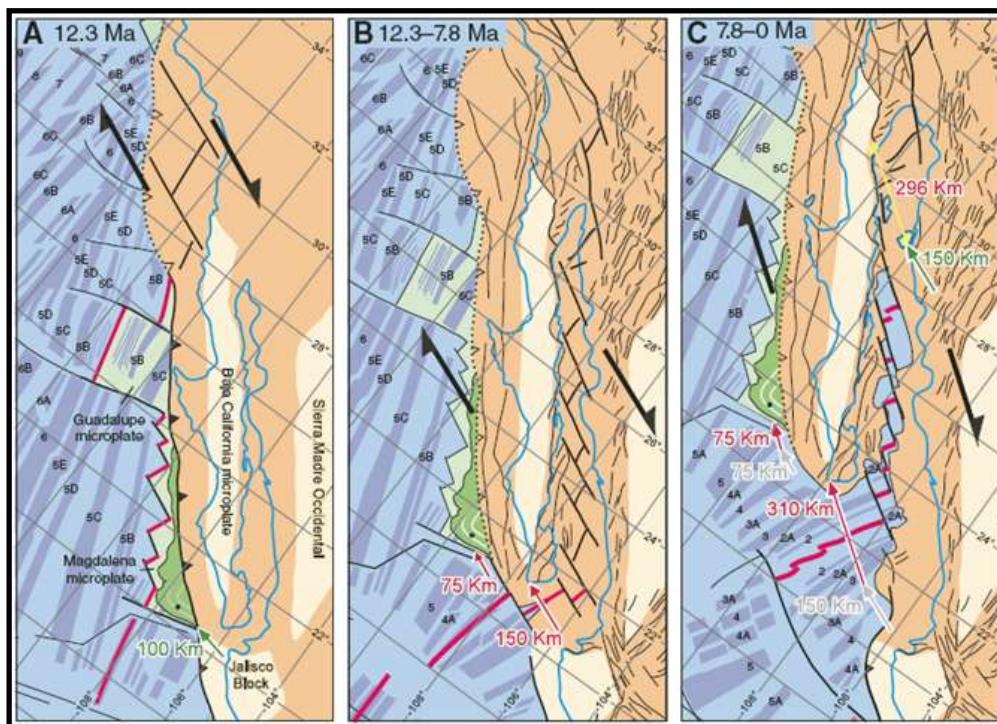


Figura 1.6 Modelo que propone una sola etapa de extensión oblicua desde el cese de la subducción hace 12 Ma., plantea que parte de la deformación ocurrió en la región costera de Sonora (Gans, 1997; Fletcher *et al.*, 2007).

1.5 OBJETIVOS Y METAS

1.5.1 Objetivo General

Conocer la estructura en la región noroeste de la parte norte del Golfo de California a partir del procesamiento e interpretación de la información sísmica de reflexión marina 2D multicanal.

1.5.2 Objetivos particulares

Comprobar la existencia o continuación de la estructura Arroyo-Matomí (la cual acomodó zonas de extensión en continente) hacia la zona marina de estudio.

Determinar el comportamiento estructural y estratigráfico así como la presencia o ausencia de piso oceánico en la zona de estudio.

1.5.3 Metas

- Procesar cuatro líneas de reflexión sísmica marina 2D (5080, 5084, 5072, 5076) con dirección NW-SE, paralelas a la costa de Baja California, con longitudes de: 67, 118, 173 y 156 km respectivamente.
- Interpretar una malla sísmica con un área aproximada de 7254 km², agregando la información previamente procesada en el CICESE correspondiente a ocho líneas transversales con dirección SW-NE, dos con dirección E-W y una paralela con dirección NW-SE.
- Obtener un mapa estructural del área de estudio y delinear los principales reflectores de la zona, para contribuir al conocimiento de la evolución tectónica y estratigráfica del norte del Golfo de California.

- Presentar una nueva interpretación sobre el fallamiento en el área de estudio.
- Colaborar a la formación de la base de datos procesados incluyendo la información trabajada por: Persuad *et al.* (2003), Aragón-Arreola (2007); González-Escobar *et al.* (2006), Aguilar Campos (2007); Pérez-Tinajero (2007) y Pérez-Hernández (2008).

1.6 METODOLOGÍA

La metodología de la presente tesis consistió en seis etapas principales que a continuación se muestran y describen brevemente:

- **Recopilación bibliográfica:** Esta etapa consistió en la recopilación y revisión de la bibliografía sobre la Provincia Extensional del Golfo de California, con el propósito de conocer los antecedentes tectónicos y geológicos relacionados a la zona, así como los trabajos previos realizados en ella y de esta manera tener un mejor entendimiento sobre el área de estudio.
- **Revisión de base de datos sísmicos:** En esta segunda etapa, se revisó en la base de datos, que las cuatro líneas a procesar tuvieran todos los segmentos completos, así como los datos de sus coordenadas UTM.
- **Generación de geometrías:** En esta tercera etapa se utilizó el programa Origin 8.5 para interpolar coordenadas y generar geometría para las líneas que carecían de esta.
- **Procesamiento sísmico:** La cuarta etapa consistió en procesar las cuatro líneas sísmicas a través de la aplicación de parámetros y algoritmos variados, con la finalidad de obtener una mejor imagen del subsuelo. Se utilizó como herramienta de procesado el *software* proMAX[©] perteneciente a LandmarkTM.
- **Interpretación sísmica:** En esta quinta etapa analizaron las características geofísicas observadas en las imágenes procesadas para posteriormente traducirlas como imágenes geológicas que representan la configuración del subsuelo. Se utilizó como herramienta de interpretación el *software* Seisworks[©] propiedad de LandmarkTM.
- **Discusión:** En esta etapa final se analizaron los resultados y se discutieron los principales puntos encontrados respecto al área de estudio.

CAPÍTULO II

MARCO TECTÓNICO

2.1 INTRODUCCIÓN

El aporte de las investigaciones tectónicas y geológicas realizadas previamente en el área de estudio, permitieron conocer las estructuras principales que la caracterizan, así como entender los mecanismos que originaron a la Provincia Extensional del Golfo de California y el ambiente dinámico que predomina, aunque no resuelven del todo las incógnitas que se generan alrededor de este tópico; por lo cual, el objetivo de este trabajo consiste en proporcionar información de las estructuras presentes en el noroeste de esta provincia a través del procesado e interpretación de datos obtenidos con sísmica de reflexión marina 2D multicanal y así hacer una pequeña pero substancial contribución al acervo informativo de la región.

2.2 MARCO TECTÓNICO REGIONAL

La provincia extensional del Golfo de California (PEGC) comprende la región localizada al oeste de la Sierra Madre Occidental hasta el escarpe principal del Golfo en la península de Baja California (Fig. 2.1). Este escarpe topográfico separa el macizo peninsular de una delgada franja en la porción oriental de la península estructuralmente ligada a la PEGC.

La evolución geológica de la PEGC es compleja, debido a que registró durante el Neógeno un cambio en el régimen tectónico de subducción a distensión cortical y formación de piso oceánico en los últimos 3-4 Ma. (Martin-Barajas, 2000). Como consecuencia de el *rifting*, tanto continental como oceánico, la península bajacaliforniana (la cual se encontraba ubicada en ese tiempo en la placa de Norteamérica) fue transferida hacia la placa pacífica, acomodando la configuración del límite de placas en la forma que actualmente conocemos (Martin-Barajas, 2000). Se cree que el patrón estructural de la PEGC está sobrepuesto al patrón estructural de la provincia de Cuencas y Sierras (PCS) del sur de California y Noreste de México, donde la mayor parte de la deformación es más antigua. (Martín-Barajas *et al.*, 2000 y Aranda Gómez, 1992).

Es decir, la apertura del Golfo de California estuvo condicionada por esta provincia paleógena del Oligoceno medio (30Ma.), pero la deformación en la PEGC es más joven; las dos

provincias comparten un carácter extensional, más no la componente de desplazamiento lateral derecho que caracteriza a la PEG, ya que la PCS es puramente extensional.

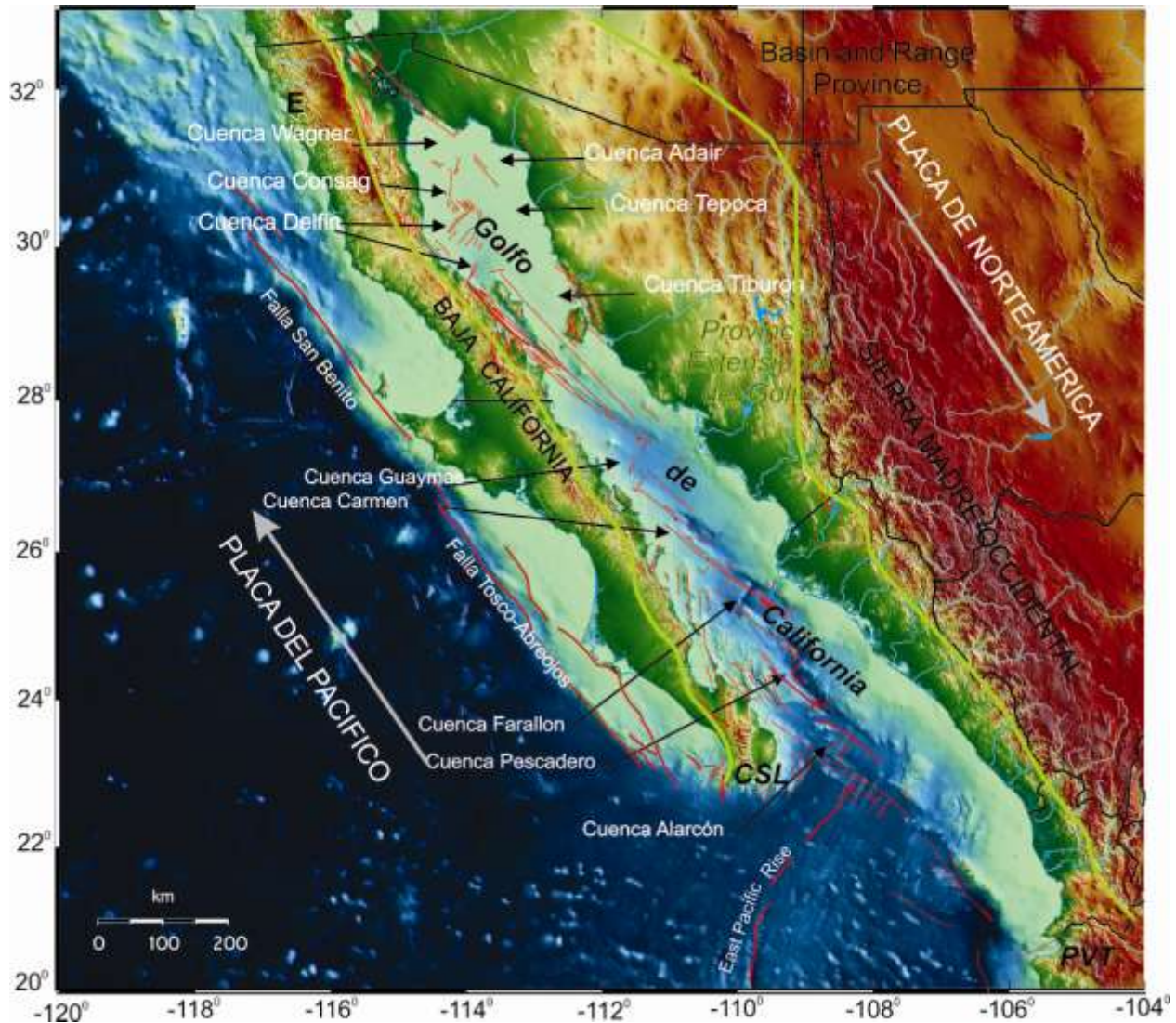


Figura 2.1 Mapa mostrando las provincias morfotectónicas Sierra Madre Occidental, Provincia Extensional del Golfo de California y Provincia de Cuencas y Sierras, producto de la interacción de la placa Farallón con el borde continental de Norteamérica (Modificada de González-Escobar *et al.*, 2010).

Se cree que durante parte del Terciario la margen oriental de la actual península de Baja California estuvo unida al oeste de Norteamérica, ocupada por un arco magmático relacionado con la subducción de la placa Farallón. (Stock y Hodges, 1989). Dicha corteza gruesa de carácter oceánico, subdujo con una velocidad alta y dirección franca sobre el borde continental de

Norteamérica generando las estructuras contraccionales relacionadas con la orogenia Laramide en el SW de Norteamérica y Norte de México (Coney, 1977; Dickinson *et al.*, 1988; Eguiluz *et al.*, 2000; Bird, 2002; Chávez-Cabello, 2005).

El volcanismo relacionado con esta subducción se manifestó entre los 90 y 30 Ma. en la Sierra Madre Occidental (Ferrari *et al.*, 2005), el volcanismo de arco migró posteriormente hacia el poniente, manteniendo una actividad importante durante el periodo de 23-12 Ma. (Mioceno Temprano-Medio) a lo largo de la margen oriental de la península de Baja California y en la costa de Sonora (Mora-Álvarez, 1993; Hausback, 1984; Sawlan y Smith, 1984). Una etapa de extensión temprana (25-12 Ma.) en posición intra-arco y tras-arco en Sonora y en la margen oriental del Golfo de California ocurrió al mismo tiempo con la última etapa del arco micénico (Martín-Barajas, 2000).

Es de esta forma que el comportamiento de la placa Farallón repercutió en la evolución tectónica y magmática de la provincia volcánica de la Sierra Madre Occidental, iniciando con: a) subducción veloz y franca (magmatismo plutónico-andesítico), b) cambio de ángulo de subducción (entre 80-40 Ma.), roll-back de la placa (40-10 Ma.) y regreso del magmatismo de arco al borde continental pacífico (magmatismo ignimbrítico y riolítico); (Ferrari *et al.*, 2005), posteriormente c) un rompimiento de la placa, así como la entrada y contacto directo con fluidos astenosféricos con la base de la corteza (pulso ignimbrítico mayor), y finalmente relajamiento de la corteza después del roll-back y cese de la subducción en el borde continental, generó fallas normales que canalizaron magmatismo tipo basáltico con firma intraplaca (Ferrari *et al.*, 2005). La formación de la PEGC está ligada a la evolución misma de la Sierra Madre Occidental, toda esta actividad volcánica, dejó huellas a través de las cuales se ha podido correlacionar y definir la consanguinidad de algunas rocas presentes en estas dos provincias morfoTECTónicas, presentes a ambos lados de la costa del Golfo de California.

La subducción comenzó a cesar cuando se pusieron en contacto las placas Pacífico-Norteamérica hace aproximadamente 25 Ma., deteniéndose hacia los 12 Ma. mientras el punto triple Pacífico-Farallón-Norteamérica migraba al sur (Fig. 2.1). Esta junta triple dio un salto hacia su posición actual a los 12 Ma. y, el límite Oeste de Baja California Sur, experimentó un cambio tectónico mayor de una zona de subducción de las microplacas Magdalena y Guadalupe, remanentes de Farallón, a una zona transtensiva de movimiento relativo derecho entre las placas Pacífico-Norteamérica (Martín-Barajas *et al.*, 2001).

La distensión del Cenozoico parece haber definido un patrón de edades más jóvenes de oriente a poniente a través de la PEGC (Gans, 1997; Lee *et al.*, 1996). El inicio de la distensión en la margen oriental de la península fue posterior a la distensión en Sonora, y concuerda con la terminación del volcanismo de arco y subducción de la placa Guadalupe hacia los 12 Ma. aproximadamente (Stock y Lee, 1994; Lee *et al.*, 1996).

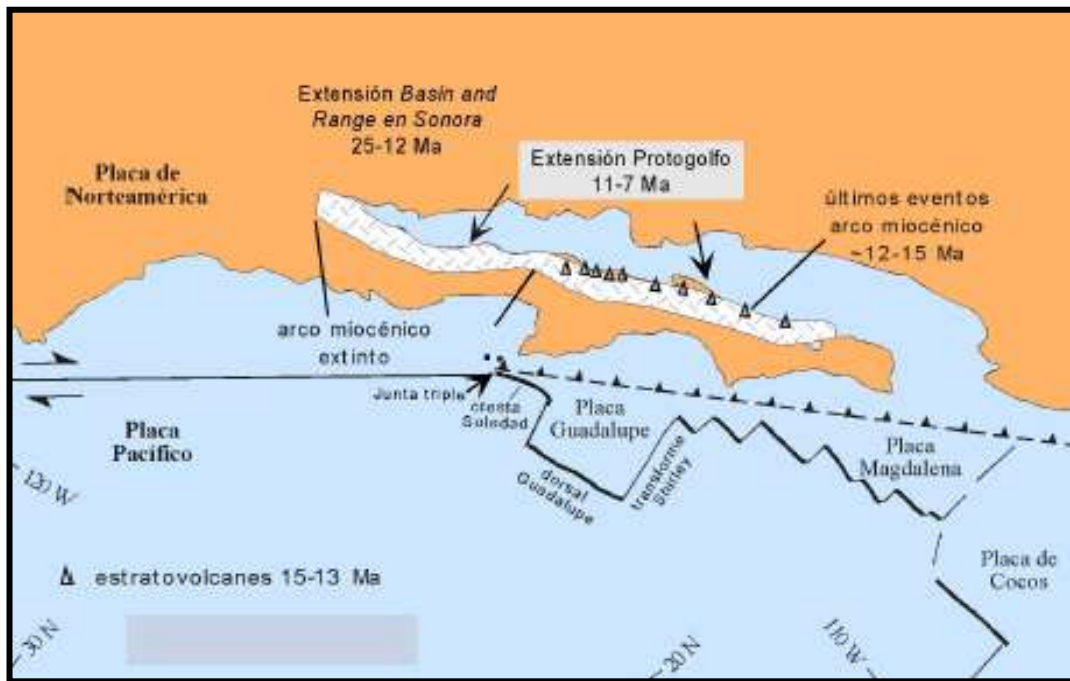


Figura 2.2 Evolución tectónica del Golfo de California (Tomada de Stock y Lee, 1994).

La incursión marina en el Golfo de California está asociada con una fase temprana de extensión continental (caracterizada por fallamiento extensional y depósitos marinos), los sedimentos fosilíferos marinos son la evidencia más importante para la edad y extensión del proto-golfo de California (12 Ma.). En la segunda etapa, la Península de Baja California debió de estar adherida a la placa Pacífico, de manera que el desplazamiento posterior a 6 Ma., durante la apertura del Golfo de California, representó la mayor parte del movimiento oblicuo Pacífico-Norteamérica (Stock y Hodges, 1989).

El sistema de desplazamiento lateral derecho de la falla de San Andrés se instaura dentro del golfo a partir de 5.5 a 6 Ma., a los 3.5 Ma. se desarrollaron dorsales oceánicas menores

dentro del Golfo que aceleran la traslación de Baja y parte de Alta California hacia el NW ya como parte de la placa pacífico. (Oskin *et al.*, 2004).

2.3 DELTA DEL RÍO COLORADO

El delta del río Colorado inició a construirse hace 5.5 Ma. en el Plioceno Temprano como lo indica la edad de los primeros depósitos fluviales en el *Salton Trough* (Dorsey *et al.*, 2007). El delta tiene una forma elongada en dirección NW como consecuencia de la deformación tectónica en el límite entre las placas Pacífico y Norteamérica (Fig. 2.3), abarcando un área de aproximadamente de 8,600 km² (Elders *et al.*, 1972; Lonsdale, 1989, Dorsey *et al.*, 2010), y se calcula un promedio de 5.6 km de profundidad de basamento en el Valle Imperial, California y un contenido de más de 40,000 km³ de sedimentos del río Colorado depositados en los últimos 2 a 3 Ma. (Fuis y Kohler, 1984).

Las cuencas transtensionales que se encuentran incrustadas en el sistema de falla de San Andrés, en el noroeste de México, han sido rellenadas con sedimentos derivados del Río Colorado, dichos sedimentos son drenados desde el interior oeste de U.S. (Dorsey, 2010), y trasladados en dirección noroeste a lo largo de las fallas del sistema de San Andrés (Winker y Kidwell, 1986), para después ser rápidamente sepultados, calentados y mezclados con intrusiones en las cuencas profundas; por esta razón, se cree que se ha estado formando una nueva generación de corteza reciclada a lo largo del límite de placa activo (Dorsey, 2010).

Se ha calculado un volumen de sedimentos derivados del Río Colorado de aproximadamente $2.2-3.4 \times 10^5$ Km³, cantidad que es muy similar al volumen de roca que probablemente fue erosionada de la cuenca hidrográfica del Río Colorado (con un área de captación de aproximadamente 630,000 km²) durante los últimos 5-6 Ma. La tasa de crecimiento volumétrico de la corteza por sedimentación es de aproximadamente 80-130 km³/Ma./km. (Dorsey, 2010). El rápido flujo de sedimentos hacia estas cuencas ejerce una fuerte influencia en el estilo de deformación, reología de la corteza, magmatismo *syn-rift* y la arquitectura del *rift* (Moore, 1973; Fuis *et al.*, 1984; Persuad *et al.*, 2003; González-Fernández *et al.*, 2005; Lizarralde *et al.*, 2007; Bialas y Buck, 2009).

Dorsey (2010), concluyó que los procesos sedimentarios y de formación de cuencas parecen jugar un papel muy importante en la evolución de la corteza en márgenes de *rift* y *rift-*

oblicuo, donde la corteza continental es movilizada por erosión y reciclada para generar nueva corteza a tasas comparables a las documentadas en arcos de isla (producto de zonas de subducción) y centros de dispersión de piso oceánico.

Como se ha mencionado con anterioridad, el área de estudio está ubicada en el noroeste de la PEGC y las cuencas que abarca están directamente afectadas por la influencia sedimentaria del Río Colorado, es decir, la carga de sedimentos aportada por este delta tiene una gran contribución en el cambio de espesor sedimentario de norte a sur, así como en el enfriamiento de la corteza, geometría de las cuencas y la subsidencia de las estructuras.



Figura 2.3 La figura muestra la zona de captación del Río Colorado y en amarillo la zona de acumulación sedimentaria. La batimetría poco profunda en el norte del Golfo de California se debe al gran influjo de sedimentos del Río Colorado (Modificada de Dorsey, 2010).

2.4 BLOQUE VOLCÁNICO PUERTECITOS

El escarpe principal del golfo de la península de Baja California es una de las características topográficas más sorprendentes de Norteamérica, separa la porción de las sierras peninsulares al oeste (península estable) de las sierras estructuralmente alteradas del este y despliega de 1000-3000 m de relieve, esta estructura termina enigmáticamente contra las montañas volcánicas del área de Puertecitos; al sur se mantiene fisiográficamente prominente y continua a lo largo de la península. Claramente, esta es una zona estructural principal a lo largo de la cual el levantamiento de las Sierras Peninsulares y la depresión del golfo han sido acomodadas.

La importancia del Bloque Puertecitos es que su estudio puede aportar información que ayude a mejorar, o incluso descartar, alguno de los modelos que explican la posible evolución del Golfo de California, por lo tanto la importancia de este terreno caracterizado por fallamiento normal radica en que ilustra el desarrollo cinemático de un área extendida que yace adyacente a una falla principal de carácter transforme (sistema de fallas San Andrés; Dokka y Merriam, 1982).

El patrón e historia de fallamiento normal para esta porción de la zona Noreste de la península de Baja California, indican robustamente que dicha área se desarrolló como resultado de la extensión cortical E-W durante el Cenozoico tardío. Datos geométricos y cinemáticos sugieren fuertemente que esta área se desarrolló conjuntamente con la apertura del Proto-Golfo y la distensión del PBR. Todo lo anterior, sumado a datos de relaciones de tiempo-tectónicas, al parecer excluye la aplicación de un modelo de *rifting* oblicuo para esta área.

Está bien establecido que dos intervalos de extensión tectónica afectaron a esta región desde el Mioceno temprano; sin embargo, hasta ahora no se sabe si la deformación fue continua o discontinua respecto al tiempo. El primer intervalo de 17-9 Ma; está caracterizado por fallamiento N-S, controlado por extensión E-W, determinando a través de patrones de inclinación y orientación de fallas transcurrentes intraterreno e indicadores cinemáticos. Esta deformación fue dominada por fallas normales de alto ángulo, que dieron como resultado el rompimiento de una amplia región que define una superficie de erosión de bajo relieve. Se establecieron nuevos patrones de sedimentación controlados por *grabens* con rumbo N-S que fueron rellenados con abanicos aluviales y depósitos marinos. Ocurrieron erupciones silíceas de

manera esporádica en conjunto con la extensión, permitiendo la resolución de la compleja historia de inclinación que acompañó al fallamiento normal. La inclinación y el fallamiento antitético son producto de un volumen de compensación requerido por la modificación de fallas normales a fallas lítricas y fallas relacionadas con flexura monoclinal (todos los estratos tienen un mismo buzamiento y dirección), y a efectos de arrastre inversos (los marcadores curvos de falla se vuelven cóncavos en la dirección de deslizamiento).

Se estableció un segundo intervalo de 6-0 Ma., éste de carácter extensivo también en dirección E-W, menor que el primer intervalo, el cual al parecer utilizó las mismas estructuras. El volcanismo silícico disminuyó dando lugar a erupciones máficas relacionadas con el *rifting* del actual Golfo de California.

Dokka y Merriam (1982) concluyeron que la inclinación de varias unidades de rocas se debió a una rotación a lo largo de un eje N-S, con base en la cantidad y dirección de inclinación separaron a la provincia de Puertecitos en tres dominios de inclinación diferentes, pero a su vez compatibles tectónicamente, representados por fallamiento normal, dichos dominios se traslapan geográficamente entre ellos y cada uno incluye fallas con un sentido similar de desplazamiento, posición y forma de la superficie de falla (Fig.2.3a.).

Dominio I: Este dominio está localizado al oeste del Valle San Felipe (*graben* profundo limitado al oeste por la falla San Pedro Mártir y al Oeste por la falla normal Valle de San Felipe, esta última buza al oeste) y al norte de la zona volcánica de Puertecitos, éste dominio está caracterizado por fallas normales sintéticas con rumbo N-S y buzamiento al este, donde la falla San Pedro Mártir es la cizalla dominante.

Esta familia de fallas ha producido la precipitada pendiente del Escarpe Principal de Golfo en esta latitud. Las fallas son de bajo ángulo y geomorfológicamente expresadas como pasos descendiendo de la cresta de la sierra hacia el piso del Valle de San Felipe. Antitéticas a estas estructuras hay un grupo de fallas normales de alto ángulo con rumbo N-S y buzamiento al oeste, de extensión y desplazamiento limitado. Los estratos generalmente buzan, excepto cuando son cortados por fallas antitéticas.

Dominio II: Se localiza al Este del valle de San Felipe, limitado al sur por el bloque volcánico Puertecitos. Este dominio está caracterizado por fallas normales buzando al oeste y con una ligera inclinación de los estratos hacia el este, su límite oeste está marcado por fallas normales buzantes hacia el este, las cuales presentan una forma curvilinear (cóncavas hacia el este); ninguna falla de esta área puede igualarse en longitud o magnitud de desplazamiento que presenta la Falla San Pedro Mártir, ya que son típicamente cortas y con un desplazamiento relativo muy pequeño (3-35 m).

Dominio III: Se sitúa al oeste de las montañas volcánicas de Puertecitos y al sur de los dominios I y II, las fallas en esta región son en su mayoría escarpadas, con buzamiento al oeste y estratos basculados hacia el este, el fallamiento en esta región ha producido *horst*, *grabens* y escarpes que delimitan la cobertura volcánica del Mioceno-Plioceno. Su límite oeste está marcado por una familia de fallas normales buzando al este similares a las del dominio I.

La naturaleza en la transición del dominio I y II refleja la importancia relativa de cada área en términos de extensión total; las fallas del dominio II tienden en ángulo con el Valle San Felipe pero no pueden ser trazadas a través de él. Aunque estos dominios parecen tener una historia de movimiento coincidente, un simple truncamiento por estructuras más jóvenes del dominio I es descartada, sugiriendo que las fallas del dominio II que entran en la región de San Felipe se fusionan y son acomodadas por las estructuras del dominio I, lo que requiere que los procesos extensivos operando en San Felipe dominen a los del este.

Además, varias fallas en el dominio III pueden ser trazadas hacia el norte, especialmente a lo largo de su margen occidental; sin embargo en la porción noreste no continúan, lo que requiere que desaparezcan gradualmente o estén limitadas por una estructura de acomodo. Por ejemplo, una falla de rumbo lateral izquierda es geométrica y cinemáticamente requerida cerca de Arroyo Matomí para acomodar la extensión diferencial entre los dominios II y III (Fig. 2.3b).

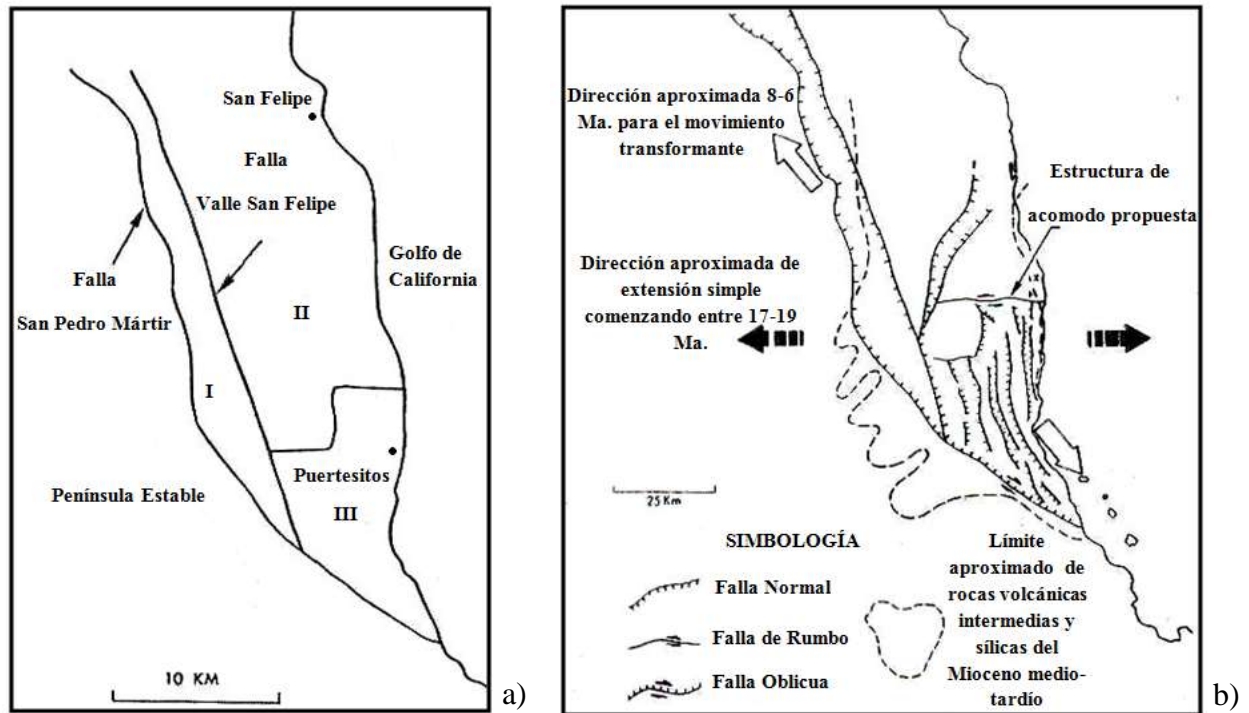


Figura 2.4 a) Dominios de fallas normales e inclinación propuestos, así como las principales fallas que los delimitan. b) Mapa geológico mostrando la configuración de fallas en el basamento cristalino después de que las rocas del Terciario se separaran, y la estructura propuesta (falla de rumbo lateral izquierdo) para acomodar extensión diferencial entre el dominio II y III (Tomada y modificada de Dokka y Merriam, 1982).

El modelo del Clay-Cake de Cloos (1983) provee una analogía para el estilo de fallas en el área de Puertecitos, ya que muestra la relación entre una falla normal mayor y sus fallas sintéticas asociadas.

Dokka y Merriam (1982) concluyeron que la falla San Pedro Mártir y las fallas normales con buzamiento al este del Escarpe Principal del Golfo, representan las fallas sintéticas dominantes de la región y las fallas buzantes hacia el oeste como la de Valle San Felipe corresponderían a las antitéticas. La inclinación de los estratos sedimentarios y volcánicos del Terciario, resultan de la necesidad de un volumen de compensación debido a aplanamiento, flexura monoclinal y efectos de arrastre inverso de las fallas normales.

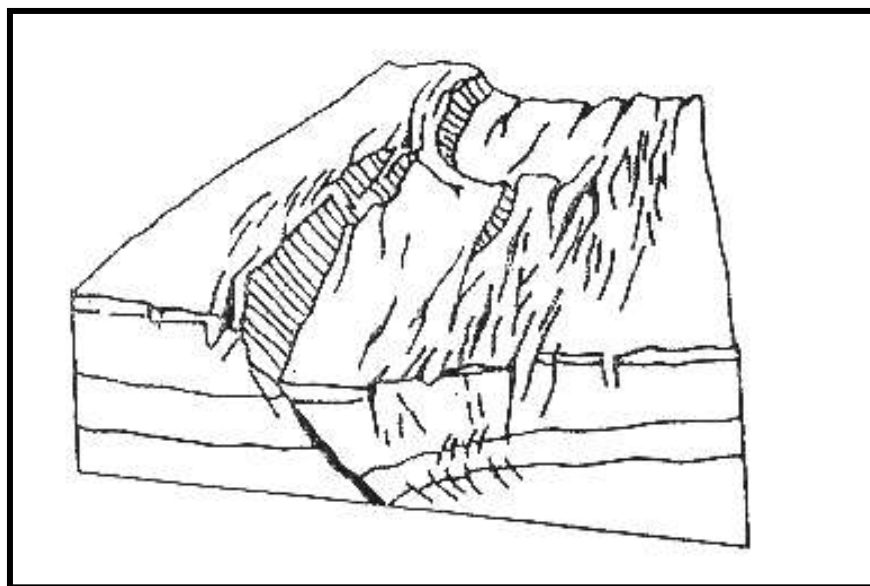


Figura 2.5 Modelo análogo del Clay-Cake para el fallamiento normal del Cenozoico Tardío en el Noroeste de Baja California (Tomada de Dokka y Merriam, 1982).

2.5 CUENCA CONSAG

La cuenca Consag es una depresión angosta limitada al sur por la cuenca Delfín Superior y al norte por la cuenca Wagner (Hurtado, 2002; Figs. 1.1 y 2.1). Esta cuenca podría ser una estructura pull-apart de escalonamiento izquierdo perteneciente al sistema de cuencas y fallas transformes del norte del Golfo de California, presentando un carácter más somero y de menor subsidencia en comparación con la cuenca Wagner (Persuad, 2003). El dominio estructural de la cuenca Consag controló o sigue controlando las estructuras localizadas al oeste de la falla Wagner, estas estructuras al occidente de la Falla Wagner continúan hacia la cuenca Consag, acomodando principalmente una componente lateral y oblicua de fallas orientadas perpendicularmente a la dirección de la extensión en esa área del Golfo. (Hurtado, 2002). La relación entre la cuenca Consag y Wagner aparentemente es una zona de transferencia (González-Escobar *et al.*, 2010).

2.6 CUENCA DELFÍN SUPERIOR NORTE Y SUR

Estas cuencas extensionales subparalelas se dividen cada una en tres segmentos (norte, medio y sur) a lo largo del eje, esta segmentación está expresada en su batimetría y fallamiento. Aunque ambas son zonas activas de deformación, el centro de extensión cambia a lo largo de los ejes de una cuenca a otra. Los escarpes del fondo marino en el segmento medio de la Cuenca Delfín Superior Norte (CDSN) son más pronunciados y sus fallas están más espaciadas a comparación con el centro de la Cuenca Delfín Superior Sur (CDSS).

Las fallas en el noreste y sureste de estas cuencas muestran un patrón opuesto, con escarpes de falla menor en la CDSN que en la CDSS (Persuad, 2003). Al suroeste las condiciones de escarpes del piso oceánico cambian, haciéndose más prominentes en la CDSS, cerca de una protuberancia volcánica (Henye y Bischoff, 1973), lo que la hace más activa que la CDSN. Por otro lado, el segmento medio de la CDSS al aproximarse al sur, la deformación disminuye y la cuenca se vuelve más somera (Persuad, 2003).

2.7 CUENCA DELFÍN INFERIOR

Esta cuenca está definida por una depresión estrecha y profunda, que inicia al norte de la falla Canal de Ballenas. Una primera cuenca de 900 m de profundidad, ocurre en la salida del canal Sal si Puedes (Lonsdale, 1989). Esta cuenca se extiende al NE con una depresión definida por una isobata de 800m, con una longitud de 25 km. Aproximadamente en dirección N10° a 25°E, existe otro depocentro al NNE que parece la continuación de la cuenca, esta zona incluye intrusiones volcánicas de composición andesítica que forman presas de sedimentos en la cuenca (Persuad et al., 2003; Martín-Barajas y Weber, 2003).

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

3.1 INTRODUCCIÓN

La geofísica estudia a través de los campos potenciales o los inducidos por el hombre, la estructura interna de la Tierra, las condiciones físicas de ésta, así como su evolución histórica. Existen varias metodologías geofísicas para resolver estas incógnitas, como por ejemplo la magnetometría, gravimetría, geoelectrica, sismología, entre otras. Este trabajo se enfocará específicamente en el método sísmico de reflexión.

En este capítulo se explica la metodología utilizada para el procesamiento de los datos así como los algoritmos y parámetros que fueron aplicados para la realización de este trabajo de tesis, dichos datos fueron adquiridos en la parte noroeste del Golfo de California a través de sísmica de reflexión marina 2D multicanal realizada por PEMEX.

3.1.1 MÉTODO SÍSMICO DE REFLEXIÓN

El método sísmico de reflexión representa una herramienta indispensable en la prospección geofísica debido a su gran poder de resolución (mejores imágenes del subsuelo) y penetración (que en comparación con los métodos potenciales es mucho mayor); actualmente es imprescindible en la exploración de hidrocarburos, aunque sus aplicaciones son variadas, algunos ejemplos claros de dichas aplicaciones son la búsqueda de acuíferos, ingeniería civil, exploración, explotación de carbón mineral y como apoyo para la investigación académica.

La técnica, en forma muy general, consiste en generar ondas sísmicas, utilizando fuentes tales como explosivos, vibradores (sísmica terrestre), pistolas de aire (sísmica marina; Fig. 3.1), etc., y en medir, con equipos de grabación sofisticados, el tiempo transcurrido desde la generación de la onda hasta que esta es recibida por los sensores (geófonos o hidrófonos). Tomando los tiempos de arribo o tiempos dobles (tiempo que le toma a la energía viajar dentro de la tierra, reflejarse y regresar a la superficie), y conociendo las velocidades de propagación, se puede reconstruir las trayectorias de las ondas sísmicas. El tiempo de recorrido depende de las propiedades físicas de las rocas, y de las disposiciones de estas en el subsuelo (Yilmaz, 2001).

En resumen, el objetivo del método sísmico es reconstruir la disposición de las rocas en el subsuelo (estructura) y sus características físicas (litología, fluidos, etc.) a partir de la información grabada, esto es; de los tiempos de recorrido, las amplitudes, cambios de fase y/o frecuencia de las ondas. Las reflexiones solo pueden ocurrir cuando las ondas generadas encuentran un cambio en la impedancia acústica (ρv la velocidad en la que se propaga una onda en un medio con una densidad determinada) entre capas de roca o interfaces, arrojando información a través de los coeficientes de reflexión (energía que regresa de una interface y la define).

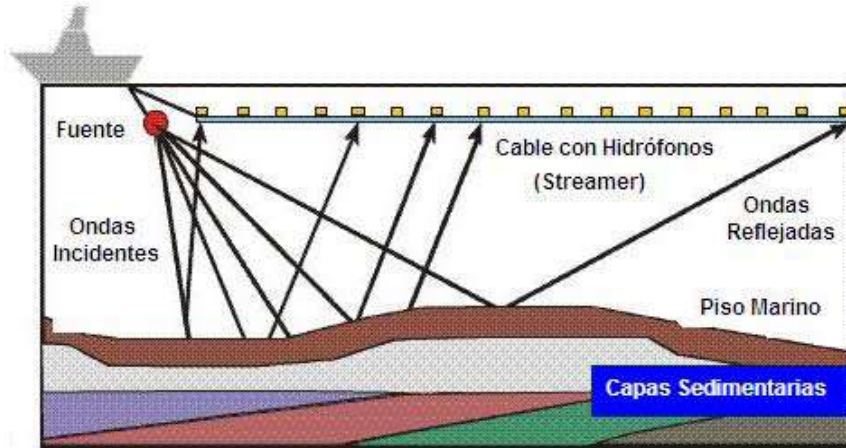


Figura 3.1 Arreglo para la adquisición a través de sísmica de reflexión marina. La energía es producida por pistolas de aire que generan una implosión generando cambios de presión en el agua, dichos cambios son registrados y transformados a volts/Bar por los hidrófonos (receptores) localizados dentro del cable de registro conocido como *streamer*.

Este método consiste en tres etapas principales: adquisición de datos, procesamiento e interpretación (Fig. 3.2). Las tres etapas principales están íntimamente relacionadas y la correcta ejecución de cada una será la base para lograr buenos resultados en la siguiente etapa (Fitch, 1976; McQuillin *et al*; Badley, 1985; Lindseth, 1987; Yilmaz, 1987; Hoskins y Wood, 1996; Sheriff y Geldart; entre otros).

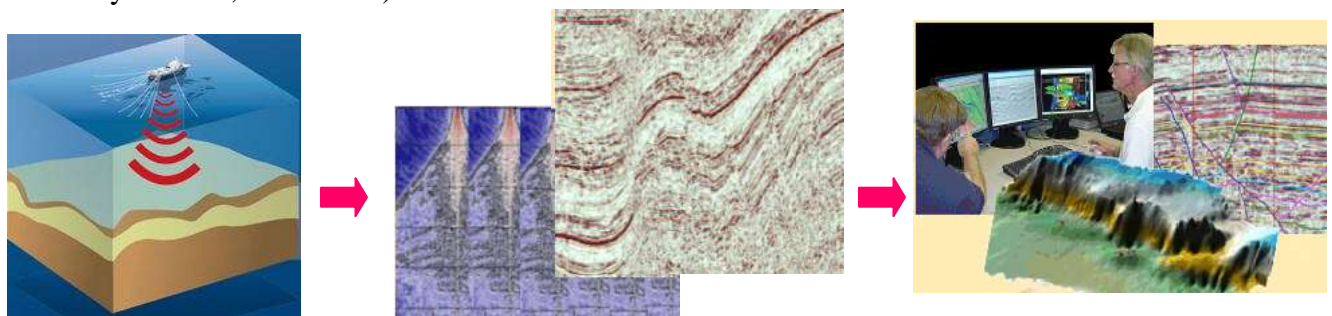


Fig.3.2. Etapas del método sísmico: adquisición, procesado e interpretación de datos sísmicos.

3.2 ADQUISICIÓN

La información sísmica a través de la cual se realizó este trabajo fue adquirida por PEMEX en los años 1978 y 1980, en la región marina ubicada en la zona norte del Golfo de Baja California como parte del prospecto San Felipe-Tiburón. Se utilizó un arreglo de 48 canales con un espaciamiento de 50 m para la adquisición de los datos marinos 2D multicanal, utilizando como fuente de energía sísmica siete cañones de aire y como receptores hidrófonos localizados en el *streamer*. La distancia utilizada entre puntos de tiro fue de 25 m, con un *offset* mínimo de 270 m y máximo de 2,350 m, un tiempo de grabación de 6,144 ms y un intervalo de muestreo de 2 ms.

En la tabla 3.1 se muestra los parámetros principales que se utilizaron durante la etapa de adquisición de datos, los cuales fueron de gran utilidad durante la etapa del procesado ya que aportaron información que ayudó a comprender la naturaleza de los datos sísmicos con los que se trabajó.

Tabla 3.1 Parámetros de adquisición de los datos sísmicos marinos multicanal 2D en el área San Felipe-Tiburón.

PARÁMETROS	VALORES
Región	Marina
Zona	Norte
Área	San Felipe-Tiburón
Brigada	6259
Equipo	DFS-V
No. de canales	48
Tiempo de grabación	6144 ms
Intervalo de muestreo	2 ms
Formato de grabación	SEG-B
Filtro bajo	8 Hz
Filtro alias	124 Hz
Fuente de energía	7 cañones de aire
Volumen/presión	1441 CI/1750 PSI
Detectores por traza	32
Distancia entre estaciones	50 m
Distancia entre P.T	25 m
Patrón de tiro	0-270-2350 m

Para la obtención de los perfiles sísmicos se procesaron cuatro líneas localizadas en la parte noroeste del Golfo de California: líneas 5080, 5084, 5072 y 5076 con 4 (118km), 3 (67km), 7 (173km) y 6 (156km) segmentos a ensamblar, respectivamente (Fig. 3.3). A los datos procesados se le anexaron líneas transversales ya procesadas en el CICESE (Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada), así como la información del pozo W2 (propiedad de PEMEX), aledaño al área de estudio, para correlacionar la información y mejorar la interpretación estructural y estratigráfica. A través de un mapa referenciado por PEMEX se obtuvieron las coordenadas UTM, con la finalidad de que todas las trazas de cada disparo tuvieran una correcta localización geográfica. La disponibilidad de los datos utilizados para este trabajo de tesis fue posible a través de un convenio realizado entre PEMEX y CICESE en el 2005.

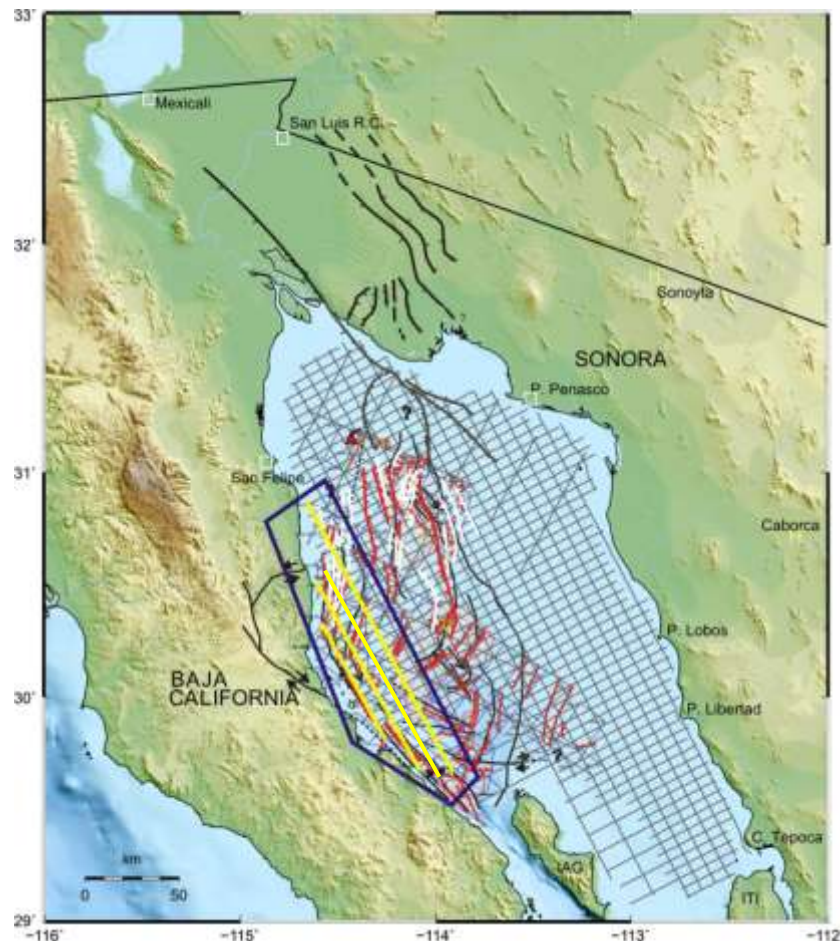


Figura 3.3 Líneas sísmicas procesadas en la presente tesis (color amarillo) dentro del polígono azul que muestra el área donde se realizó el estudio. Se incluye interpretación de: Aguilar-Campos (2007); Pérez-Tinajero (2007), Pérez-Hernández (2008) y Persaud (2003).

3.3 METODOLOGÍA DE PROCESADO

El Procesamiento de datos consistió principalmente en la elección y posterior aplicación de parámetros y algoritmos adecuados a los datos sísmicos obtenidos durante la etapa de adquisición, con el objetivo de generar secciones sísmicas de calidad que reflejarán la disposición más cercana a la realidad de las estructuras del subsuelo.

El procesamiento de datos se dividió en tres etapas principales: pre-apilamiento, apilamiento y pos-apilamiento, en cada etapa se aplicaron diferentes modificaciones o procesos. La Figura 3.4 muestra la secuencia básica para el procesamiento de datos sísmicos marinos de reflexión 2D.

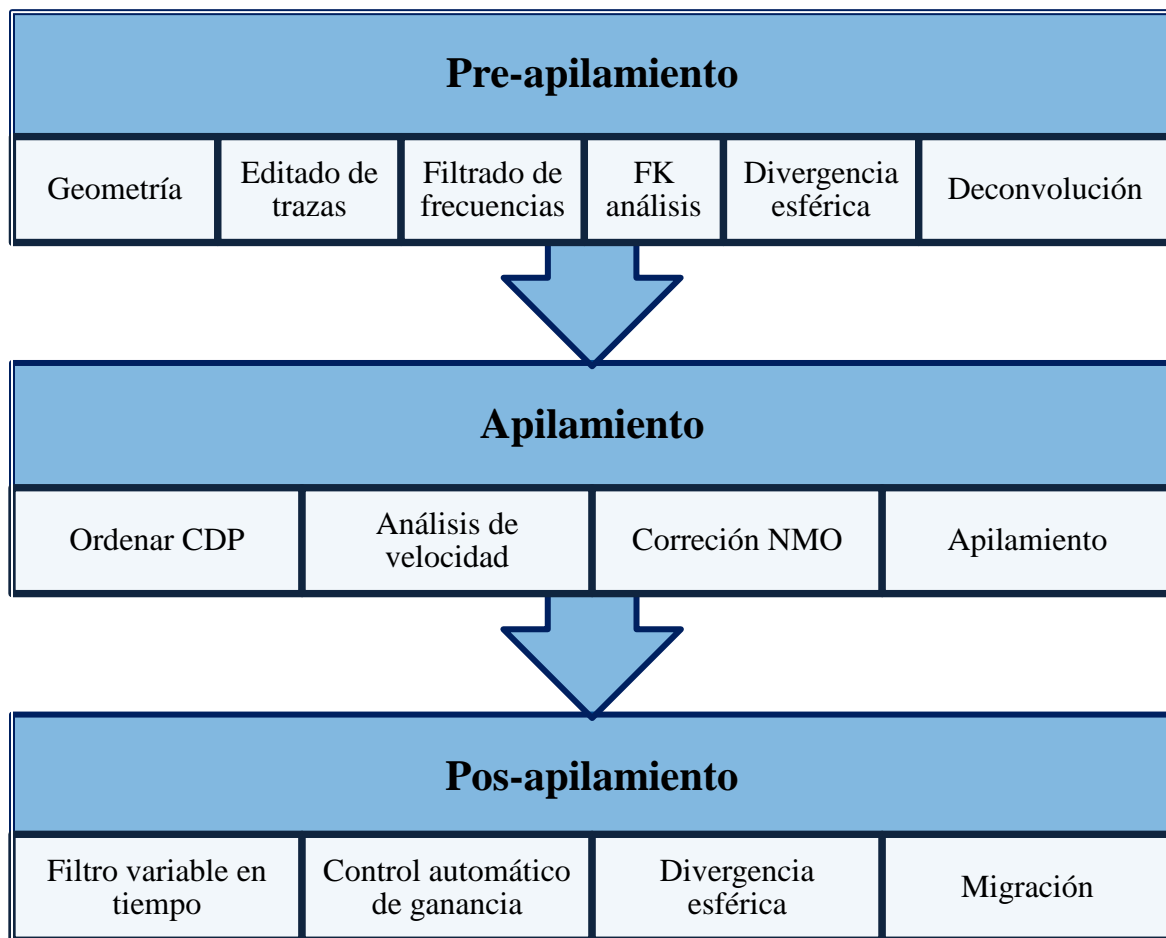


Figura 3.4 Secuencia básica a seguir para el procesamiento de datos sísmicos de reflexión 2D multicanal.

3.3.1 PROCESAMIENTO PRE-APILAMIENTO

3.3.1a Cintas de campo

Los datos de campo son grabados en formato SEG-B (Formato B de la Sociedad de Geofísicos de Exploración) los cuales son transformados a SEG-Y (*Society of Exploration Geophysicists*, por sus siglas en inglés) para poder ser cargados al modulo de ProMAX[®] perteneciente a la plataforma LandmarkTM con el objetivo de someterlos a la secuencia de procesamiento.

ProMAX[®] 2D fue introducido en 1989, y se ha convertido en una unidad de trabajo muy completa basada en el sistema operativo UNIX en un ambiente interactivo que permite gran capacidad de almacenamiento de datos, conexiones entre operadores vía internet, graficas de alta resolución, despliegue de datos con variadas formas de visualización e infinidad de funciones que brindan herramientas a los geofísicos para generar secciones de alta calidad (Manual de ProMAX[®]).

3.3.1b Geometría

Es de gran importancia definir correctamente a través de un mapa georeferenciado y proporcionado por PEMEX, las coordenadas UTM para cada estación receptora y cada punto de tiro, así como asignar parámetros de distancia entre fuente- receptor (*offset*), azimut y distancia entre receptores, de tal forma que las trazas contengan una geometría correcta. Es necesario cargar dicha geometría en cada uno de los segmentos de las líneas a procesar de manera individual (Fig. 3.5).

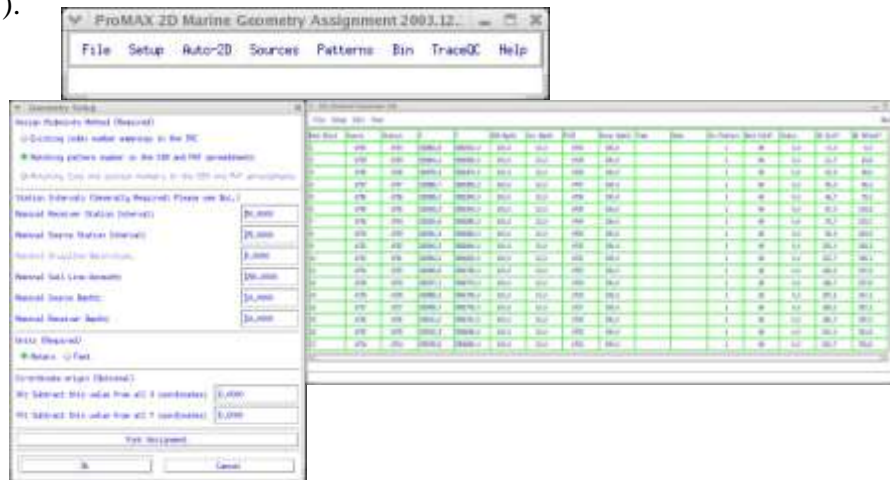
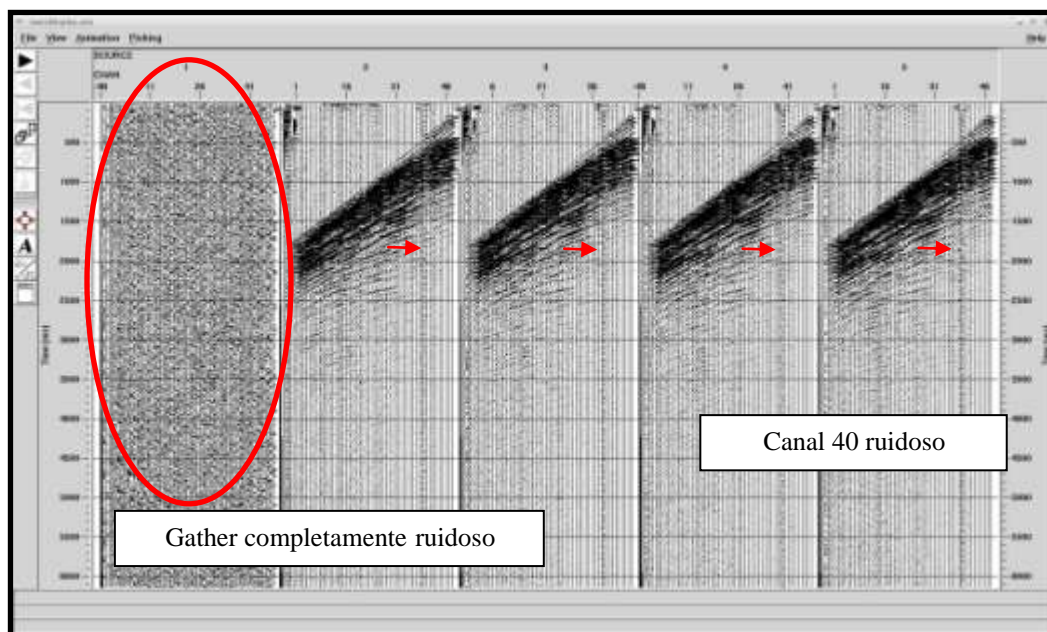


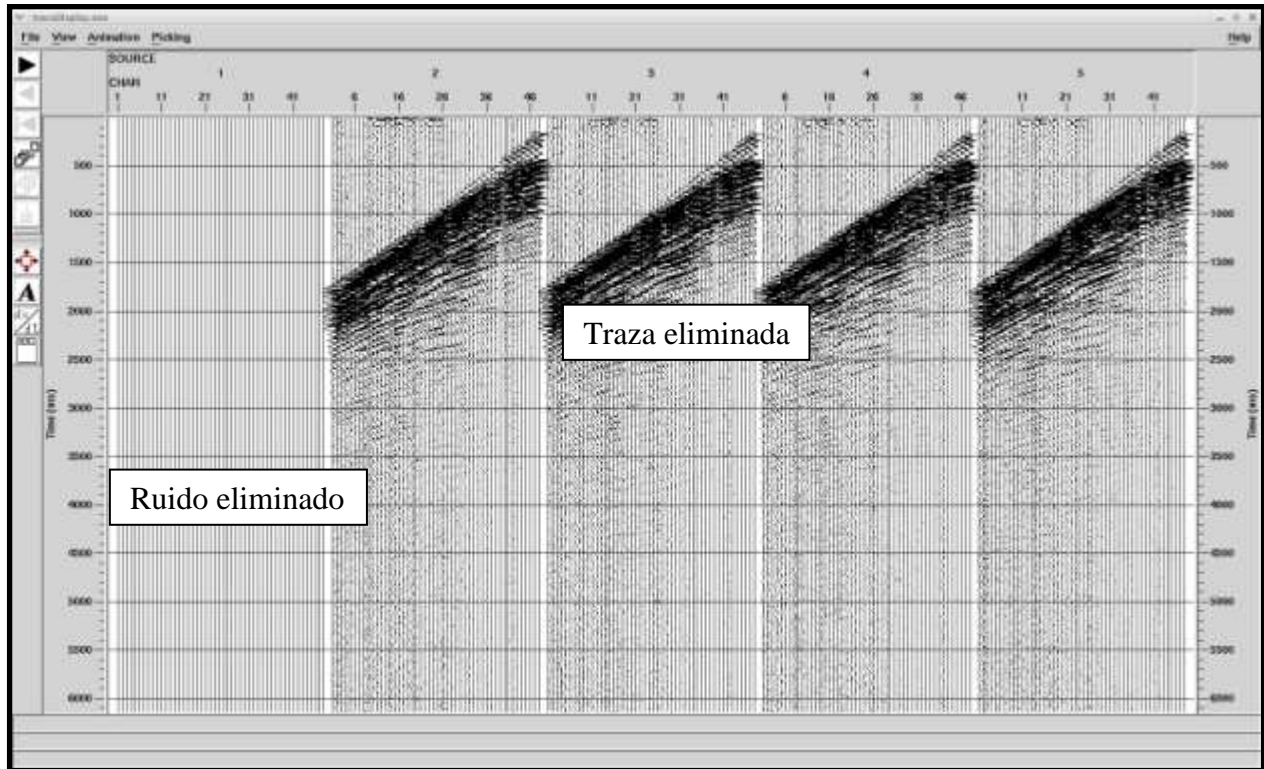
Figura 3.5 Tablas donde se modifican los parámetros geométricos de las líneas sísmicas.

3.3.1c Edición de registros

La información sísmica que se obtiene, es una suma de la energía enviada y de la respuesta reflectiva del subsuelo a esta, pero también transporta intrínsecamente una gran variedad de ruidos que van desde: 1) ruidos coherentes que muestran una fase consistente traza a traza como el *Ground-roll* (onda superficial Raleigh) ó múltiples (eventos que presentan más de una reflexión); 2) ruidos incoherentes compuestos de señales aleatorias y/o repetitivas que se generan principalmente cerca de la superficie, a partir de irregularidades, in-homogeneidades, mal funcionamiento de los geófonos así como malas conexiones o mal acomodamiento de estos (Figs. 3.7a y 3.7b); 3) ruido ambiental como la onda de aire o fuentes de poder. Todos los factores que se mencionan en el párrafo anterior generan algunas trazas con una relación señal/ruido (S/R) baja, las cuales deben ser eliminadas, ya que si se procesa incluyéndolas, introducirán información no deseada a la señal de interés y como consecuencia, la señal se verá opacada o alterada por dichos ruidos. Para eliminar las trazas con relación S/R baja se utilizó el *kill trace*, que únicamente permite eliminar los ruidos incoherentes a través de la identificación y posterior selección de estas trazas. Para aplicar esta función, se debe especificar el número de fuente y el número de canal donde se encuentra localizada la traza ruidosa, lo que el *kill trace* hace es igualar a 0 la traza indicada, para que no tenga una interferencia constructiva o destructiva en la señal. A continuación en las figuras 3.6a y 3.6b se visualiza la eliminación de trazas en diferentes casos

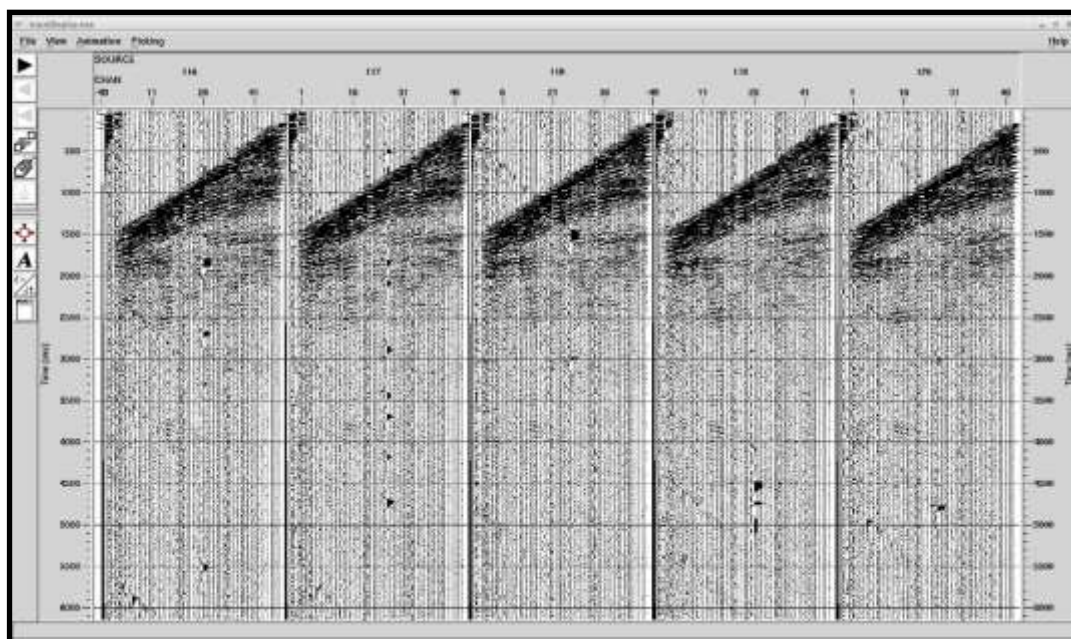


a)

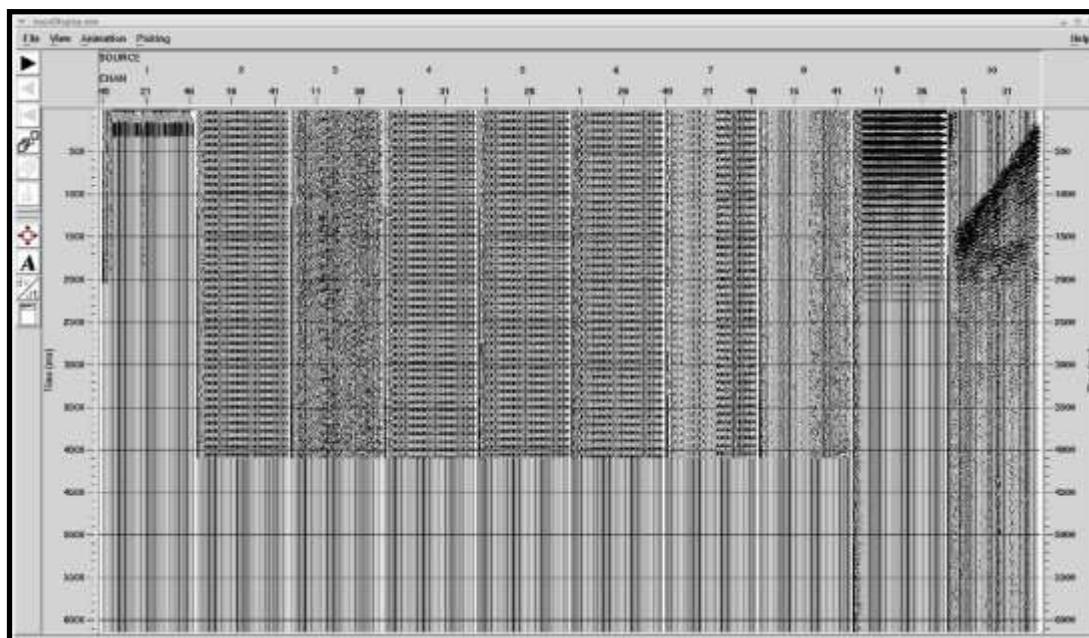


b)

Figura 3.6 Línea 5072: a) El círculo rojo muestra un *gather* ruidoso desde la traza 1 a la 48, las flechas rojas indican una traza ruidosa que aparece persistentemente en las fuentes 2-5. b) *kill trace* aplicado en la fuente 1 eliminando las trazas 1-48, cabe mencionar que aunque en la fuente 1 se da un valor de cero a todas las trazas para eliminar el ruido, el despliegue espacial del *gather* no se elimina ya que representa una distancia que no debe ser modificada. La traza 40, fue eliminada por completo.



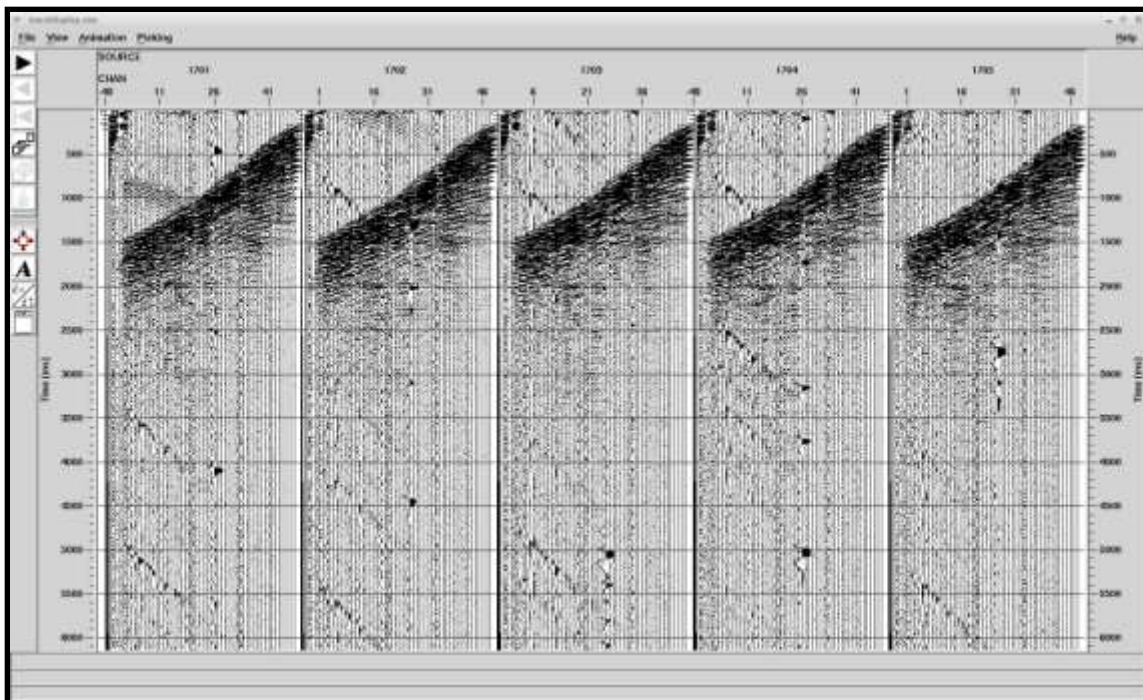
a)



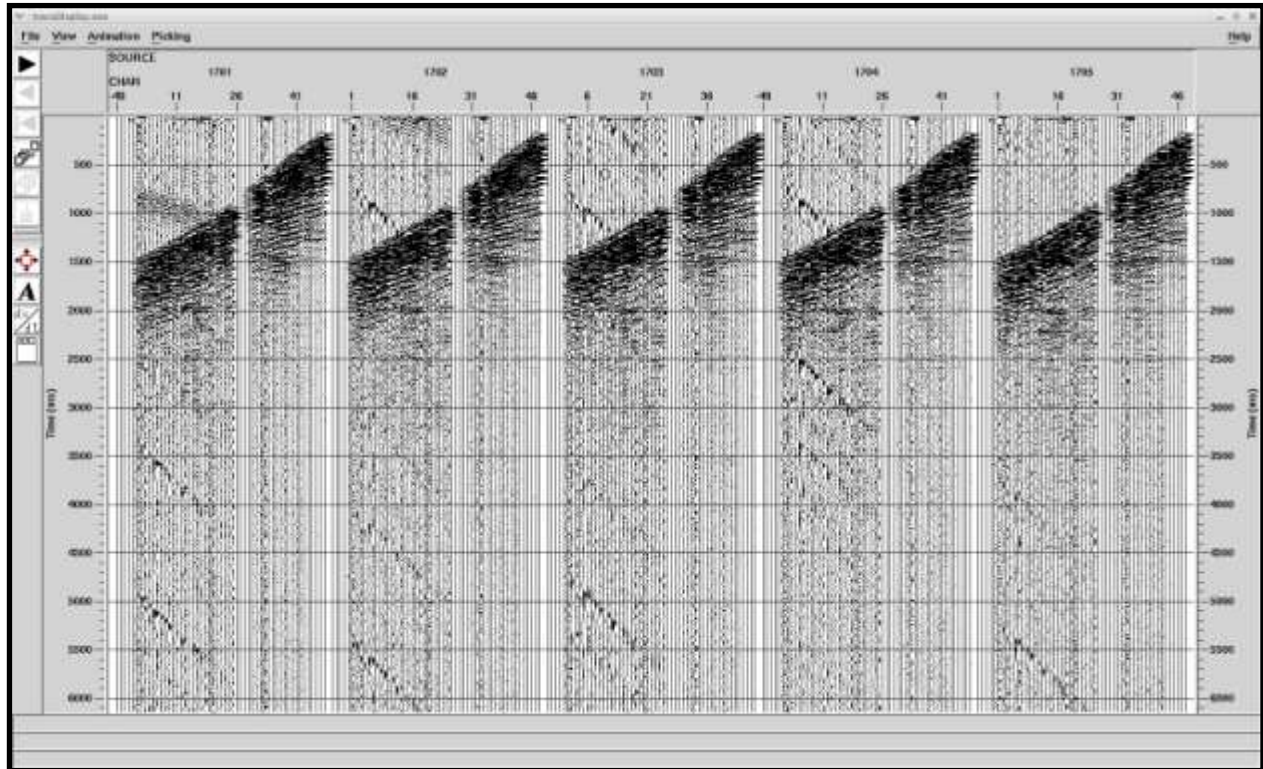
b)

Figura 3.7 Las figuras a) y b) muestran dos ejemplos de los ruidos encontrados en las líneas procesadas, donde el formato de estos cambia en los diferentes segmentos. Todos se eliminaron con la aplicación del *kill trace*.

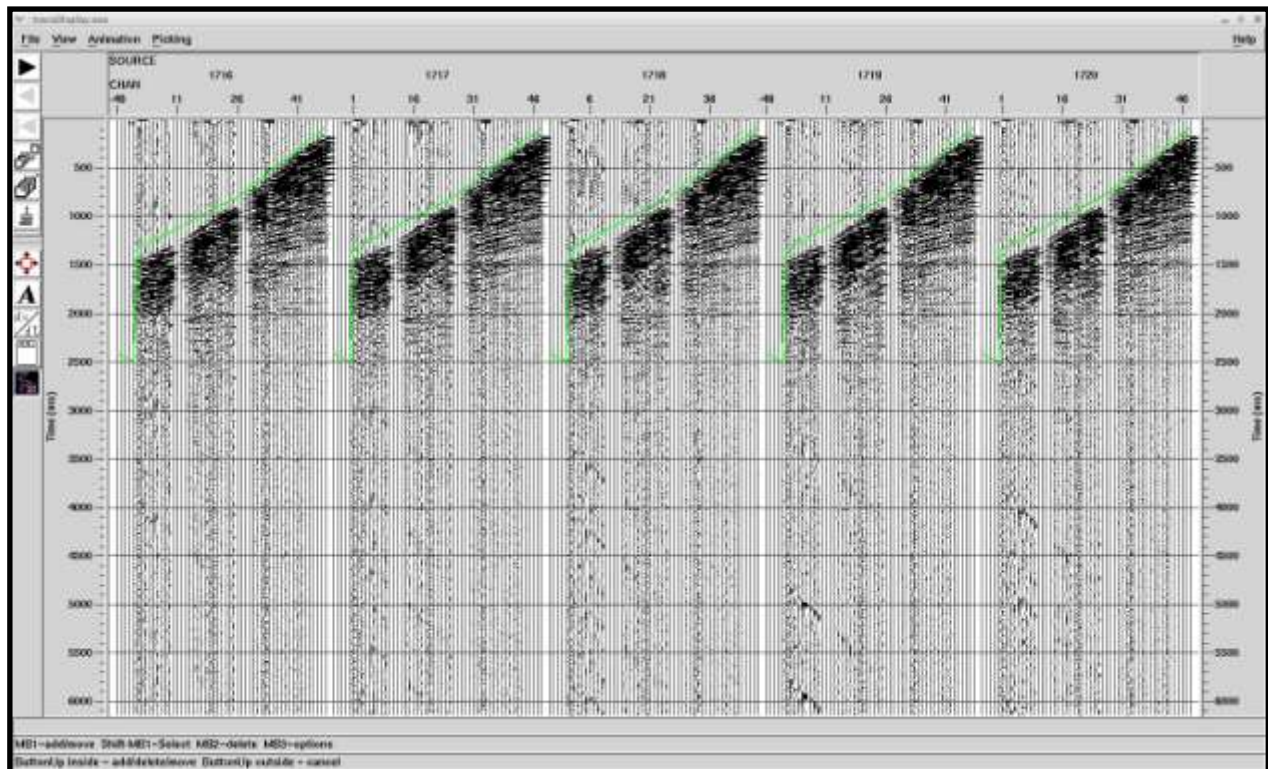
En esta etapa se aplica también el *Top Mute*, que es un método para eliminar energía o señales que llegan antes que las reflexiones y ruido de fondo que no procede de la fuente. La importancia de realizar este proceso, es que la señal de primera llegada no ha experimentado pérdida de energía, por lo que las amplitudes que la caracterizan son grandes, entonces, si se aplica posteriormente el algoritmo de Control Automático de Ganancia, el cual es una regularización de las amplitudes, que depende directamente de los valores de amplitud ubicados en los registros, la ponderación se verá afectada por las grandes amplitudes representativas de los primeros arribos. A continuación, en las Figuras 3.8 a), b), c) y d), se muestra la secuencia de edición de registro para la línea 5072 segmento 2. Los registros de campo originales; es decir, sin ningún proceso después de la adquisición, tienen una numeración que no corresponde a los verdaderos puntos de tiro, sino que son solo identificadores para el equipo encargado de la adquisición, por esta razón, los *gathers* deben ser renombrados, esto se logra a través de la aplicación de etiquetas en ProMAX[®]. Las líneas usadas fueron renombradas de acuerdo a su número de fuente, las etiquetas usadas fueron 3, por identificador de campo (*Field File ID*), por número de CDP (*CDP Bin Number*) y por número de fuente activa (*Live Source Number*), en estas es necesario especificar la trayectoria del barco de adquisición, es decir; cuál es el número inicial de la fuente y si este debe disminuir (-1) o aumentar (1). Si no se lleva a cabo de manera correcta esta configuración, puede dar como resultado secciones sísmica invertidas, lo que genera una interpretación errónea de las estructuras.



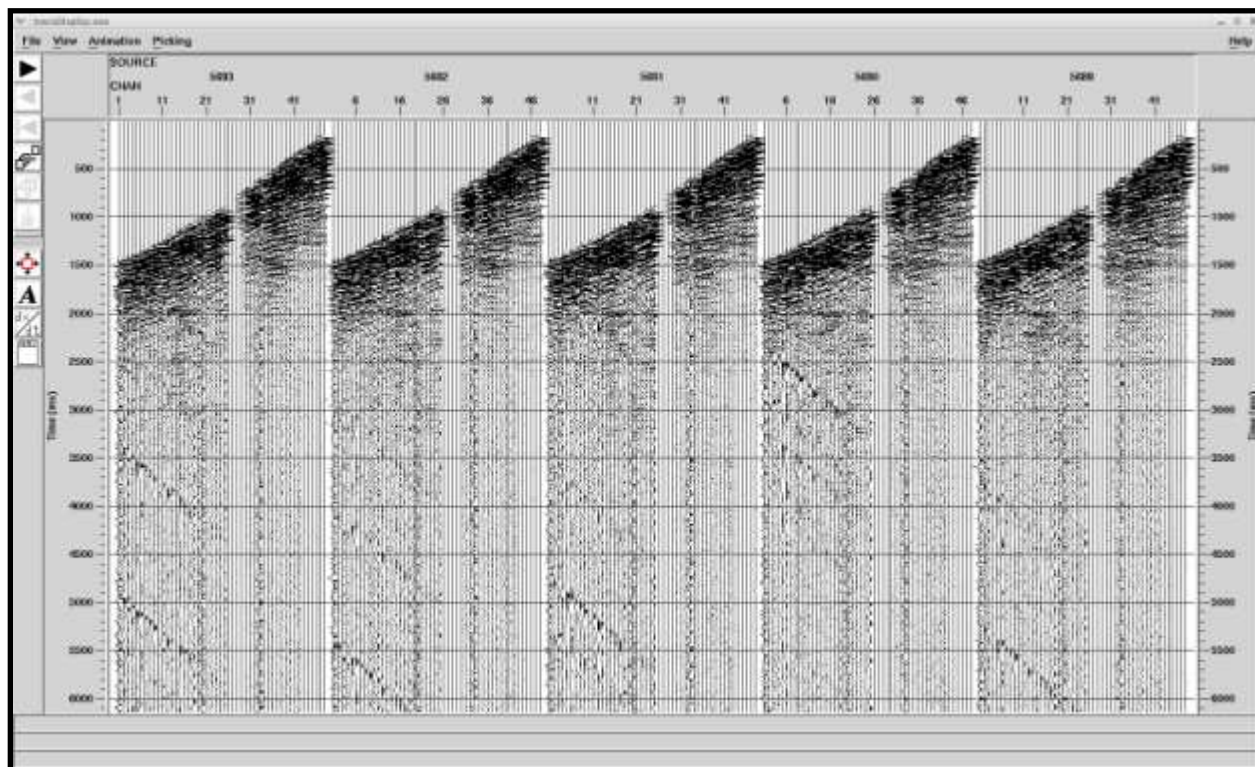
a)



b)



c)

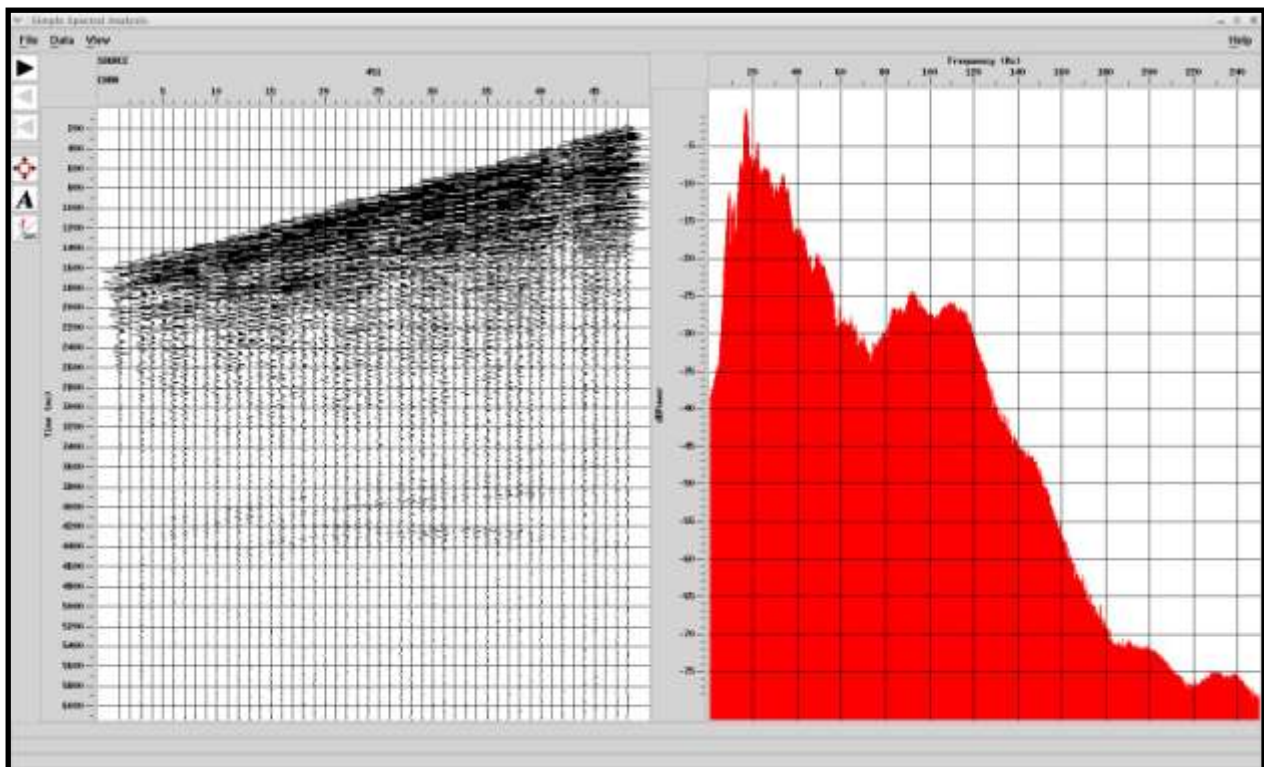


d)

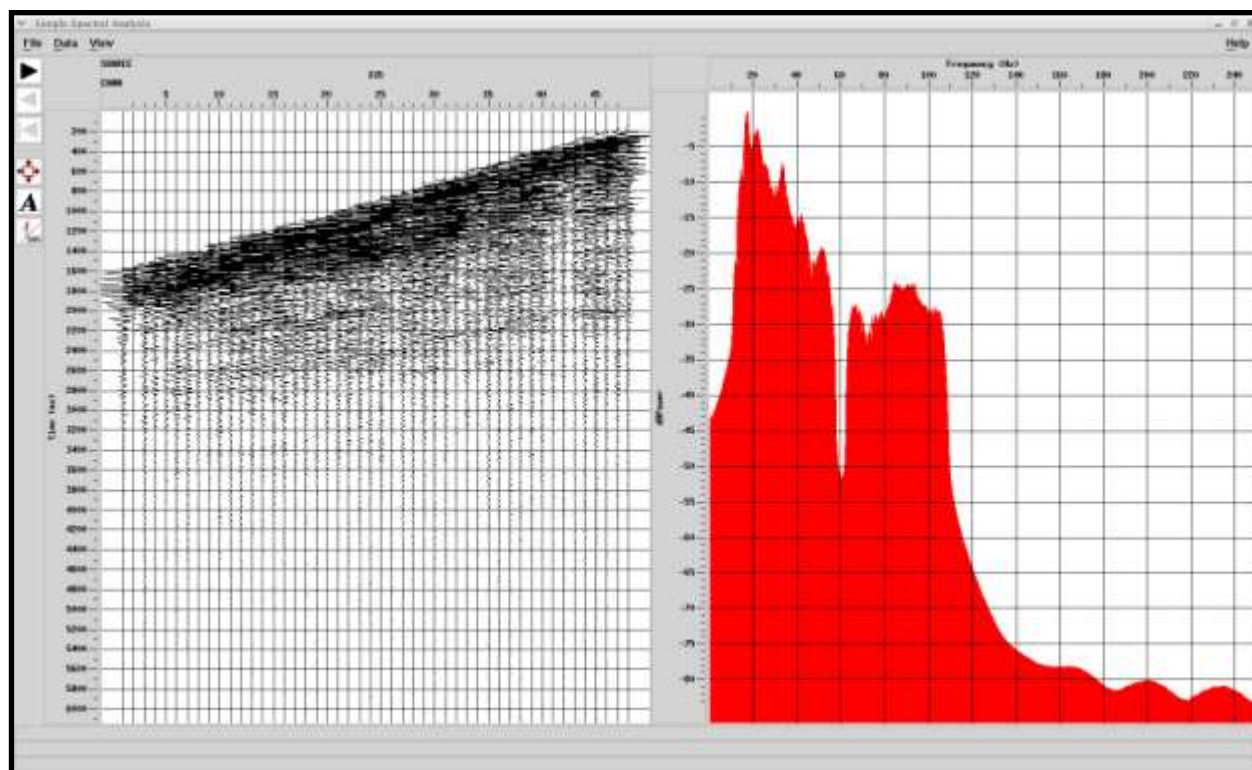
Figura 3.8 a) Línea 5080 segmento 1 sin ningún proceso, b) Aplicación del *kill trace* para eliminar las trazas con una relación *S/R* baja, c) Selección de la señal a eliminar a través del *Top Mute*, d) Resultado final después de la aplicación de *kill trace*, *Top Mute* y definición de etiquetas.

3.3.1d Filtrado pasa banda

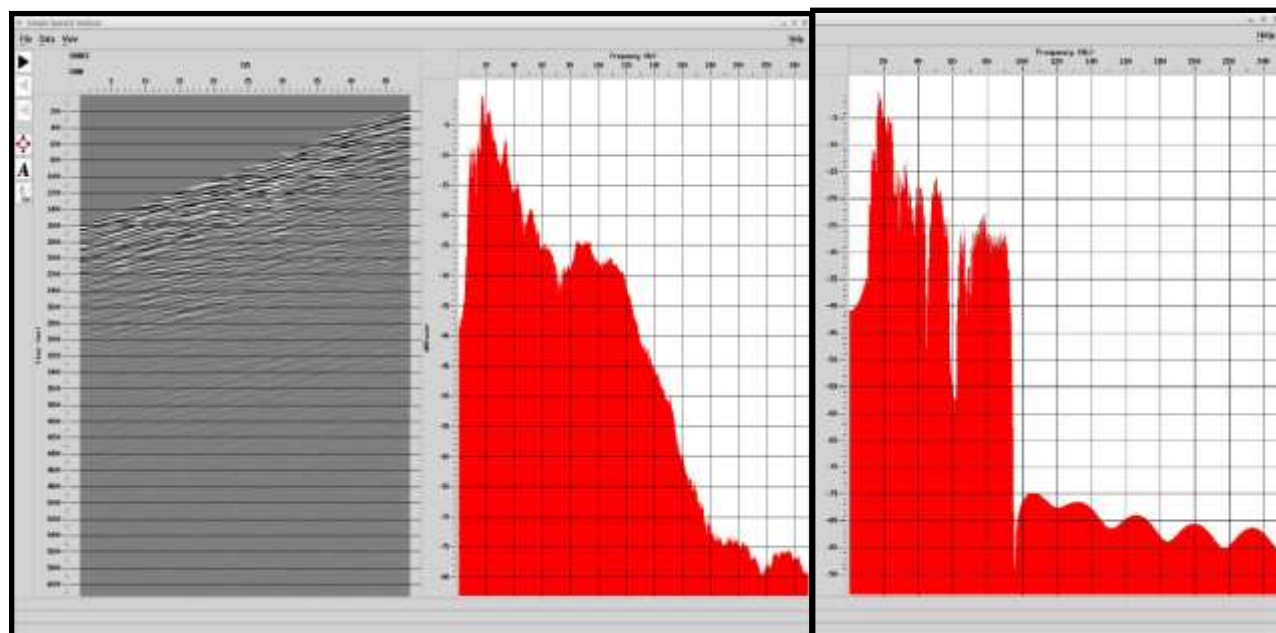
El objetivo principal de un filtro es remover o atenuar los ruidos coherentes que no pueden ser eliminados a través del *kill trace* o *Top Mute*, y que quedan remanentes en los *gathers*, así como resaltar los eventos reflectivos de interés que contienen la señal buscada. La energía reflectiva coherente perteneciente a las estructuras del subsuelo, por lo general está contenida dentro de un rango de frecuencias determinadas y puede ser extraída a través de un filtro pasa banda (algoritmo que opera en el dominio de la frecuencia), el cual deja pasar la concentración de la energía en una banda limitada de frecuencias, este filtro se determina haciendo un análisis del espectro frecuencial para escoger el tamaño de la banda de acuerdo a lo que se visualiza en el comportamiento de las frecuencias. En las líneas 5080,5072, 5080 y 5076 se aplicó un filtro pasa banda *Ormsby* con una fase mínima, los parámetros utilizados para cada línea varían de acuerdo a la disposición de las frecuencias. En la figura 3.9a se muestra un análisis frecuencial y la determinación de los valores del filtro pasa banda para la línea 5080 segmento 3, en el cual los valores del filtro *Ormsby* son 8-10-95-100, simultáneamente se aplicó un filtro *Notch* de 60 Hz para eliminar el ruido producido por las fuentes de poder caracterizadas por esta frecuencia (Fig. 3.9b y 3.9c). La tierra es un filtro natural por lo que a mayores profundidades no se esperan frecuencias altas, estas pueden eliminarse a través de la banda.



a)



b)



c)

Figura 3.9 Análisis del contenido frecuencial: a) *gather* sin filtro pasa banda; b) registro con filtro pasa banda aplicado, el mayor contenido de la frecuencia se encuentra en 15-85 Hz; c) comparación de (a) y (b).

3.3.1e Filtrado F-K (frecuencia-número de onda)

Este filtro opera en el dominio de la frecuencia y el número de onda, es un filtro espacial que ayuda a eliminar el ruido coherente (Fig. 3.12) que se presenta de manera lineal y con bajo ángulo (velocidades bajas), como por ejemplo, la onda generada por el aire y el *Ground roll*, la mayor parte de estas últimas ondas superficiales del tipo Raleigh presentan velocidades que varían de 100 a 1000 ms con valores de frecuencias de (≤ 10 Hz) que generalmente son menores que los generados por las reflexiones. A través de la determinación de las pendientes se puede reconocer qué sectores pertenecen a reflexiones (tendencias lineales con ángulos mayores) indicando mayor velocidad de propagación.

Además es una gran herramienta para la atenuación del *Aliasing* que se genera por el muestreo espacial insuficiente o sobremuestreo de la señal, dando como resultado una señal de diferentes características a la señal original. El muestreo de la señal debe realizarse bajo el criterio de Nyquist $\frac{1}{2} \Delta t$ para disminuir este problema espacial (Fig. 3.10).

Las fuentes de poder (energía eléctrica) generan una frecuencia definida por 60 Hz la cual introduce ruido a la señal, por lo cual se aplica un filtro *Notch* en el análisis F-K para remover esta frecuencia (Figs. 3.11a y 3.11b).

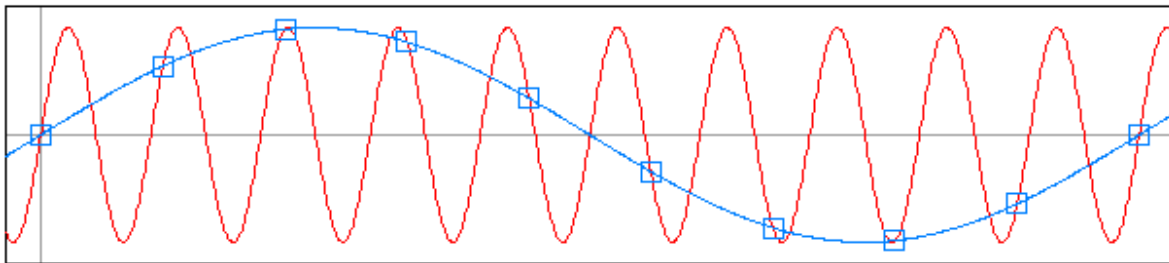
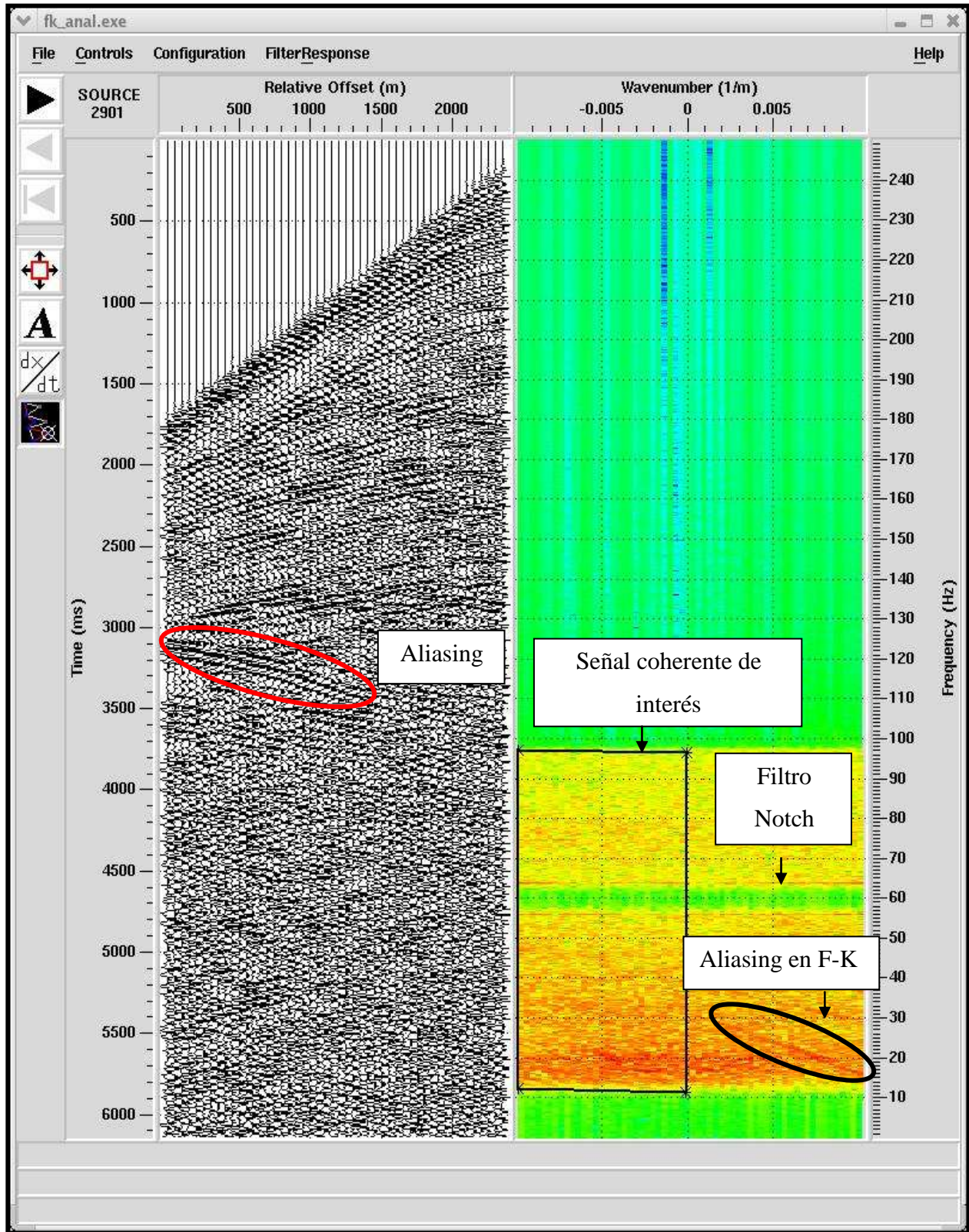
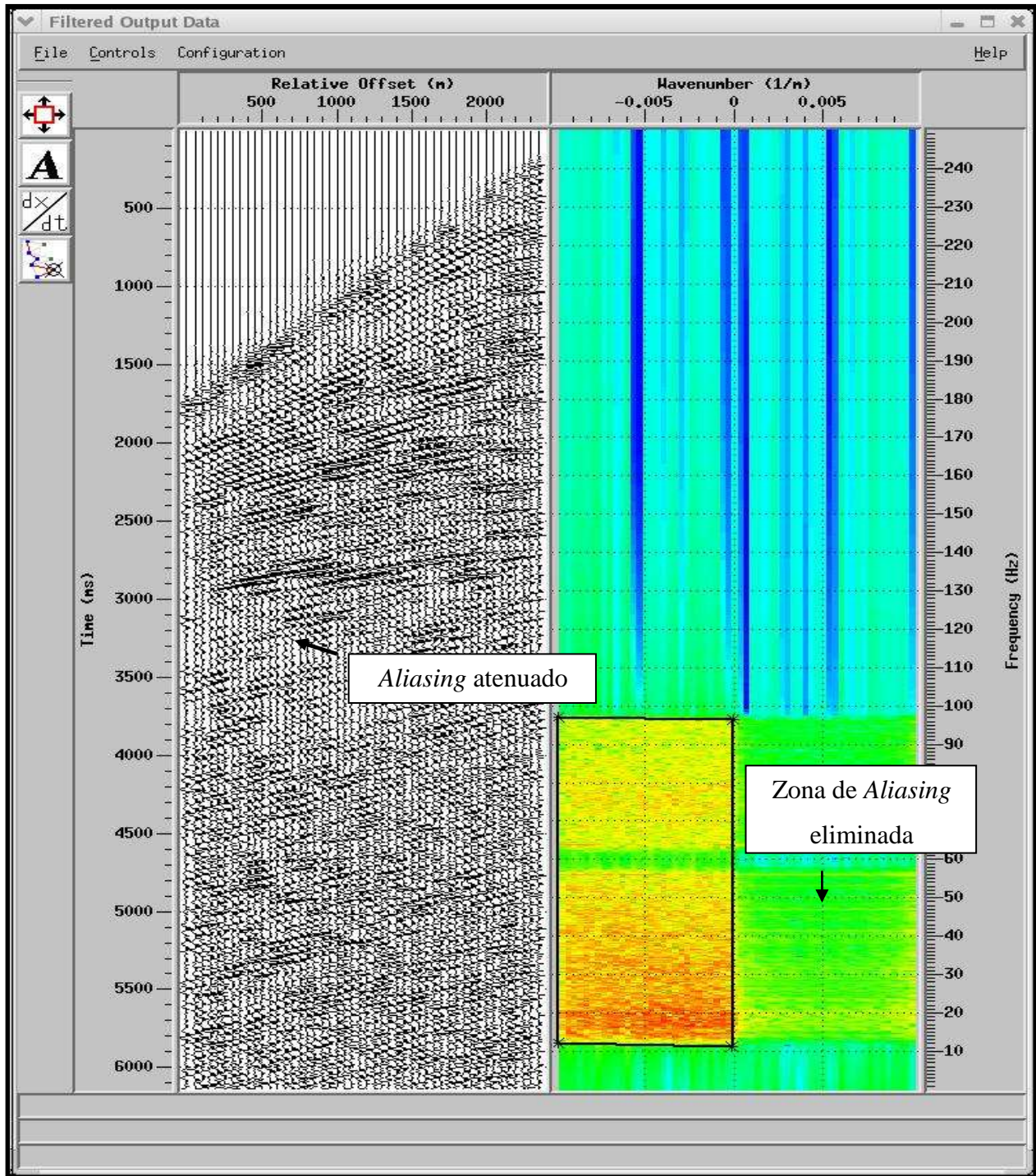


Fig.3.10 En color rojo se muestra la señal original que se desea ser reproducida a través del muestreo y digitalización, b) en color azul se muestra la señal obtenida si la tasa de muestreo no cumple con el criterio de Nyquist (Tomada de Stolfi, 2004).



a)



b)

Figura 3.11 Análisis F-K: a) detección de *aliasing* y visualización del filtro *Notch* representado por 60 Hz, b) respuesta al remover el *aliasing* del registro a través de la definición del trapecio en el dominio F-K.

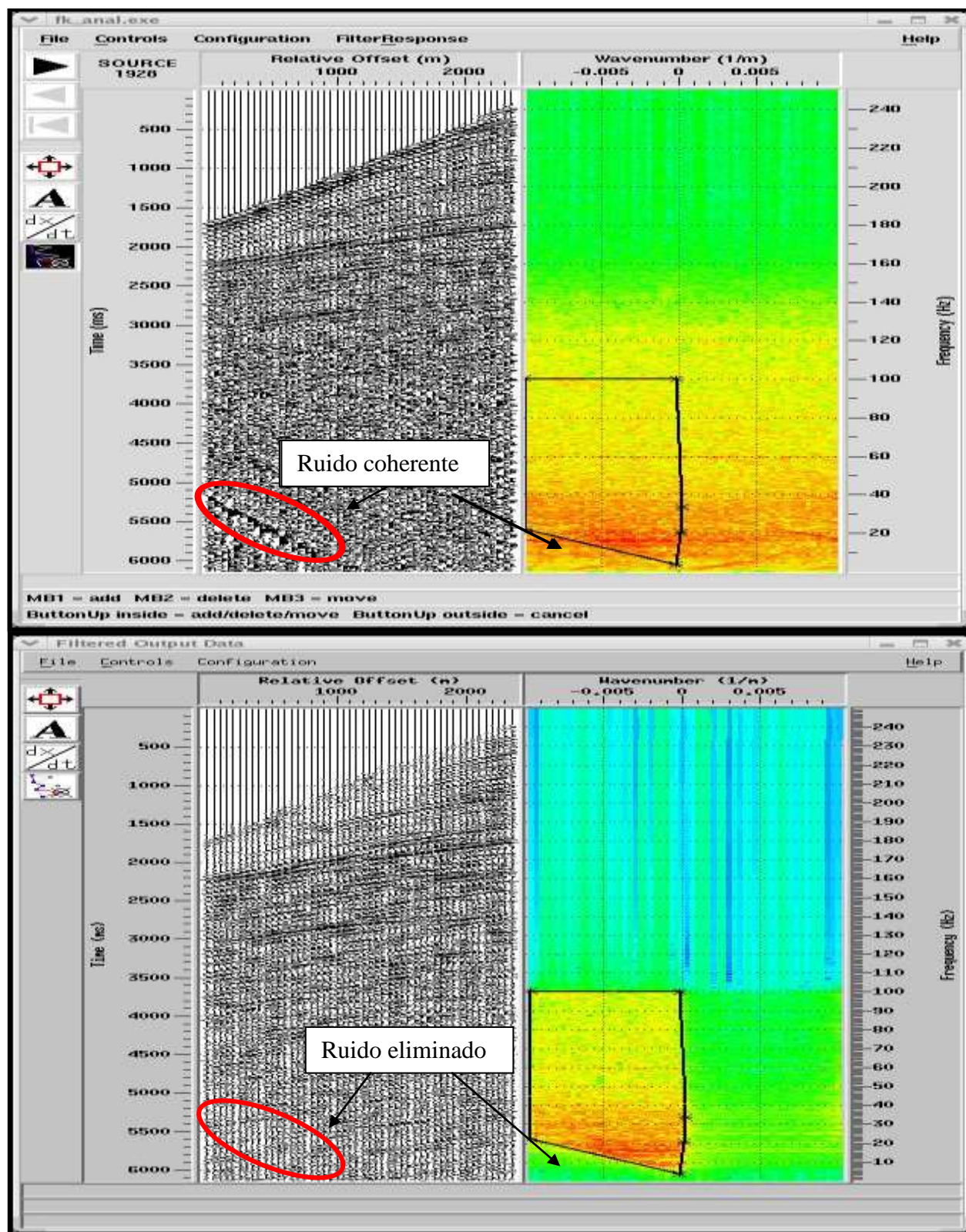


Figura 3.12 El ruido muestra una fase consistente y se localiza en la zona donde está la señal de interés, por lo que el filtro F-K se ajusta en los *gathers* donde este aparece.

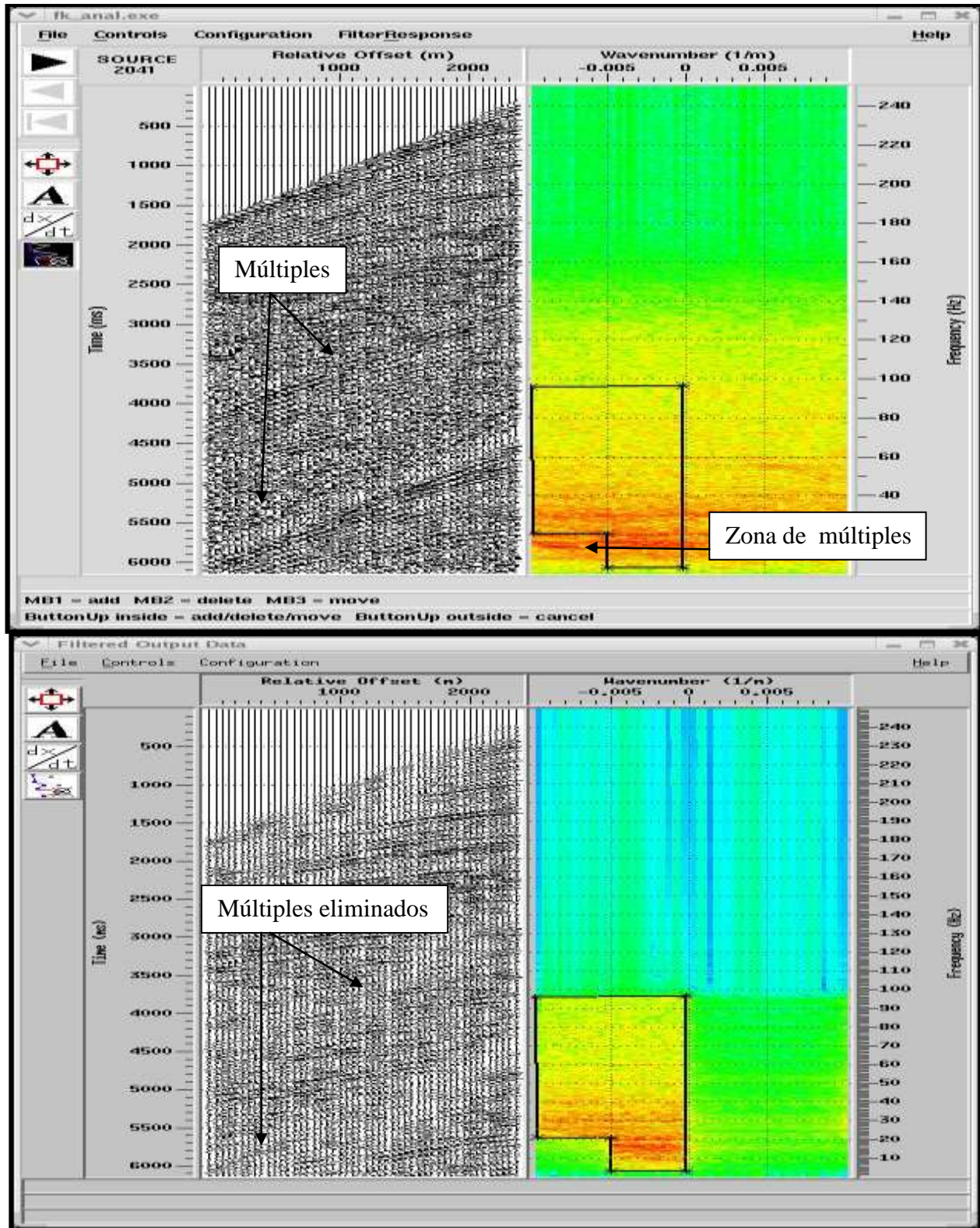


Figura 3.13 Múltiples eliminados a través de la modificación del polígono en el dominio F-K.

3.3.1f Corrección por divergencia esférica

Podemos considerar a la energía sísmica como un frente de onda (esfera de energía expandiéndose desde el punto de tiro en todas direcciones), o una serie de rayos (líneas dibujadas perpendicularmente al frente de onda que muestran la dirección de la propagación de la energía) emanados de un tiro o disparo, la perturbación en estos puntos tiene la misma fase, cuando el movimiento ondulatorio alcanza los puntos que componen a un frente de onda, cada partícula del frente se convierte en una fuente secundaria de ondas, este proceso se repite, lo que hace posible la propagación de la energía a través de un medio.

La corrección por divergencia esférica se realiza debido a que la energía se distribuye radialmente, mientras los frentes de onda se alejan de la fuente (Fig.3.14), esta disipación de la energía es más fuerte cuando el área de dispersión aumenta, generando que las amplitudes de la señal disminuyan al alejarse de la fuente, esto es, a mayor *offset* la energía decrece y por consecuencia las amplitudes registradas también. La amplitud es inversamente proporcional al *offset* cuando se asume un modelo de velocidad constante (Divergencia esférica= $1/\text{distancia}$) en un medio homogéneo e isotrópico, pero los contrastes litológicos son variados en la realidad y las capas más profundas poseen una mayor compactación (lo que genera una mayor velocidad) debido a la presión litostática, por lo cual la recuperación de las amplitudes para las líneas de este trabajo se realizó asumiendo un aumento en la velocidad de propagación de la energía con la profundidad.

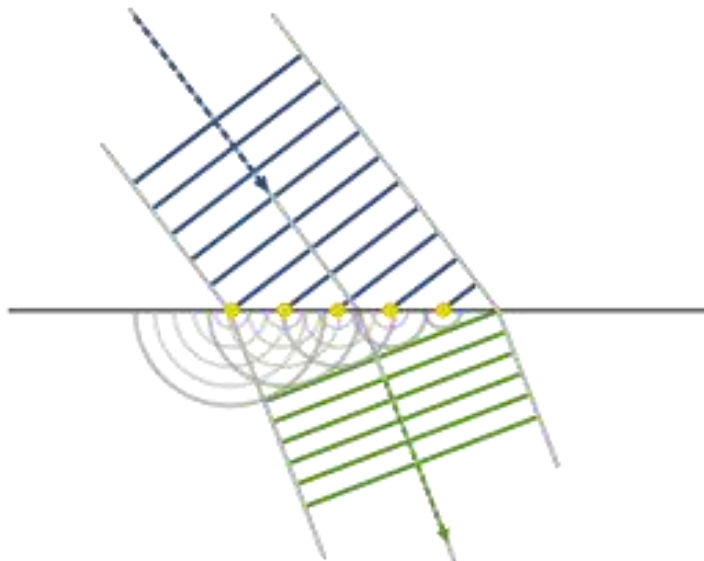


Figura 3.14 Propagación de los frentes de onda (Tomada de Nordmann, 2007).

3.3.1g Deconvolución

Para entender el concepto de deconvolución se debe tener claro que es el modelo convolucional de la tierra (Fig. 3.15), el cual radica en lo siguiente: las señales sísmicas, al introducirse en el subsuelo se ven afectadas por reflexiones, refracciones, reverberaciones, difracciones, múltiples, reflexiones en interfaces de estratos delgados, absorción no lineal y ruido adicional, parte de energía que viaja hacia el subsuelo, es reflejada al encontrar cambios en la densidad y la velocidad (contrastes de IA) entre capas de diferente composición, a esta energía que regresa se le conoce como coeficiente de reflexión, la energía que continua su camino es el coeficiente de transmisión.

De tal manera que, finalmente la señal registrada en superficie es una convolución del impulso producido por la fuente con los factores mencionados, lo que produce cambios a la señal de entrada: $S(t) = k\delta(t) \otimes a(t) \otimes z(t) + u(t)$ (1)

$S(t)$ = Ondícula

$k\delta(t)$ = impulso – δ

$a(t)$ = Absorción – rápida – de – altas – frecuencias

$z(t)$ = otros – factores

$u(t)$ = ruido

El coeficiente de reflexión esta dado por la siguiente fórmula:

$$CR = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} \quad (2)$$

Donde:

ρ es la densidad de la capa

v es la velocidad de la capa

La cantidad de energía reflejante regresada es el cociente entre la diferencia de las impedancias acústicas y su suma.

La deconvolución consiste en la compresión de la ondícula básica, con el propósito de eliminar el efecto generado por la fuente de energía. Este proceso limpia la señal para que se pueda reducir a un *spike* o pico, el cual es la respuesta reflectiva del medio sin la alteración generada por el impulso de entrada, mejorando la resolución temporal, atenuando o removiendo ruido coherente, y reverberaciones de la fuente generadas por la capa de agua.

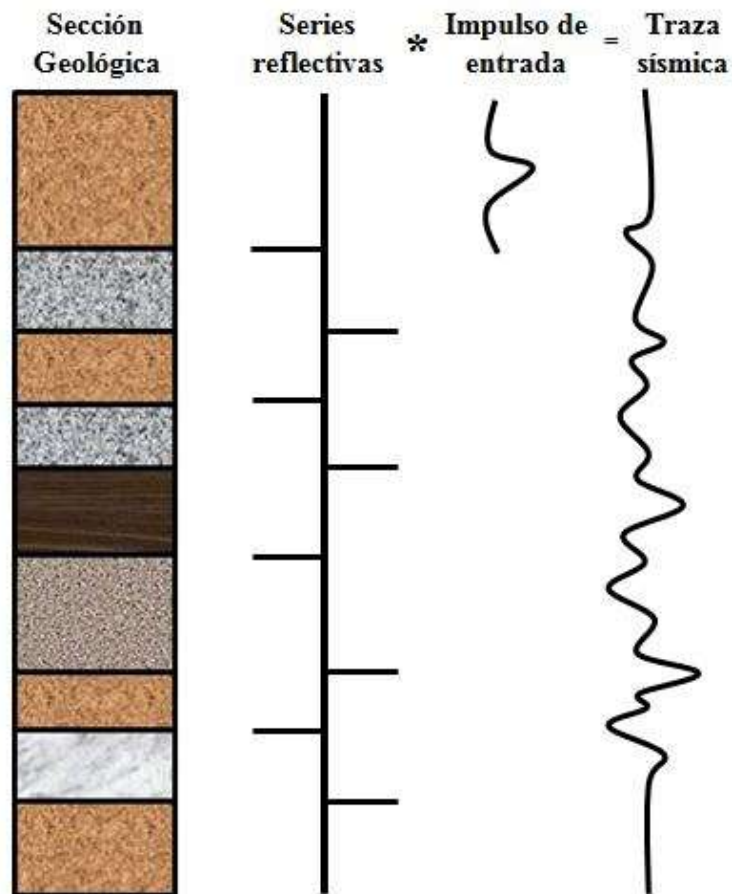


Figura 3.15 Modelo de convolución tomando en cuenta solo la respuesta reflectiva de las capas sin la intervención de ruidos.

Antes de realizar la deconvolución de la señal, se hace una comparación de cómo son los impulsos de la fuente en las ventanas de tiempo, esto se logra aplicando el despliegue de la correlación con el objetivo de visualizar la energía proveniente de la fuente y establecer los parámetros que se usaran en la deconvolución, para así generar la atenuación de dicho efecto. En la parte superior de la Figura 3.16 se muestra la ventana de correlación para el segmento tres de la línea 5080 y en la parte inferior la correlación del mismo segmento después de aplicar la deconvolución de *spike*, donde se visualiza claramente una atenuación del efecto de la fuente. La deconvolución puede ser aplicada en diferentes etapas del procesamiento, esto es de acuerdo a las necesidades de los que procesan la señal.

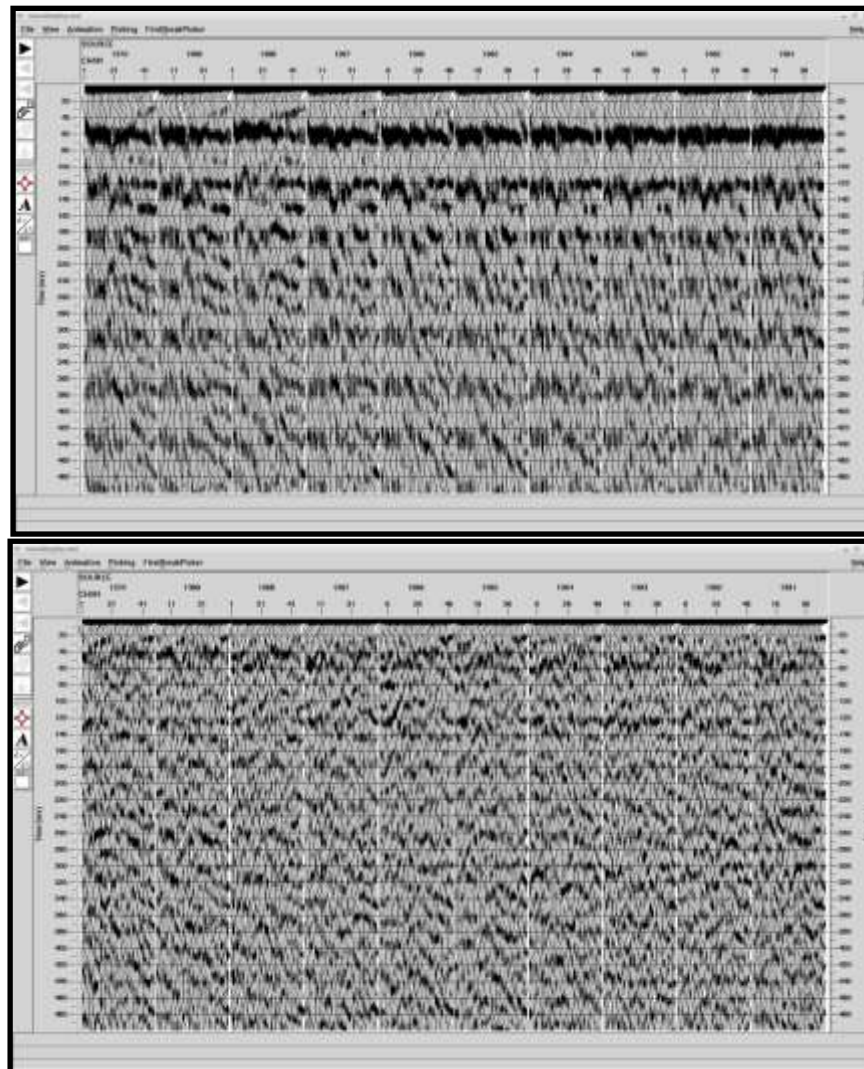


Figura 3.16 Ventanas de correlación de la señal de entrada o impulso, realizan una comparación de la señal en ventanas de tiempo para escoger los parámetros que se estipularán en la deconvolución de *spike*.

3.3.2 PROCESAMIENTO APILAMIENTO

3.3.2a Ordenamiento por CDP

Para generar trazas sísmicas que tengan una relación S/R más alta, estas son organizadas y agrupadas de acuerdo a la geometría de cada disparo a un mismo punto de reflexión común. El punto medio común (CMP) como su nombre lo indica, se localiza geoméricamente a la mitad del *offset* ó distancia fuente receptor, su proyección a profundidad en un modelo de capas planas se denomina punto profundo común (CDP). La suma de estas trazas pertenecientes a un mismo punto en el subsuelo, pero provenientes de diferentes *offsets*, genera como resultado final una traza llamada CDP, la cual contiene mayor información de dicho punto muestreado (Fig. 3.17). La redundancia en los datos es de 4800% o cobertura 48; es decir, un mismo punto en el subsuelo es iluminado 48 veces por diferente fuente-receptor.

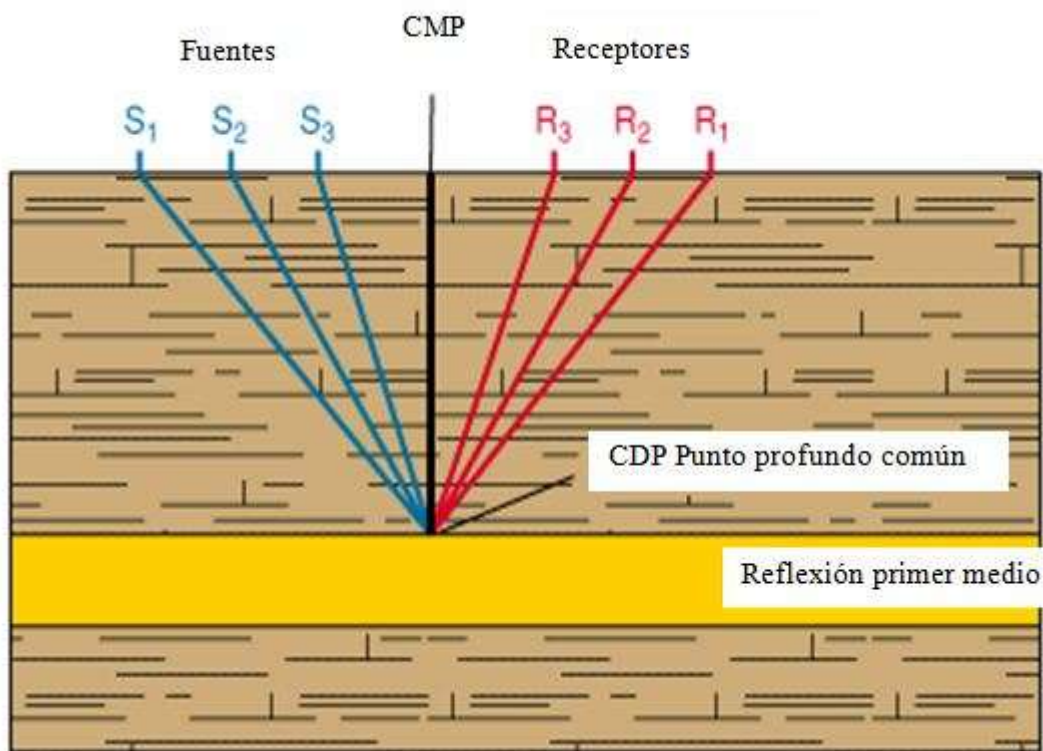


Figura 3.17 Muestra la ubicación del CMP y el CDP para la primera capa de un medio, la traza CDP contiene información proveniente de diferentes fuentes y receptores en un mismo punto en profundidad.

3.3.2b Análisis de velocidad

Es de fundamental importancia determinar un modelo de velocidades de reflexión adecuado, ya que de esto depende que el apilamiento de los datos sísmicos se realice correctamente y que las señales pertenecientes a los reflectores de interés sean sumadas de manera coherente. El análisis de velocidad se realizó sobre conjuntos de CDP determinados generando una ley de velocidades que se ajustara a la litología del subsuelo. El resultado de este análisis fue un campo de velocidades con el cual se obtuvo la sección sísmica después de aplicar el apilamiento y los procesos que este incluye. Para analizar las velocidades se debe generar un *supergather*, en el cual se determina a cada cuantos CDP *gathers* se hará la estimación de las velocidades (a cada 15 para las líneas de este trabajo), mientras más pequeño sea este valor más exactitud tendrá el modelo; es decir, habrá menos espaciamientos en la malla durante la interpolación de los valores de velocidad escogidos.

Se utilizaron de manera simultánea dos métodos para el análisis de las velocidades de reflexión sísmica (Fig. 3.18), los cuales serán descritos a continuación:

- **Espectro de semblanza:** Despliega un conjunto de máximos y mínimos que representan altas y bajas: concentraciones de energía, contrastes en las IA y horizontalidad, tomando en cuenta que por lo general la velocidad aumenta con la profundidad, las velocidades deben de ir aumentando de manera proporcional al tiempo, a menos que se presenten capas de baja velocidad, lo cual no es muy común para esta área. Es de gran importancia ser precavido en la selección de los valores de la semblanza ya que estos pueden confundirse con múltiples de la señal, los cuales están caracterizados por bajas velocidades y semblanzas altas (que caracterizan a los reflectores de interés). Finalmente, el *software* hace un promedio de las velocidades de un punto de semblanza seleccionado al siguiente.
- **Modelo de velocidad constante:** Consiste en hacer graficas de prueba y error, lo cual es poco preciso pero visualmente efectivo, se logra generando grupos de CDP a los cuales se les aplica diferentes valores de velocidad constante para corregir por NMO, si los reflectores pasan de estar de manera hiperbólica a horizontal, significa que se estipularon correctamente los valores de velocidad, los cuales solo funcionan en un intervalo de tiempo específico.

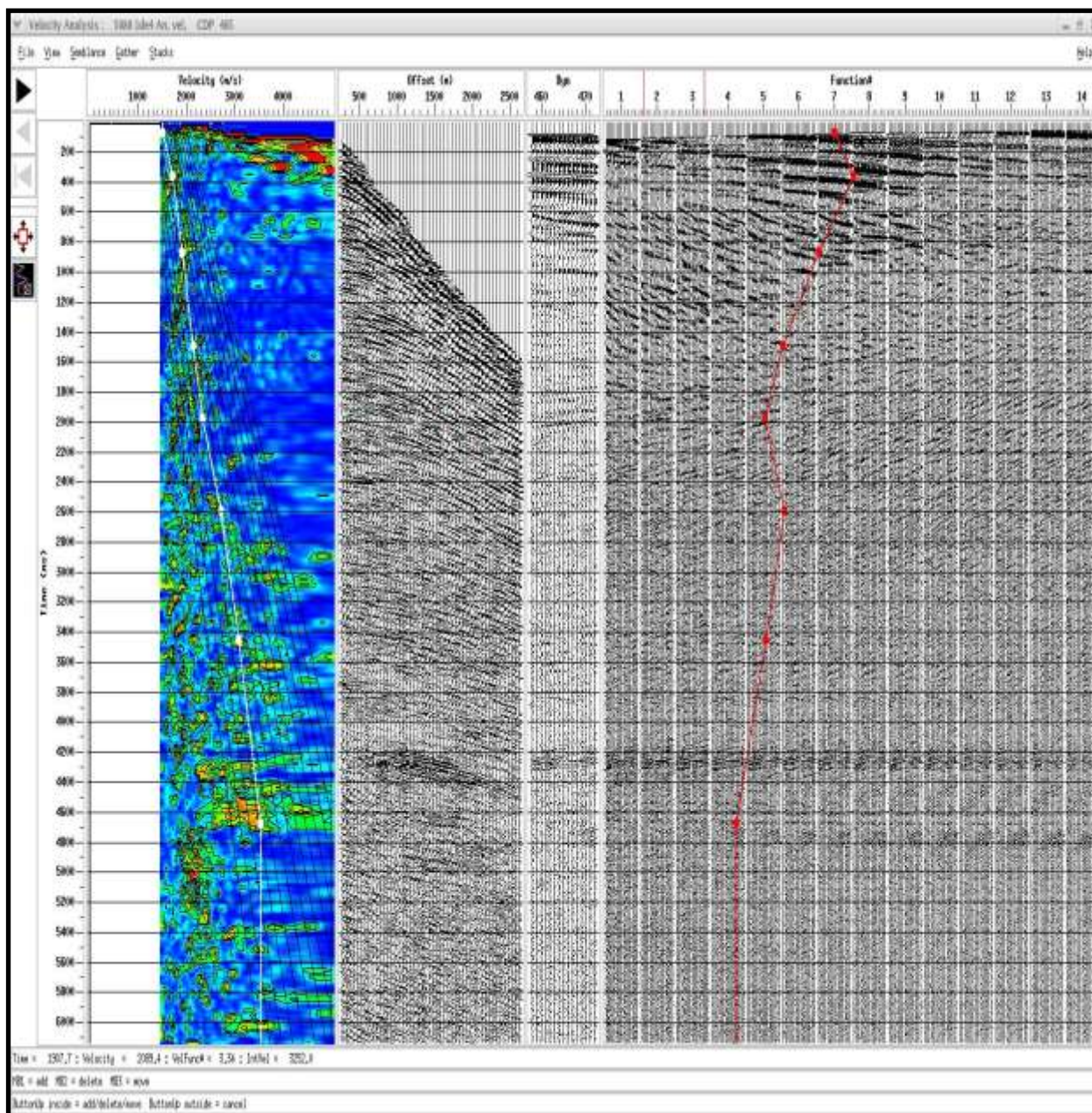


Fig.3.18 Análisis de velocidad donde se muestra de izquierda a derecha: 1) El espectro de semblanza, en la paleta de colores seleccionada el rojo representa valores altos de semblanza. 2) Registro CDP a corregir. 3) Corrección dinámica por NMO. 4) Método de velocidad constante.

3.3.2c Corrección por NMO

La corrección por NMO consiste en llevar a la horizontalidad aquellos reflectores que desarrollan una superficie hiperbólica (Fig. 3.19), esto ocurre debido a que la distancia desde la fuente o punto de tiro no es la misma para todos los receptores, ya que estos son colocados en diferentes *offsets*, por lo cual los receptores más alejados de la fuente desarrollarán tiempos de viaje más largos que los que están más cercanos a esta, es una corrección geométrica en la cual se transforman estas distancias fuente-receptor a cero, para que las velocidades de propagación de la energía representen el tiempo doble verdadero, sin influencia de el factor distancia. Para generar esta corrección se utiliza el modelo de velocidad, si los reflectores muestran una tendencia cóncava significa que las velocidades aplicadas fueron bajas y si es convexo significa que las velocidades estipuladas fueron sobrevaluadas, la horizontalidad de los reflectores indica un modelo de velocidades aceptable.

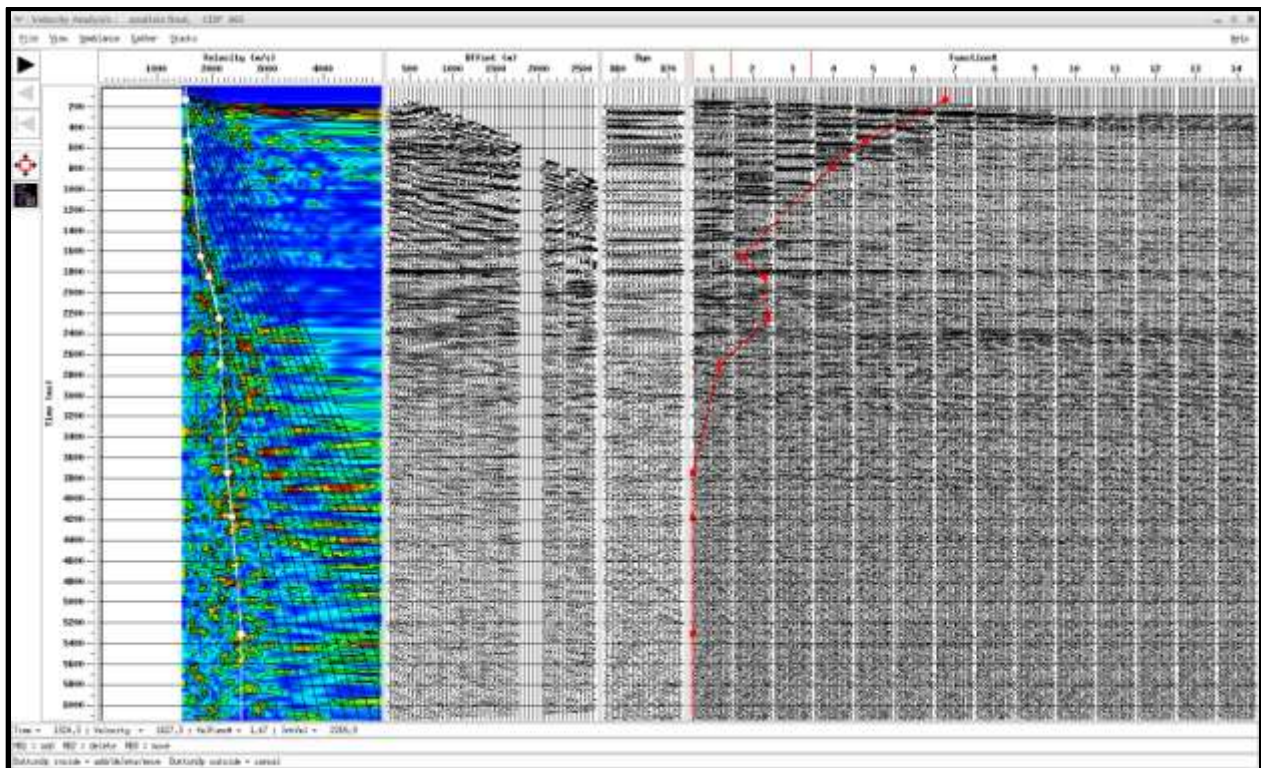


Figura 3.19 A través del modelo de velocidades se genera la corrección por NMO en donde los reflectores pasan de hiperbólicos a horizontales.

3.3.2d Modelo de velocidad

Después de haber terminado el análisis se obtiene un modelo de velocidades para cada tiempo, el cual representa la diferencia entre las capas del subsuelo, este modelo puede ser visualizado y corregido a través de un editor que despliega con una paleta de colores la diferencia entre las velocidades, como se muestra en la Figura 3.20; el color rojo representa a las velocidades más altas y el azul las más bajas dadas en m/s. Es preferible no modificar mucho este modelo si se está seguro del análisis de velocidad efectuado. Para la mayoría de los modelos realizados en este trabajo se aplico un suavizado no mayor a 10.

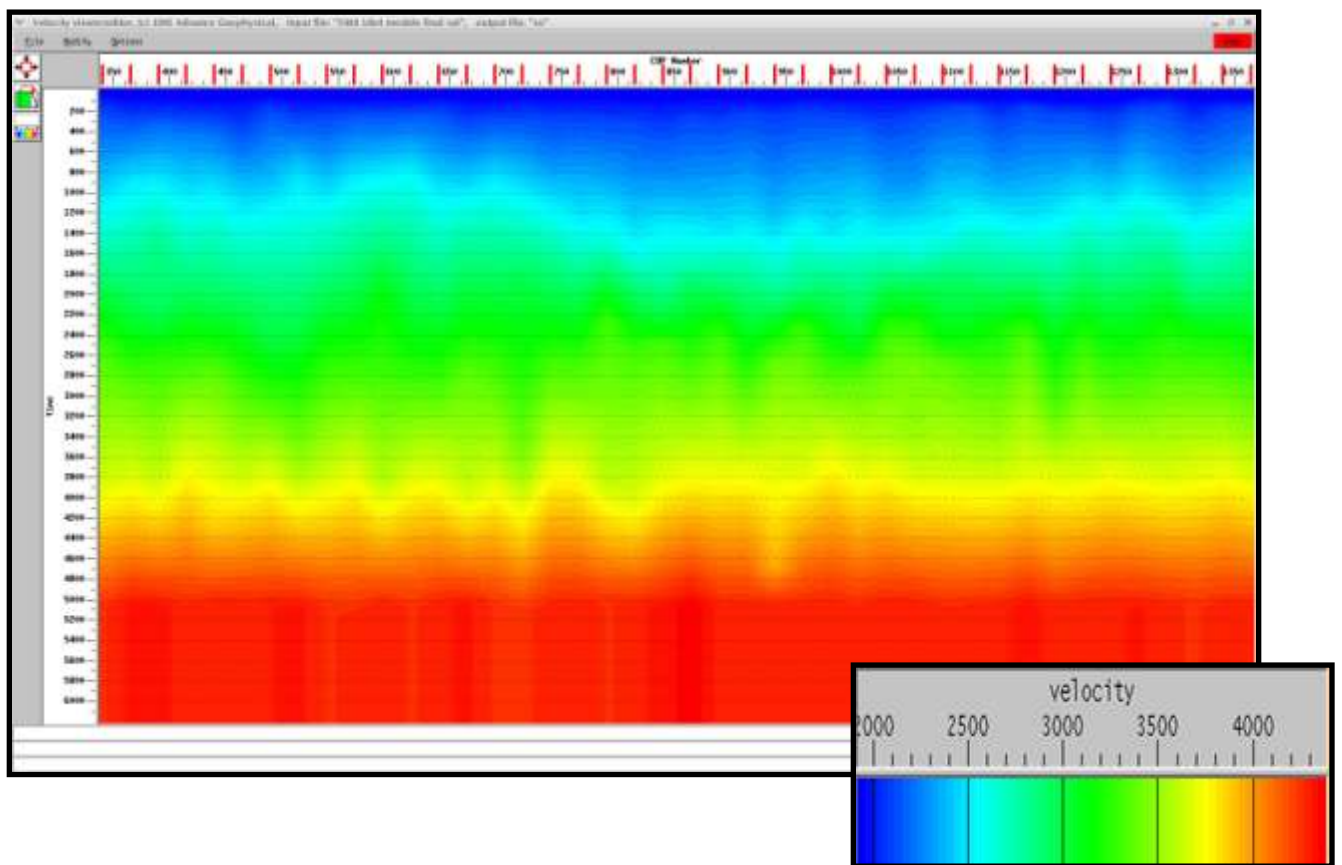


Figura 3.20 Modelo de velocidad generado para la línea 5080, la paleta de colores indica mayores velocidades (m/s) en tonalidades rojas y velocidades menores en tonalidades azules.

3.3.2e Apilamiento

El apilamiento consiste en la suma de las trazas correspondientes a un mismo punto de reflexión común, con el objetivo de generar una traza CDP final que tenga una relación señal ruido mayor, generando así una imagen preliminar del subsuelo compuesta por trazas ordenadas en CDP, *offset* cero (logrado por la corrección NMO), tiempo doble y con el modelo de velocidad aplicado (Fig. 3.21). Es importante mencionar que esta sección obtenida no es el resultado final, ya que se le deben aplicar otros procesos post-apilado, los cuales están en función de la calidad de los datos.

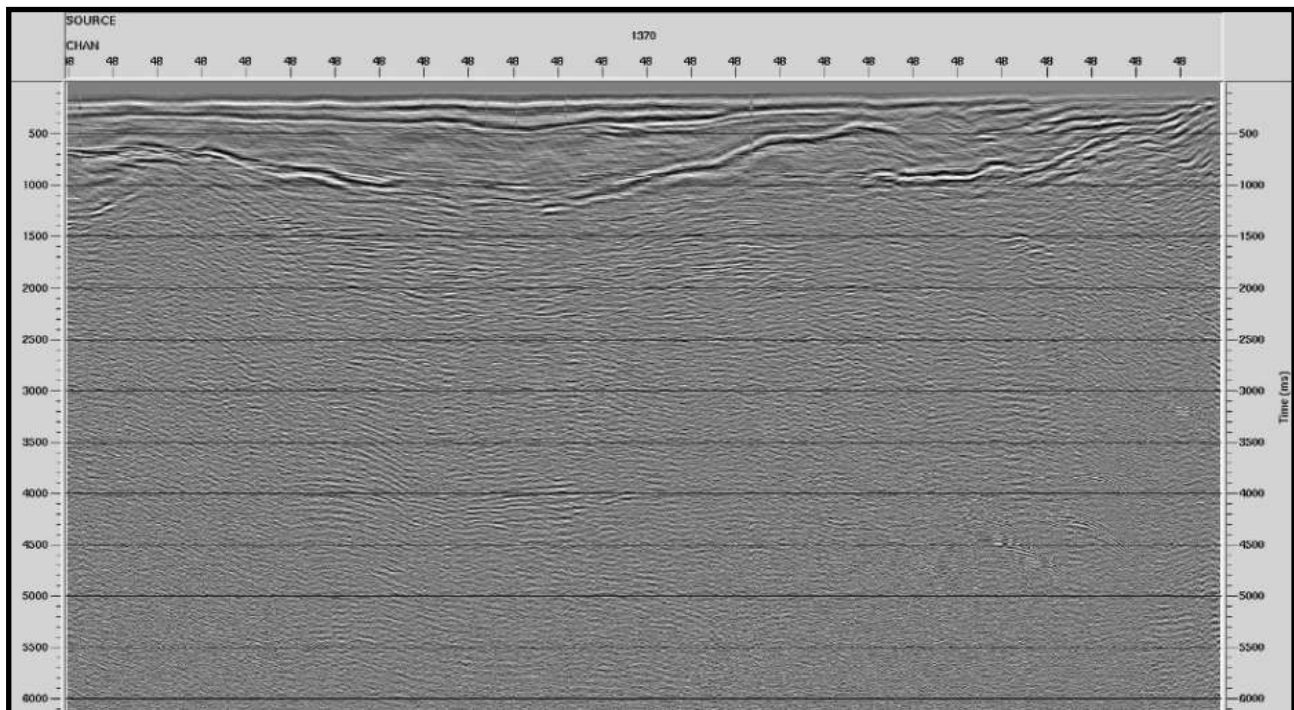


Figura 3.21 Sección apilada perteneciente a la línea 5084.

3.3.3 PROCESAMIENTO POST-APILAMIENTO

3.3.3a *Filtro variable en tiempo*

A través de esta función se puede realizar un filtrado en ventanas de tiempo, dependiendo de las características encontradas en cada ventana, pues las frecuencias tienden a cambiar y así se puede hacer una limpieza más robusta de los datos. El filtro variable en tiempo es un filtro pasa banda en el cual se pueden especificar las ventanas en tiempo y el filtro que se desea para cada una de ellas, esto con el propósito de filtrar frecuencias que representen una interferencia para distintos tiempos. Para tiempos más pequeños se usó una banda que dejara pasar frecuencias altas y eliminara bajas y viceversa para los tiempos más grandes. El filtrado para los datos de este trabajo se hizo utilizando cuatro ventanas en las cuales se determinó un gradiente de frecuencias que no fuera muy drástico, esto para que se generara una sección sísmica sin un contraste muy fuerte visualmente hablando. Para los datos de esta sísmica las frecuencias de interés están en un rango que va de 20 a 40 Hz, aunque cabe remarcar que fue necesario ampliar la banda para no perder datos de concentración de energía que mejoran la señal.

3.3.3b *Control automático de ganancia*

Es una regularización o recuperación de amplitud, la cual experimenta atenuación debida a la absorción de energía para tiempos mayores. Esta corrección se logra calculando el valor medio o promedio absoluto de la amplitud dentro de una ventana específica de tiempo, posteriormente se obtiene la relación entre el valor RMS deseado y el promedio calculado. Este escalar es asignado a la función de ganancia, la cual se aplica a cada muestra o traza.

3.3.3c *Migración*

Cuando existe un relieve brusco, se generan difracciones de la onda, generando una especie de ruido en los reflectores de la sección sísmica, estas difracciones se producen cuando la longitud de onda es mayor que las dimensiones del objeto, por lo tanto, los efectos de la difracción disminuyen hasta hacerse indetectables a medida que el tamaño del objeto aumenta comparado con la longitud de onda. Con la migración se pueden colapsar dichas difracciones y así reubicar la energía a su verdadera posición, otra de sus funciones es mejorar de una manera geométrica la resolución lateral moviendo la inclinación de los reflectores a su posición original en el subsuelo y delimitando características estructurales como planos de falla, lo que proporciona una imagen final con mayor resolución espacial de los eventos reflectivos.

La migración aplicada para el procesamiento de las líneas longitudinales utilizadas en este trabajo de tesis fue la migración *FK-Stolt* y la migración de *Kirchoff*. La migración de *Stolt* (Fig. 3.23) consiste en la transformación de los datos a un pseudo-domino de profundidad con el propósito de aproximar a una velocidad constante de la tierra, posteriormente reubica la energía en el dominio de la frecuencia-número de onda filtrando la velocidad de conversión, finalmente los datos son convertidos al dominio del tiempo otra vez. La migración de *Kirchoff* utiliza la forma integral de la ecuación de *Kirchoff*. Los mejores resultados fueron obtenidos a través de la migración de *Kirchoff* (Fig. 3.22).

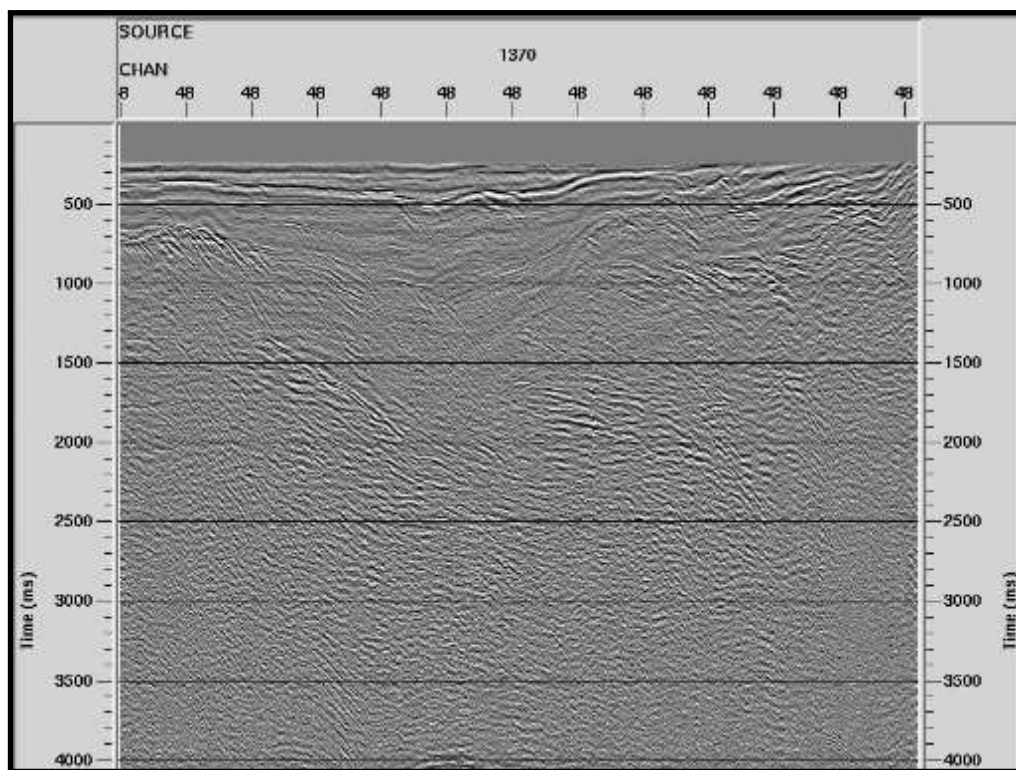


Figura 3.22 La sección sísmica apilada perteneciente a la línea 5080, contiene migración de *Kirchoff*. En esta figura no han sido aplicadas las correcciones de amplitud.

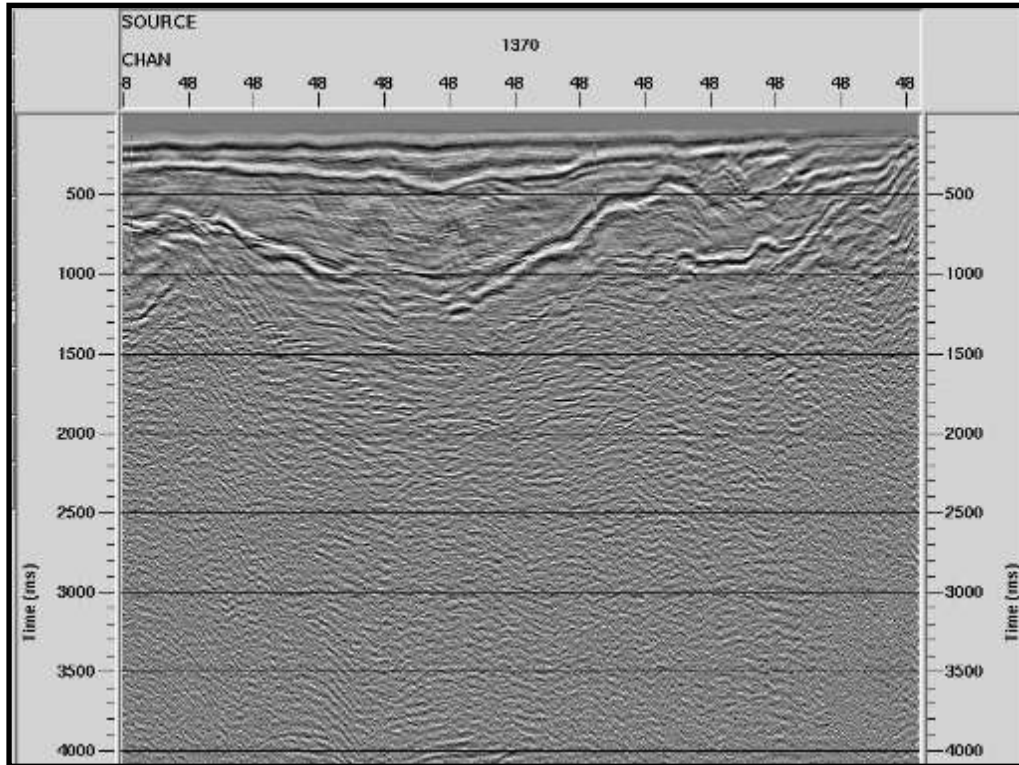


Figura 3.23 Muestra la sección sísmica apilada perteneciente a la línea 5080, la cual fue migrada utilizando *FK-Stolt* y contiene el algoritmo de Control Automático de Ganancia.

3.4 INTERPRETACIÓN

La interpretación de las secciones sísmicas procesadas tiene como propósito primordial extraer toda la información geológica posible del área de interés; es decir, la disposición de las estructuras en el subsuelo, propiedades de las rocas y fluidos presentes, así como su estratigrafía. Para realizar una interpretación exitosa es necesario tener un conocimiento previo de la zona (estilo estructural, litología, estratigrafía) para así poder inferir y sustentar los resultados obtenidos.

Para la interpretación, se asume de manera general que: a) los eventos coherentes vistos en las secciones sísmicas son coeficientes reflectivos provenientes de cada interface producto de un contraste de impedancia acústica en la tierra, b) que estos contrastes están directamente asociados con las estratificaciones o elementos estructurales que representan una estructura

geológica, c) que el detalle sísmico como la amplitud y la forma de la onda está relacionado con la estratigrafía y la naturaleza de los fluidos intersticiales en las rocas (Sheriff y Gerald, 1995).

Siguiendo estas premisas como base para la interpretación geológica y geofísica de las secciones sísmicas, se lleva a cabo la identificación de los rasgos más sobresalientes, ya sean estos de carácter estructural como fallas y pliegues o de carácter estratigráfico como: discordancias, lenticulos o volcanes, así como la determinación y seguimiento de reflectores principales que presenten una continuidad lateral.

3.4.1 ESTRATIGRAFÍA

Las rocas sedimentarias normalmente existen en capas o estratos más o menos paralelos, diferentes tipos de rocas pueden ser distinguidas por diferencias en sus características físicas (Lyell, 1837). El objeto de la estratigrafía y sedimentación concierne a las características de las rocas en un rango de 10^{-5} m (tamaño de granos) a 10^5 m (sistemas de depósito) (Liner, 2004). La mejora en la calidad de los datos sísmicos ha hecho posible la interpretación estratigráfica a través de esta metodología; sin embargo se tienen limitaciones importantes que involucran: a) resolución vertical y horizontal, b) ruido, c) variaciones en la velocidad, principalmente (Sheriff, 1980).

La desventaja de lidiar con el problema de la resolución, tanto vertical como horizontal, radica en que solo se pueden ver características en un rango de espesores determinados (algunas decenas de metros), la resolución está en función de la velocidad en cada capa y del rango de frecuencias que se maneja, esta indica el límite de separación lateral o vertical mínima que debe haber entre dos rasgos característicos para poder observar el detalle en ellos y poder reconocerlos como diferentes.

Resolución horizontal: Aunque resulta conveniente visualizar las reflexiones sísmicas como rayos emanados por un punto, las reflexiones en la realidad resultan de la interacción de un límite reflectivo y un frente de onda. El frente de onda no solo afecta a un punto, sino a una considerable área de la superficie del reflector, la reflexión resultante es producida por una zona circular de un diámetro bastante grande, a esta extensión de área reflectora se le conoce como la

zona de Fresnel y la energía proveniente de esta porción regresa al receptor con medio ciclo después del inicio de la reflexión (1/4 de la longitud de onda), y la suma constructiva de esta energía produce una reflexión (Badley,1985). Es decir, la resolución lateral se refiere a que tan cerca dos puntos reflectores pueden estar situados horizontalmente y todavía ser reconocidos como dos puntos diferentes en vez de uno; una medida de esto es a través de la zona de Fresnel; por ejemplo, si dos puntos reflectores quedan dentro de ella, son considerados indistinguibles si se observan desde la superficie de la tierra, pues la energía que regresa de este intervalo de tiempo interfiere constructivamente (Yilmaz, 2001), o si el reflector tiene un hueco (sea este por ejemplo un canal cortado en capas horizontales) más pequeño que la zona de Fresnel, la reflexión aparece como continua, aunque los cambios en la amplitud pueden ser usados como ayuda para este problema (Badley, 1985).

La zona de Fresnel es de mayor y menor tamaño para frecuencias bajas y frecuencias altas, respectivamente, por lo que obviamente la resolución horizontal decrece con la profundidad.

La magnitud de esta zona se calcula a través de la siguiente relación:

$$rf = \frac{V}{2} \sqrt{t/f} \quad (3)$$

Donde:

rf Radio de la zona de Fresnel

V Velocidad promedio

t Tiempo doble en segundos

f Frecuencia dominante en hertz

Estos efectos de difracciones ocasionados por dicha zona, son más comunes cerca de fallas o estructuras complejas, pero pueden ser colapsados al realizar la migración de los datos haciendo de esta manera que la resolución horizontal se acerque a la vertical.

Resolución vertical: Nos indica que tan delgada puede ser una capa o estrato para que no haya interferencia entre las reflexiones generadas por contrastes de impedancia acústica en su base y tope y que ya no se puedan resolver (Badley, 1985).

Para dos reflexiones, situadas en los límites superior e inferior de una capa delgada, es el límite de que tan cerca pueden estar y todavía ser separables (Yilmaz, 2001). El criterio para determinar la resolución vertical es entonces la longitud de onda dominante dada por la siguiente expresión:

$$\lambda = v/f \quad (4)$$

Donde:

λ Longitud de onda

v Velocidad

f Frecuencia dominante

El aumento de la velocidad de propagación y absorción de altas frecuencias con la profundidad produce como resultado una disminución en la resolución (debido al aumento de la longitud de onda λ con la profundidad), un umbral aceptable de longitud de onda dominante para la resolución vertical es $1/4 \lambda$. La tabla 3.2 muestra la resolución vertical de los datos sísmicos utilizados en este trabajo. La resolución vertical está definida por la siguiente fórmula:

$$Rv = \frac{v}{N * \Delta f} \quad (5)$$

Donde:

$N = 4$ para datos de alta calidad y 2 para ruidosos

v = Velocidad de intervalo

$\Delta f = f_{max} - f_{min}$ = Rango de frecuencias

Tabla 3.2 Valores de resolución vertical para diferentes velocidades y frecuencias, nótese que la resolución está en función de los valores de la longitud de onda.

V (m/s)	F (hz)	$Rv = \frac{v}{4f} = \frac{\lambda}{4}$ (m)
2000	50	10
3000	40	19
4000	30	33
5000	20	62.5

Los patrones de terminaciones de capas establecidos por la sismo-estratigrafía ayudan a evidenciar características de carácter estratigráfico a gran escala. Dichas terminaciones se ilustran en la Figura 3.24.

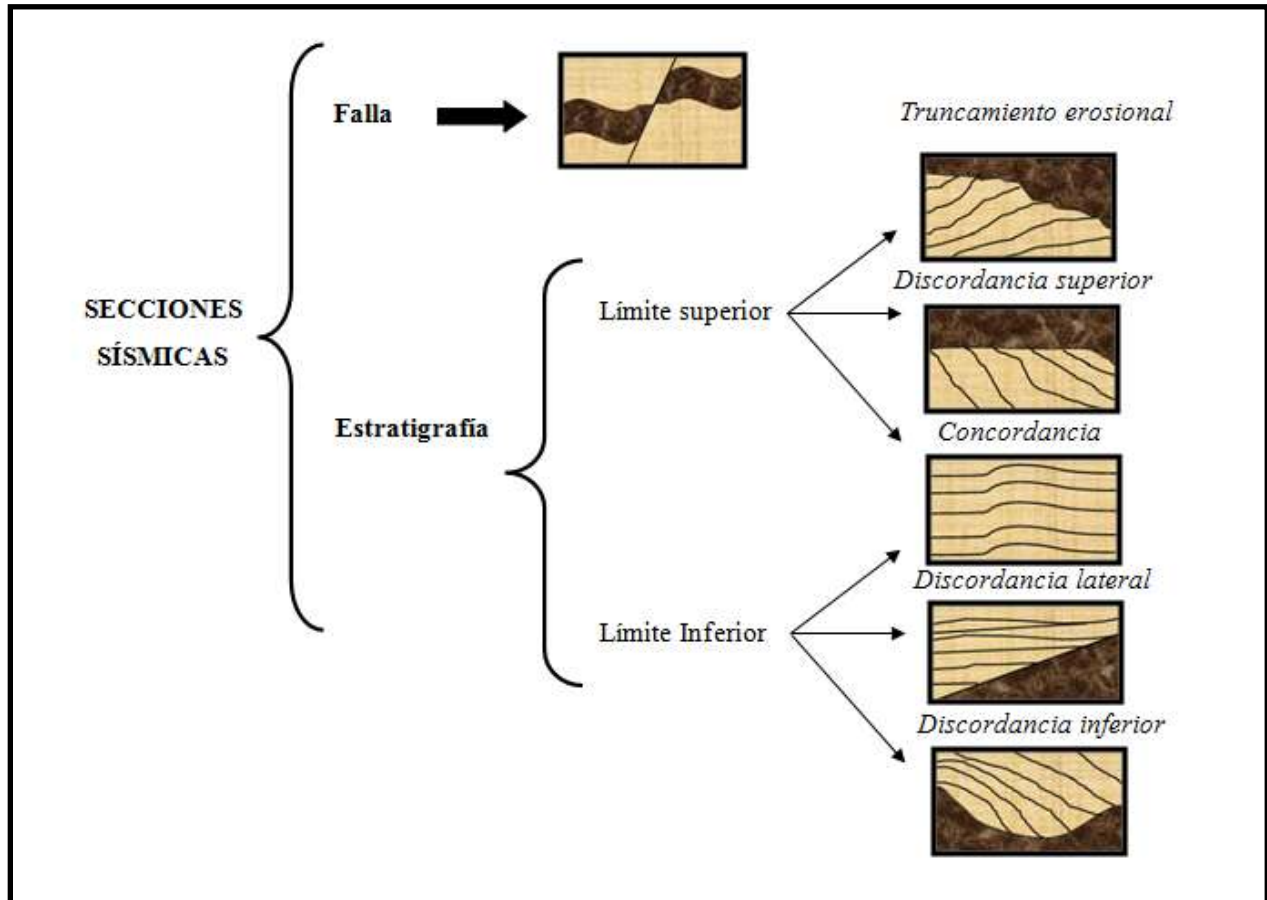


Figura 3.24 Clasificación de terminación de capas en las secciones sísmicas. Las terminaciones estratigráficas son los componentes fundamentales de la sísmica estratigráfica 2D (Modificada de Liner, 2004).

3.4.2 ESTRUCTURA

Cuando las rocas son sometidas a un esfuerzo, estas pueden afallarse, plegarse o fluir dependiendo de la magnitud y duración de los esfuerzos, la resistencia de las rocas y la naturaleza de rocas adyacentes. (Sheriff y Geldart, 1995). Una falla es una superficie de fractura o zona a lo largo de la cual un lado se ha movido relativamente respecto a otro (debido a la pérdida de cohesión), en una dirección paralela a dicha superficie. La localización y geometría de una falla es inferida en las secciones sísmicas a través de terminaciones de los reflectores,

difracciones, cambios de buzamiento, etc. (Badley, 1947). Cuando los frentes de onda llegan al plano de falla los eventos reflectivos terminan abruptamente y se concentran de nuevo en posiciones desplazadas del otro lado de la falla, por lo que hay un cambio tal en las reflexiones que hace posible distinguir las dos porciones de los lados opuestos de la falla y así determinar su caída en las secciones sísmicas (Fig. 3.25).

Las fallas pueden identificarse en una sección o perfil sísmico a través de las siguientes maneras:

1. Terminaciones de alineaciones de capas (Fig. 3.26).
2. Cambios abruptos en la pendiente.
3. Cambio en la amplitud o sombra de la falla.
4. El plano de reflexión de falla.

Las fallas usualmente tienen un efecto degradante en la calidad de la imagen sísmica. Esto puede deberse a las difracciones de pequeños bloques afallados o dispersión de la energía en las zonas de falla (Liner, 2004).

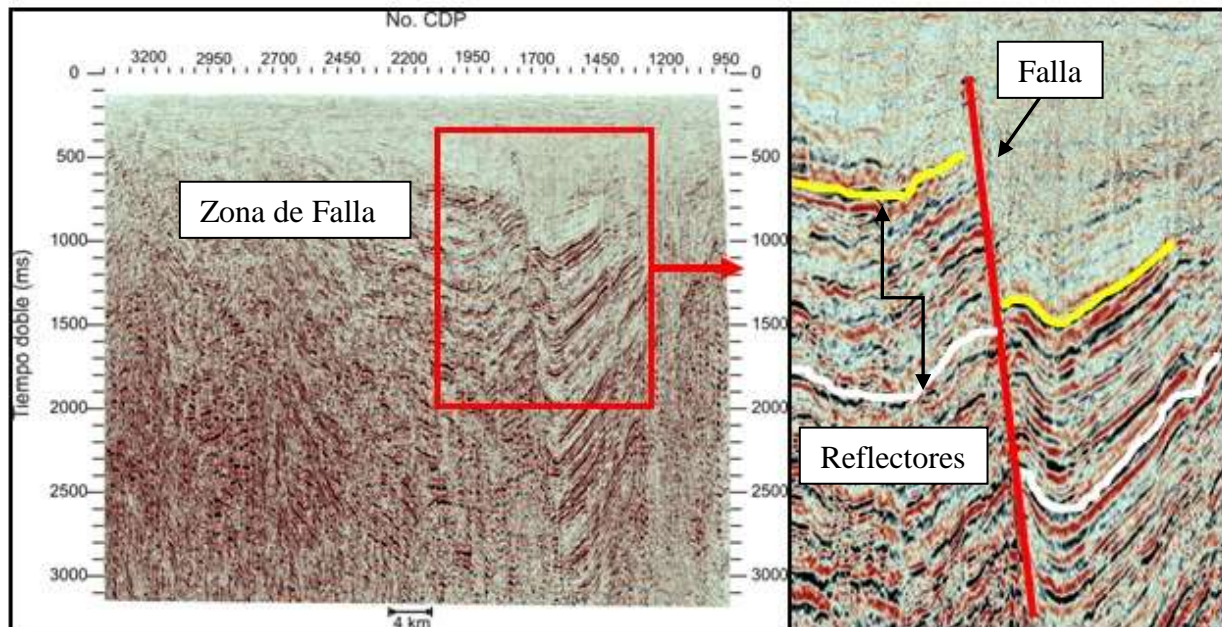


Figura 3.25 El desplazamiento en los reflectores indica la presencia de una falla, nótese que el paquete desplazado tiene amplitudes que se correlacionan muy bien con las de su bloque de piso y el espesor se mantiene muy similar.

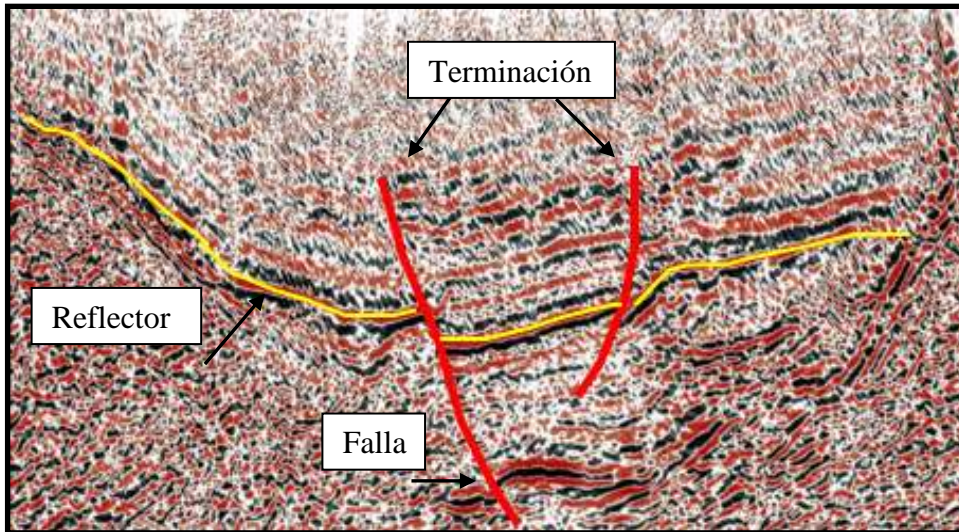


Figura 3.26 Terminación de alineamiento de capa en una sección sísmica, la continuidad lateral del reflector termina en el plano de falla y continúa del otro lado, evidenciando la presencia de esta.

Tomando en cuenta estas observaciones, se han marcado las zonas de falla encontradas en los perfiles sísmicos (aquellas que la resolución de la sísmica nos permitió determinar), para después correlacionarlas en diferentes líneas y así caracterizar las principales fallas dentro de la zona de estudio y los patrones estructurales que predominan. En el siguiente capítulo se abordan extensivamente las disposiciones estructurales y se presentan los resultados del análisis interpretativo de las líneas pertenecientes al Noroeste del Golfo de California.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1 INTRODUCCIÓN

La interpretación de las estructuras geológicas del subsuelo no es una tarea fácil, los errores o cambios de ideas son comunes durante el proceso interpretativo, lo que hace que cada intérprete desarrolle su propio estilo y técnica basándose en su conocimiento geofísico (sísmico-geológico). Sin embargo, la incertidumbre que genera el método sísmico es menor que en la mayoría de otros datos geofísicos. Para disminuir la ambigüedad en los resultados se recomienda una integración tanto de métodos así como de la información disponible dentro del área de estudio.

En este capítulo se hace la descripción e interpretación de las secciones sísmicas obtenidas a partir del procesamiento de los datos marinos 2D multicanal, propiedad de PEMEX, los cuales fueron colectados entre los años 1978-1980, como parte del prospecto San Felipe-Tiburón. También se muestra la densidad, tamaño relativo, orientación y características generales de las fallas encontradas, así como una propuesta para la configuración del basamento acústico, el fondo marino y cuatro sismo-reflectores que representan las cimas del Holoceno, Pleistoceno, Plioceno y Mioceno Tardío.

Para llevar a cabo dicha tarea se procesaron cuatro líneas sísmicas 2D en el noroeste del Golfo de California, siendo estas, las líneas: 5080, 5084, 5072 y 5076. Además, para complementar el seguimiento e interpretación de las estructuras, tanto de fallas como de horizontes, se utilizó como apoyo ocho líneas transversales: 5067, 5075, 5079, 5064, 5089, 5093, 5097, 5101, una paralela a la costa de Baja California: 5064 y dos con orientación E-W 5451 y 5471, estas secciones fueron procesadas previamente en el CICESE por: Aragón-Arreola (2007) y González-Escobar (2006). Las líneas paralelas a la costa de Baja California presentan una dirección NW-SE y las líneas transversales tienen una orientación SW-NE (Fig. 4.1).

Como instrumento de trabajo se utilizó el *Software* Seisworks[®] perteneciente a la plataforma Landmark[™], el cual representa una gran ayuda visual para los intérpretes y una herramienta que mejora la imagen final, a través de la aplicación de parámetros y algoritmos pertenecientes a una etapa de procesamiento final post-apilamiento dentro del mismo *Software* de interpretación. La familia de procesos post-apilamiento que se utilizó incluye:

- Control automático de ganancia
- Filtro *Ormsby*
- Deconvolución
- Filtro de Coherencia
- Filtro de abanico F-K

La densidad de fallas dentro de las secciones analizadas es alta, aproximadamente se encontraron 4 fallas/km, pero solamente se interpretaron aquellas que fueran más regionales y de mayor tamaño, lo que disminuyó su densidad a 2 fallas/5km. De todas las fallas encontradas, solamente se realizó el seguimiento de siete a lo largo de diferentes secciones, determinándose su dirección preferencial, también se hizo una división de la sección sísmica en un conjunto de depósitos limitados por superficies de discontinuidad, estos horizontes sismo-estratigráficos representan límites de secuencias e incluyen grupos de reflexiones más o menos concordantes y de características similares en cuanto a espesor, amplitud, continuidad lateral, etc., el seguimiento de los horizontes está apoyado con la correlación de datos del pozo W2.

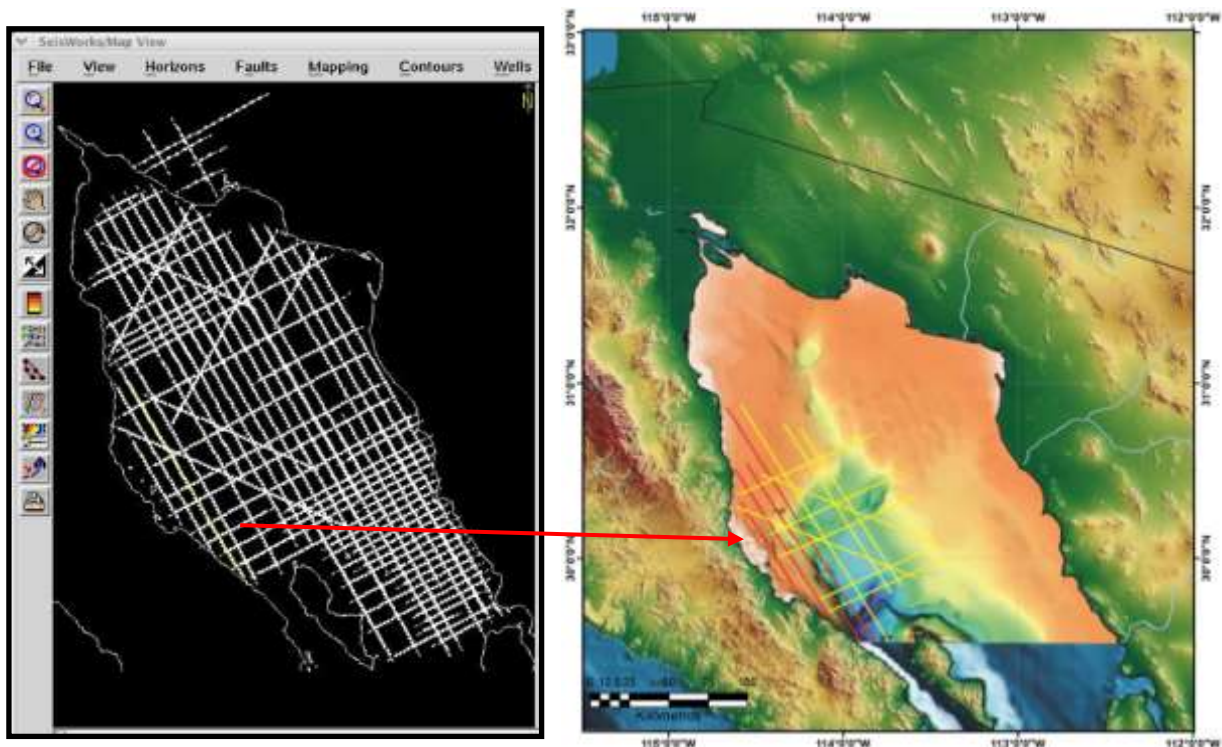


Figura 4.1 De derecha a izquierda, acercándose a la costa de Baja California se muestran las líneas longitudinales procesadas (líneas rojas): 5072, 5076, 5080, 5084, así como la malla sísmica transversal 2D utilizada como apoyo (líneas amarillas).

4.2 SECCIONES SÍSMICAS PROCESADAS

Después de la aplicación de un procesado final post-apilamiento, realizado en Seisworks[®], se obtuvieron los perfiles longitudinales mostrados en las Figuras: 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5. A partir de estas líneas comenzó la observación y determinación de las estructuras.

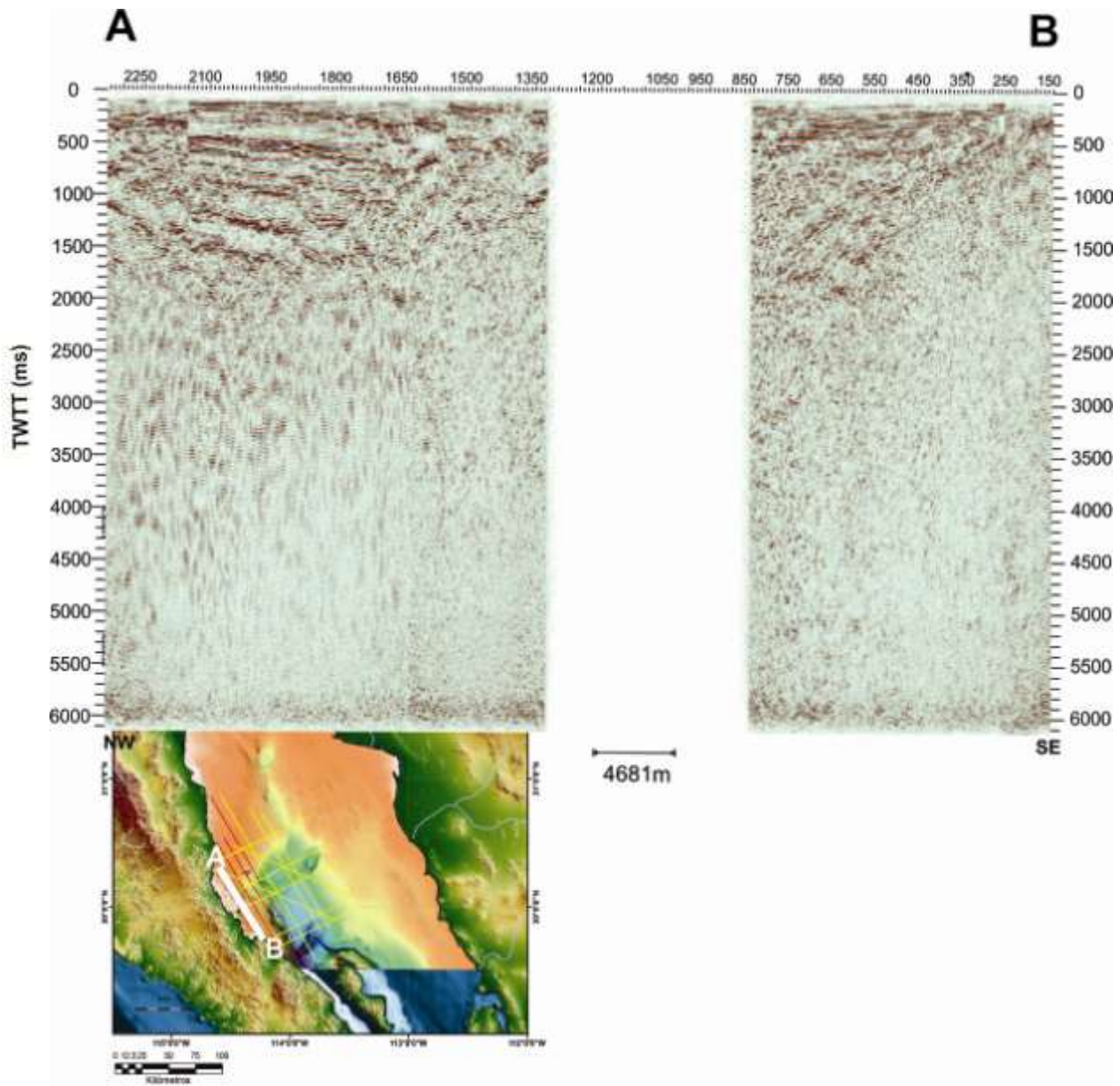


Figura 4.2 Perfil A-B de la línea 5084 NW-SE (línea blanca), después de proceso post-apilamiento. En esta línea en particular no se tuvo información disponible en el segmento que va del CDP 800-1300, lo cual es visible en el espacio vacío de la parte media de la sección.

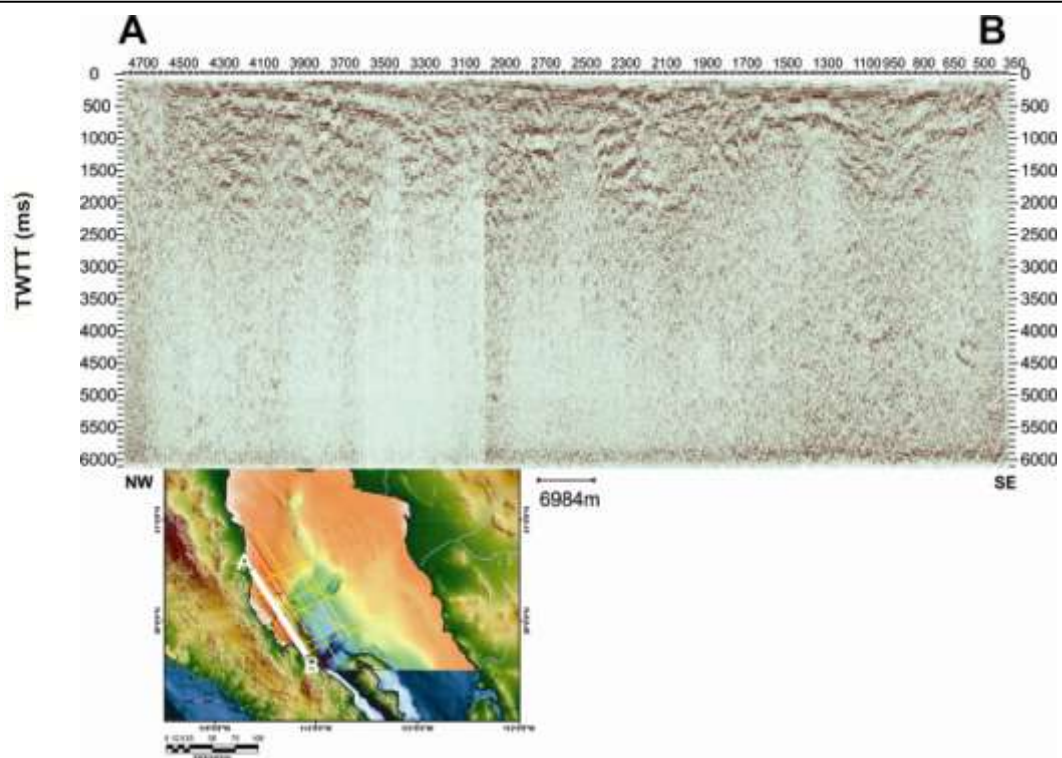


Figura 4.3 Perfil A-B de la línea 5080 NW-SE (línea blanca), después de proceso post-apilamiento.

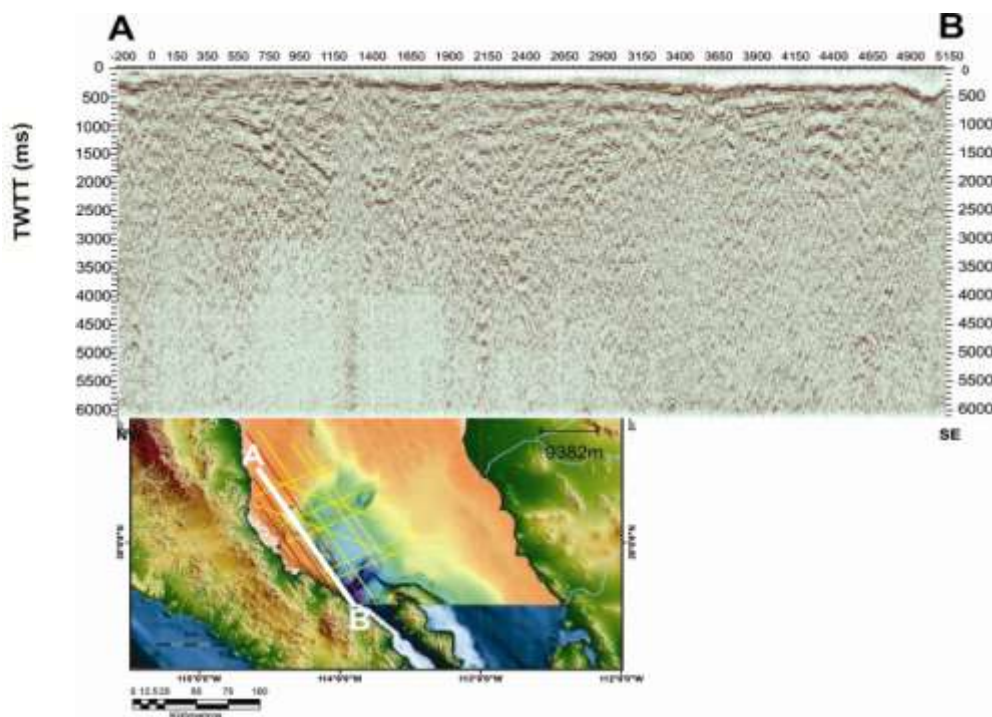


Figura 4.4 Perfil A-B de la línea 5076 NW-SW (línea blanca) con proceso post-apilamiento. El fondo marino se profundiza hacia el sur (CDP 4800-5150), cerca de los límites de la Cuenca Delfín Inferior.

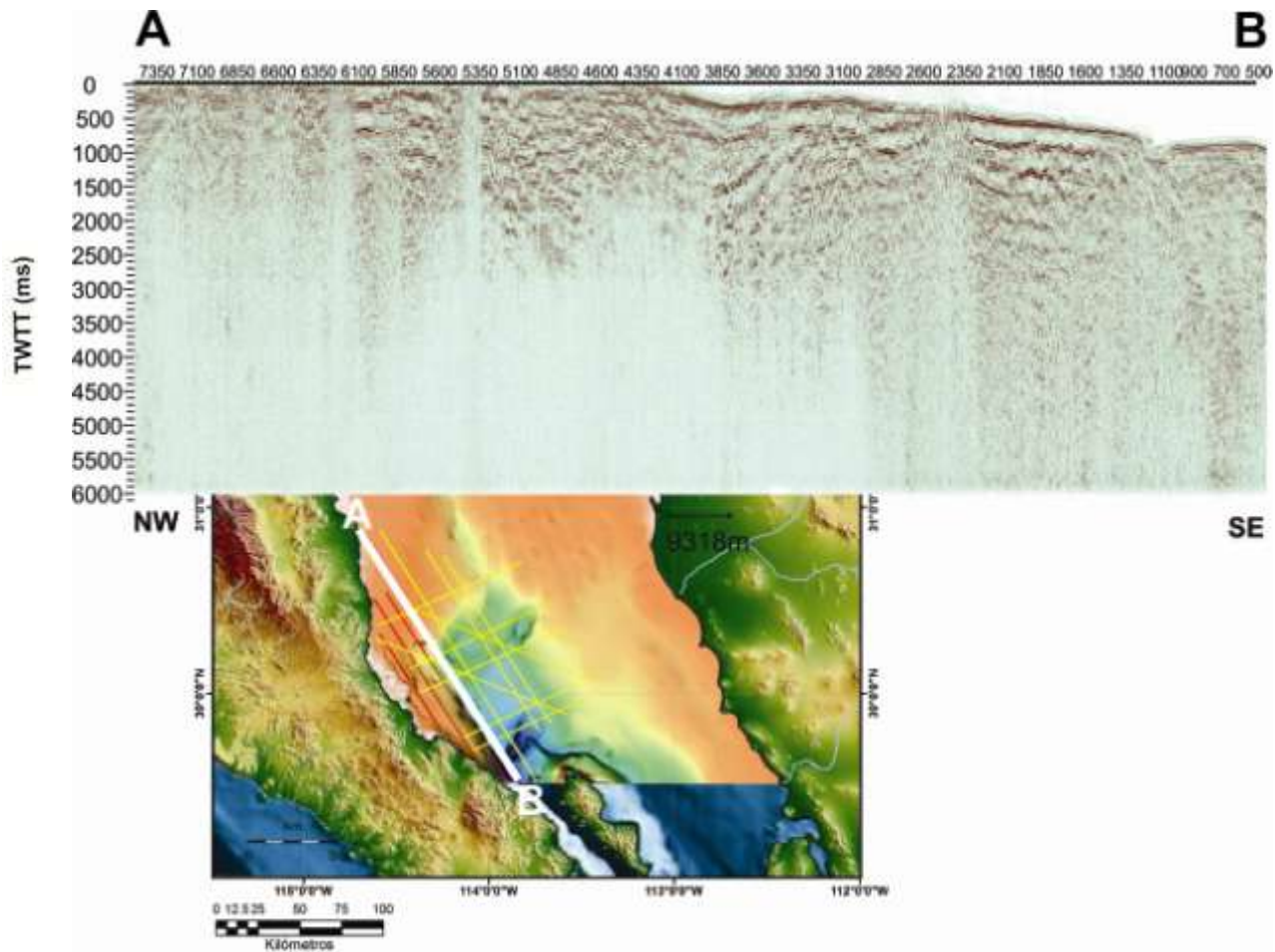


Figura 4.5 Perfil A-B de la línea 5072 NW-SE (línea blanca), después de proceso Post-apilamiento. De igual manera que en la línea 5076, la parte NW es mas somera que la parte SE. El mapa batimétrico muestra las zonas más profundas (tonos en color azul) y someras (tonalidades anaranjadas) dentro del área de estudio.

4.3 ANÁLISIS DE SECCIONES SÍSMICAS

El análisis de las secciones sísmicas ayudó a determinar la configuración general en el patrón de fallas dominante, profundidad del basamento acústico, configuración del fondo oceánico y el comportamiento de los paquetes sedimentarios (caracterizados por límites de secuencias) como respuesta a su interacción con las fallas presentes en el área.

A continuación, se presenta la descripción de las características generales de las secciones sísmicas procesadas.

4.3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS SECCIONES NW-SE

Las cuatro líneas sísmicas longitudinales procesadas para este trabajo de tesis, son paralelas a la costa de Baja California y tienen una dirección NW-SE, su extensión en kilómetros tiene la configuración mostrada en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Muestra la extensión en kilómetros de las cuatro líneas sísmicas marinas 2D Procesadas para este trabajo.

Línea	Longitud (Km)
5084	67
5080	118
5076	156
5072	173

Estas líneas tienen una separación entre ellas de aproximadamente 5km, estos perfiles muestran una tendencia a profundizar mientras se aproximan al sur; es decir, el fondo marino pasa de estar a 100 ms hasta los 800 ms o más, lo que se ve representado también en el mapa batimétrico (Fig. 4.32).

Aunque las líneas tienen una longitud de registro de 6,144 ms, la resolución vertical para estos perfiles, es mejor en la zona que está dentro del rango de los 200-3,000 ms; tomando en cuenta que los valores en milisegundos representan un tiempo doble de viaje, esto sería equivalente a 200-3,000 km aproximadamente, por debajo de estos valores se encuentra el basamento acústico (parte inferior de un perfil sísmico en donde ya no se ven reflectores claramente), donde la velocidad de propagación de onda aumenta y las amplitudes decaen debido a un cambio en las propiedades del subsuelo, absorción de la energía, naturaleza misma de la roca, etc. en este caso causado por un cambio de capas sedimentarias a basamento cristalino.

Las líneas están migradas en tiempo a través del algoritmo de *Kirchhoff* (ya que con este se obtuvieron mejores imágenes que con la migración *FK-Stolt*), el cual está basado en el principio de *Huygens*, la migración y colapso de las difracciones se logra a través de la representación matemática llamada integral de difracción de *Kirchhoff*, ya que las ondas esféricas emitidas por una fuente interactuarán con el medio de acuerdo a esta expresión matemática; gracias a la utilización de este algoritmo, la aparición de difracciones en las

secciones presentadas es casi nula, y la presencia de ruido coherente representado por múltiples de periodo largo es mínima, pero estos últimos si llegan a aparecer, como por ejemplo en la línea 5072 (Fig. 4.12), donde hay un múltiple fuerte del CDP 500-1,550, en un tiempo de 2,000 ms, dicho múltiple fue atenuado por el filtro F-K durante la etapa del procesado, pero no pudo ser eliminado completamente.

La forma en la que se desplegaron las secciones se conoce como densidad variable, permitiendo así una mejor visualización de las estructuras. Se utilizó una paleta de colores azul-rojo que representa la polaridad de la ondícula; la polaridad en las secciones nos indica los cambios en los coeficientes de reflexión, esto es, variaciones en la litología definidas por contrastes de impedancia acústica, la polaridad positiva está representada por el color azul y la polaridad negativa por el rojo, aunque este parámetro puede modificarse de acuerdo a lo que establezca el interprete.

Las secciones tienden a profundizar en dirección NW-SE al acercarse al depocentro de la cuenca Delfín Inferior (2,500 ms), lo que es más visible en la línea 5072(Fig. 4.5), en la cual aumenta gradualmente la profundidad del lecho marino, de estar a 100 ms del CDP 7,350-4,150 a 500 ms del CDP 4,150-2,350 y finalmente a 1,000 ms del CDP 2,150-500, además presenta una depresión importante del CDP 1150-950 de 1500 ms (Fig. 4.5).

4.3.2 FALLAS

Se identificaron y trazaron fallas en las secciones sísmicas NW-SE, en general se interpretaron alrededor de 2/km, de las cuales se correlacionaron siete principales a lo largo de la malla sísmica, utilizando como apoyo las secciones transversales SW-NE y E-W para poder seguirlas correctamente, posteriormente se hizo una descripción de las principales características de dichas fallas y se definió el patrón estructural que predomina en el área. Las fallas interpretadas y correlacionadas son: Falla Volcanes, Falla Volcanes Norte 1, Falla Volcanes Norte 2, Falla Volcanes Sur, Falla Delfín Superior Central, Falla Delfín Inferior Este, Falla Delfín Inferior Oeste; estas fallas son mostradas en las Figuras 4.7 y 4.8.

Las fallas se correlacionan a través de características o similitudes que sean reconocibles como: su morfología, magnitud o echado aparente, pero en algunos casos es difícil hacer la correlación de las estructuras, sobre todo cuando la distancia entre líneas aumenta y las fallas no tienen un carácter especial que las distinga, siendo este uno de los grandes dilemas a los que se

enfrentan los intérpretes durante la correlación estructural. En la Figura 4.6 se muestra la ejemplificación de este problema, el cual ocurre durante la intersección de fallas con líneas sísmicas no muy cercanas entre sí; la figura también muestra las diferentes perspectivas que se pueden seguir para una sola estructura.

El *Software* de interpretación Seisworks® cuenta con una herramienta que despliega las secciones en zig-zag como se muestra desde la Figura 4.14 hasta a Figura 4.19, ayudando así a visualizar de manera más efectiva el comportamiento de las fallas de interés y de los rasgos estratigráficos presentes en las líneas analizadas, también se recomienda tomar como referencia la tendencia regional o dominante de las fallas en el sector de estudio.

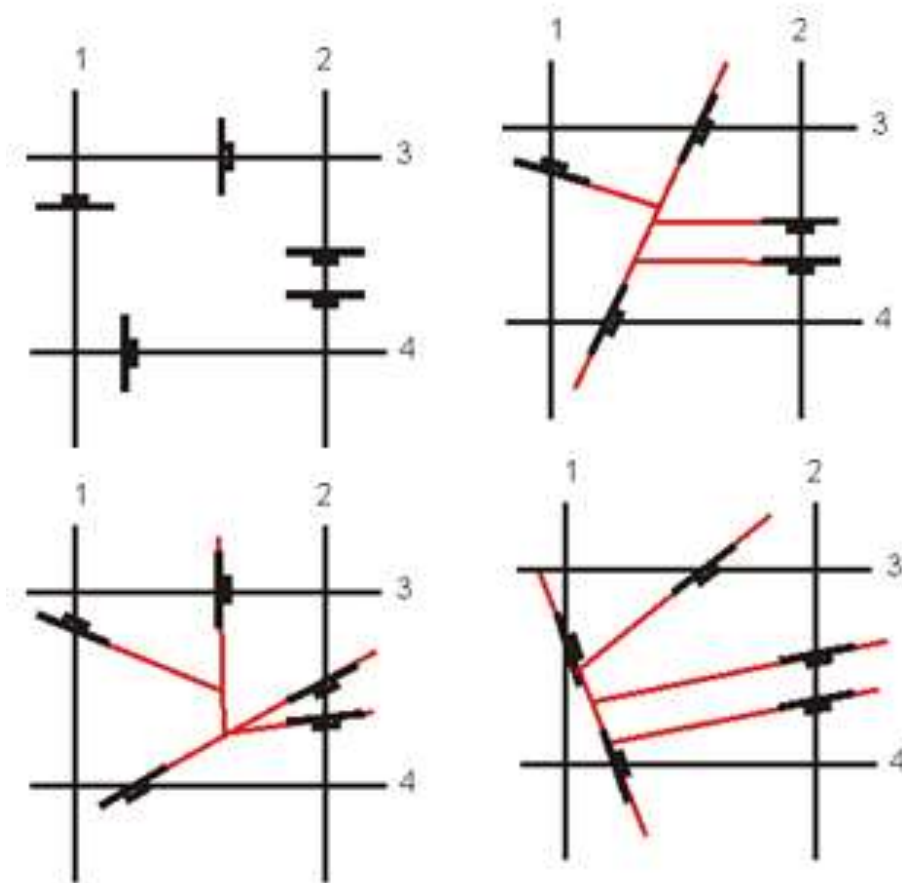


Figura 4.6 Tres diferentes perspectivas para la trayectoria de las fallas a partir de los rasgos observados en las líneas sísmicas.

La Figura 4.9 presenta la sección 5084, en la cual los rasgos estructurales y simoestratigráficos interpretados muestran una configuración característica para zonas de transtensión; es decir, el patrón de fallas está representado por fallas normales casi verticales y semiparalelas entre ellas,

buzando hacia el SE en la porción NW y al NW en la porción SE, dichas fallas comienzan a los 200 ms e incluso menos, la presencia de estas estructuras en regiones someras o su corte en superficie, es un indicador relativo de que la zona es activa tectónicamente hablando, ya que los sedimentos han sido recientemente cortados. En esta sección también se delinearon 4 horizontes sismoestratigráficos principales, el primero perteneciente a depósitos del Holoceno que va de los 200-300 ms, el segundo representa el Pleistoceno en un rango de 300-500 ms, el tercero corresponde al Plioceno de los 800-1,100 ms y el cuarto al Mioceno Tardío de los 1,100-1,800 ms. Estas variaciones en un mismo reflector; es decir, el cambio de su posición en milisegundos dentro de las secciones sísmicas, es ocasionado por el traslado de los paquetes sedimentarios debido a efectos e influencia de las fallas. El basamento acústico para esta línea se posicionó en un rango de 2,000-3,000ms (los reflectores pierden coherencia y continuidad lateral a partir de los 3000 ms) y el fondo marino a 100 ms. La línea no presenta secuencia para el Mioceno medio, así como tampoco la información del pozo W2, con el cual se ajustaron los horizontes, es posible que el paquete sedimentario correspondiente a esta edad, haya sido depositado y posteriormente levantado por el basamento, originando su erosión y desaparición para esta zona.

La línea 5080 (Fig. 4.10) presenta una densidad de fallas de aproximadamente 1/km, se comportan de la misma manera que en la línea 5084, pero presentan mayor longitud, en la parte NW tienen caída hacia el E y las del SE son casi verticales o muestran una ligera caída hacia el W. También se delinearon los cuatro horizontes principales, las cimas de estas secuencias se siguieron por toda la línea, la configuración de las fallas hunde a las secuencias hacia la parte central, el fondo marino varía en un rango de 50-100 ms de norte a sur respectivamente, y el basamento acústico se determinó en un rango de 2,500 ms. Las secuencias sedimentarias tienden a converger hacia el centro alrededor del CDP 2,700, las fallas son normales con caídas E y W, lo que hace que haya un desplazamiento de los horizontes o paquetes por varias decenas de metros. Del CDP 1,400-650 se encuentra una depresión que coincide con las regiones profundas del mapa batimétrico mostrado en la Figura 4.10, esta característica estructural está delimitada en sus extremos este y oeste por fallas normales que caen en sentido contrario; es decir; la que se ubica en la región Este tiene un echado aparente hacia el W y la que se localiza en la parte oeste cae hacia el E, este comportamiento es común en estas zonas, donde la morfología regional de las fallas obedece a un patrón de fallamiento normal, pero que a su vez genera fallas antitéticas (que para este caso también son fallas normales, solo que tienen un echado contrario al de la

tendencia regional), estas dos fallas empiezan a los 500 ms y terminan en 2500 ms aproximadamente. Este conjunto de estructuras genera un hundimiento de 300 ms en el horizonte del Plioceno. La línea pierde coherencia en los reflectores a los 2800 ms donde se estima que esta el basamento acústico. Presenta estructuras en forma de flor negativa, características de ambientes de extensión, las fallas convergen en profundidad, por lo que se dice que la zona interior se está extendiendo y además está siendo sometida a hundimiento, producto de una compensación volumétrica.

La línea 5076 (Fig. 4.11) tiene una longitud de 156 km, presenta 3 rasgos que se interpretaron como flujos hidrotermales; el primero ubicado del CDP 1,100-1,300, el segundo del CDP 1,500-1,600, el tercero del CDP 1,800-2,000 y finalmente, uno del CDP 4,000-4,200, todos estos cortan verticalmente a las secuencias sedimentarias y por consecuencia están limitados por fallas normales semiparalelas en sus extremos, estos flujos hidrotermales se identifican por una pérdida de coherencia, continuidad lateral y amplitud en los sismo-reflectores así como un levantamiento mínimo pero visible en la secuencia del Pleistoceno. Los flujos hidrotermales o “chimeneas” hipogénicas, son ventilas a través de las cuales hay circulación de agua caliente, ligadas a las últimas manifestaciones de una erupción volcánica o como producto de la cristalización de magmas emplazados a pocos km en profundidad y las surgencias que eventualmente pueden derivarse de ellos. Estos flujos son por lo general verticales o inclinados, están asociados a los movimientos de extensión o transtención y a la migración de flujos de calor que estos movimientos generan a través de las fallas o fracturas. En este caso posiblemente se deba a la cercanía de las líneas con los centros de dispersión de piso oceánico de las Cuencas Delfín.

La densidad de fallas es de 3/6km, las estructuras del NW tienen un echado al E y las del SW caen hacia el W, son de ángulo moderado, casi verticales y semiparalelas entre ellas, todas tienden a converger hacia la parte central y acomodan subsidencia en esta área, excepto por las fallas que delimitan a las chimeneas las cuales tienen un comportamiento que tiende a levantar la secuencia. La falla Volcanes (en color rosa) intercepta 2 veces con la línea, en el CDP 3,400 y el CDP 3,700, lo que se visualiza en el mapa de la Figura 4.7, esta doble intersección se refleja en la sección con una geometría parecida a la de un *graben* (Fig.4.1).

La línea 5072 (Fig. 4.12), tiene una longitud de 173 km, también presenta flujos hidrotermales en el CDP 5,450-5,350 y en el CDP 2,450-2,350, la densidad de fallas es de 3/7km, las fallas tienen un carácter semiparalelo entre ellas y son casi verticales, las del sector NW desde el CDP 7,350 tienen un echado hacia el este, las del sector SE empiezan en el CDP 500 y se comportan de manera contraria buzando hacia el oeste, lo que hace que las secuencias converjan en el CDP 3,950, en donde se localizan cuatro de las fallas interpretadas y correlacionadas, siendo estas: la falla Volcanes (rosa), Falla Volcanes Norte (anaranjada), Delfín Superior Central (azul) y Volcanes Sur (verde); hacia el SE de la sección del CDP 1,200-950, se encuentra una depresión prominente perteneciente al área de la cuenca Delfín Inferior, este hundimiento de aproximadamente 12 km, está limitado en sus extremos por las fallas que se interpretaron y correlacionaron como: Falla Delfín Inferior Oeste (echado aparente al este) y Falla Delfín Inferior Este (echado aparente al oeste), que delimitan a la Cuenca Delfín Inferior. Las fallas normales que aparecen en esta sección y la generación de sus antitéticas (fallas y estratos inclinándose hacia direcciones opuestas a la tendencia regional), son indicadores característicos de zonas que fueron o están siendo sometidas a esfuerzos transtensivos.

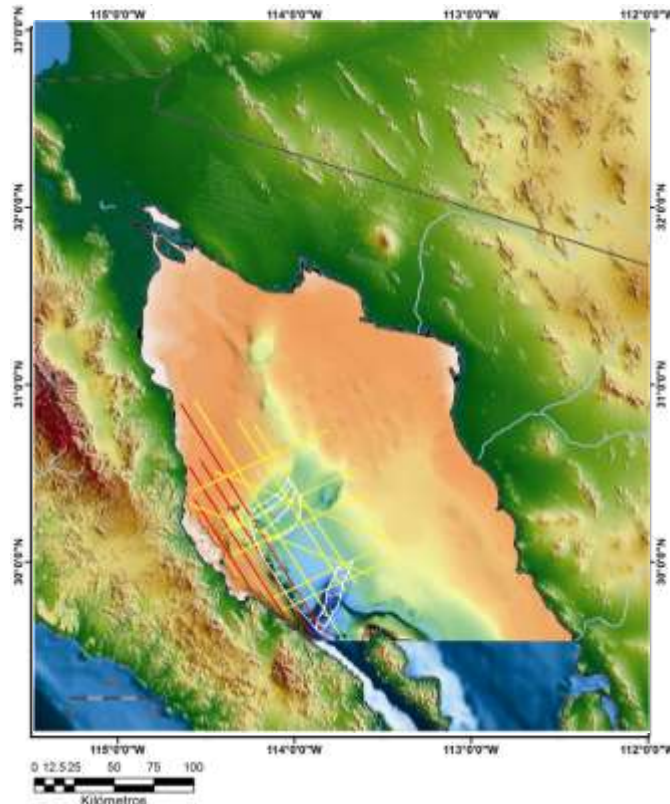


Figura 4.7 Distribución de las estructuras correlacionadas a lo largo de las secciones sísmicas en color blanco y la dirección de su echado aparente.

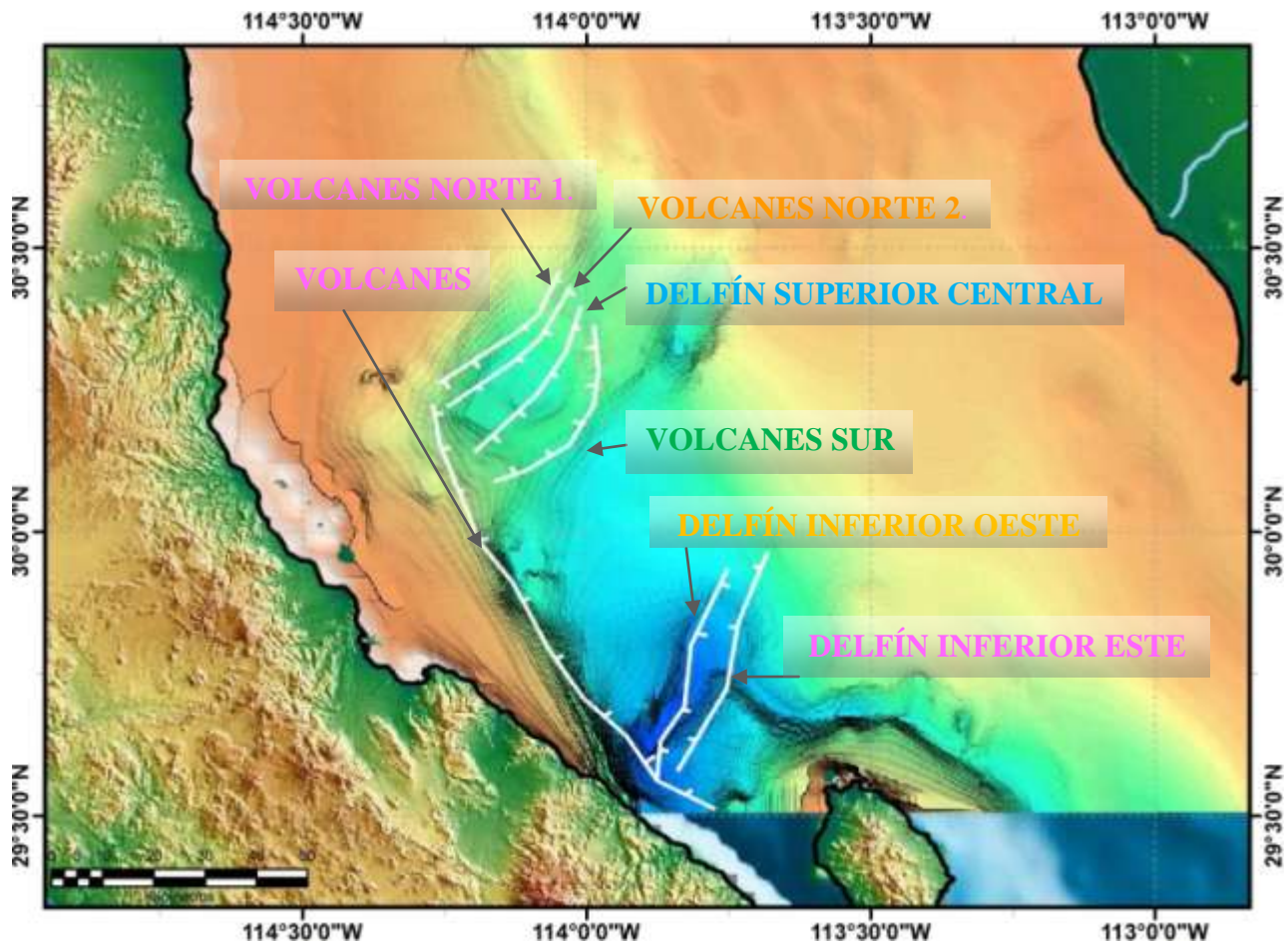


Figura 4.8 Muestra las fallas correlacionadas para este trabajo: 1) Falla Volcanes a partir de la cual se genera un gran número de ramificaciones de fallas, ya que funciona como una estructura de *horse tail splay* “cola de caballo”. Persuad *et al.*, (2003) denomina a Falla Canal de Ballenas como la continuación sur de la falla Volcanes. La Falla Volcanes, está caracterizada por su oblicuidad, echado hacia el este y una longitud grande, 2) Falla Volcanes Norte1 y 2, con orientación al este, derivadas de la Falla maestra Volcanes (así como todas las demás en la figura), 3) Falla Volcanes Sur con echado al oeste, 4) Falla Delfín Superior Central, la cual pasa en medio de la Cuenca Delfín Superior y tiene una caída de los estratos hacia el este, 5) Falla Delfín Inferior Oeste, con un echado aparente hacia el este, 6) Falla Delfín Inferior Este, con echado al oeste. Los colores que muestran los nombres de las fallas son con los que estas aparecen en las secciones sísmicas utilizadas.

Se interpreta aquí que la Falla Volcanes forma parte del límite entre las placas Norteamérica y Pacífico, y se considera como la falla actualmente dominante, dicha estructura normal-oblicua corre NNW-SSE a lo largo de la costa peninsular y acomoda deformación en los paquetes sedimentarios, genera ramificaciones de fallas a lo largo de su longitud, funcionando como una estructura de *horse tail splay* que delimita a las cuencas Delfin en su parte oeste.

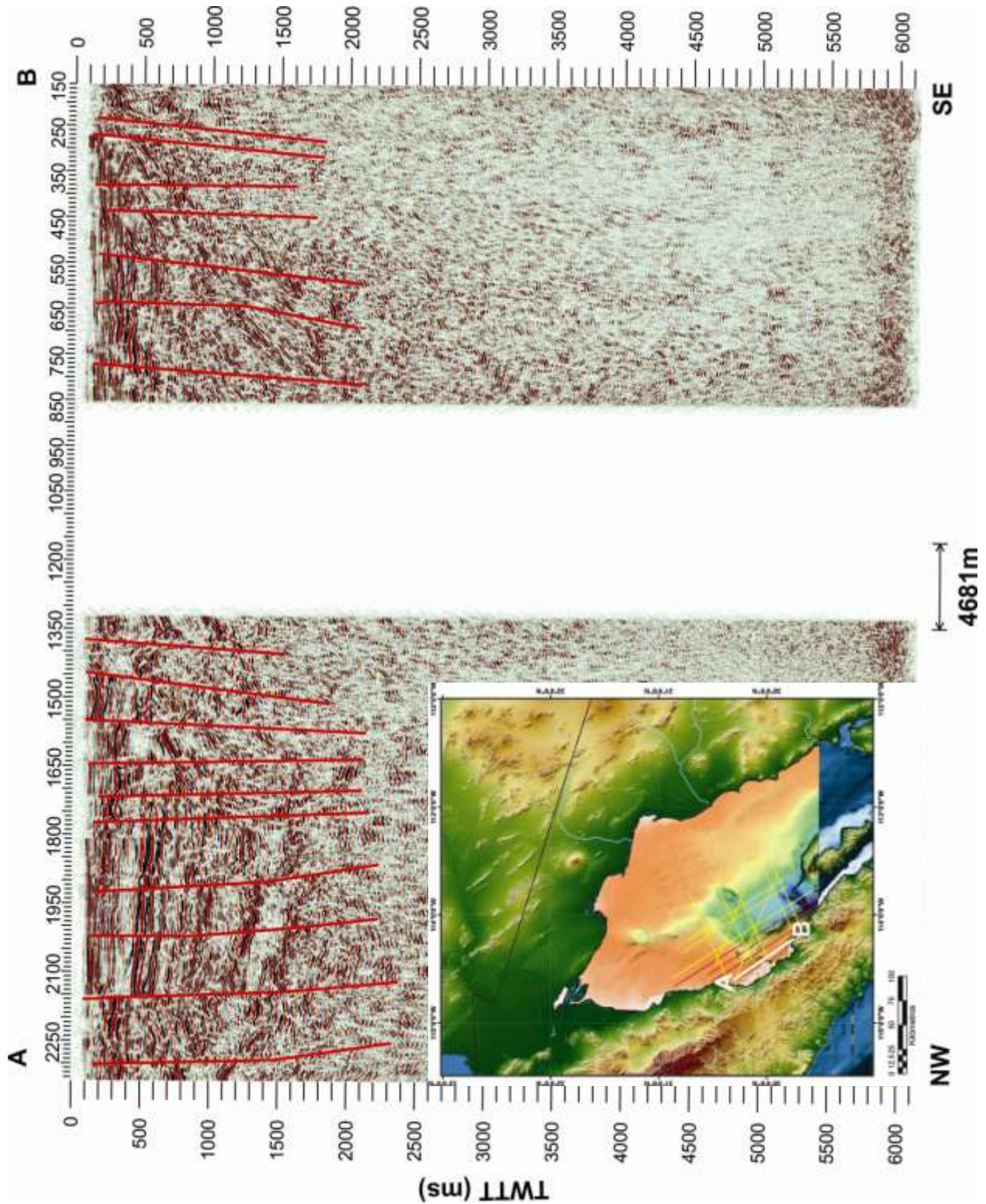


Figura 4.9. Línea 5084 que muestra un patrón de fallas normales casi verticales y semiparalelas entre ellas, buzando hacia el SE en la porción NW y al NW en la porción SE, que tienden a converger en la parte central.

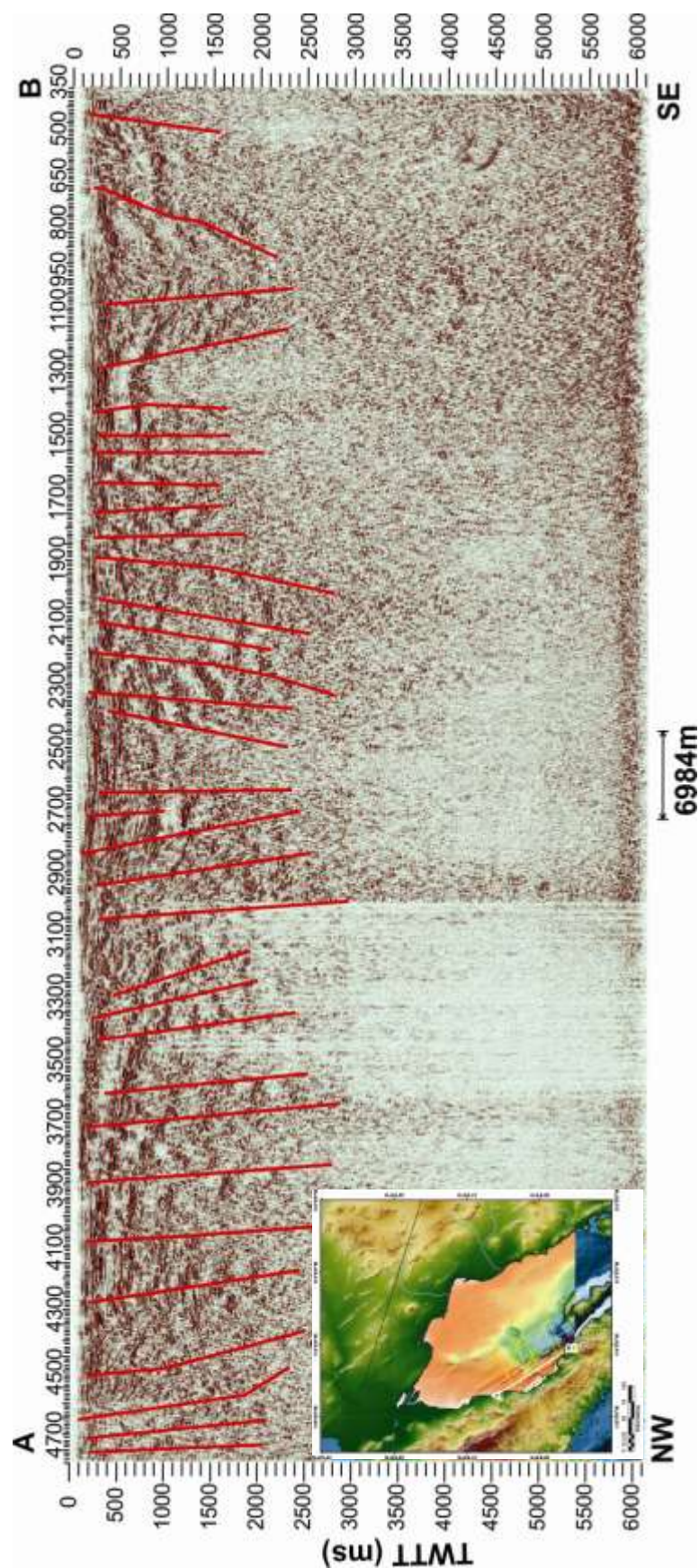


Figura 4.10 Línea 5080, en donde la densidad de fallas de aproximadamente 1/km; estas se comportan de la misma manera que la línea 5084, pero presentan mayor longitud. En la parte NW tienen caída hacia el E y las del SE son casi verticales o muestran una ligera caída hacia el W. Las secuencias sedimentarias tienden a converger hacia el centro alrededor del CDP 2700, las fallas son normales con caídas E y W, lo que hace que haya un desplazamiento de los horizontes o paquetes hasta por varias decenas de metros.

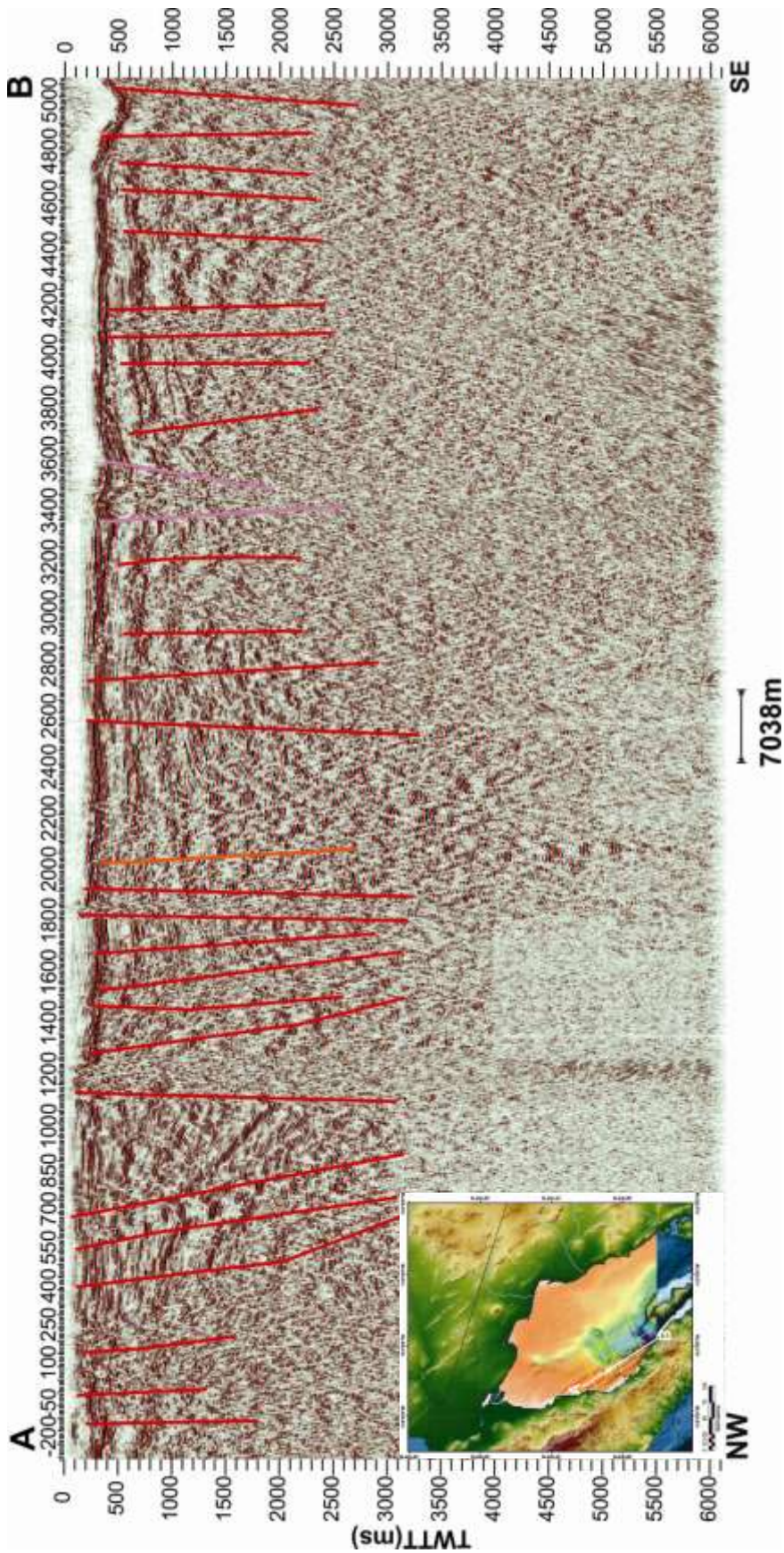


Figura 4.11 Línea 5076, que presenta rasgos interpretados como flujos hidrotermales, el primero ubicado del CDP 1,100-1,300, el segundo del CDP 1,500-1,600, el tercero del CDP 1,800-2,000 y, finalmente uno del CDP 4,000-4,200, todos estos cortan verticalmente a las secuencias sedimentarias y por consecuencia están limitados por fallas normales semiparalelas en sus extremos. La densidad de Fallas es de 3/6 km, las estructuras del NW tienen un echado al E y las del SW caen hacia el W, son de ángulo moderado casi verticales y semiparalelas entre ellas, todas tienden a converger hacia la parte central. La falla Volcanes en color rosa toca 2 veces con la línea en el CDP 3,400 y 3,700, generando una geometría parecida a la de un *graben* en la sección.

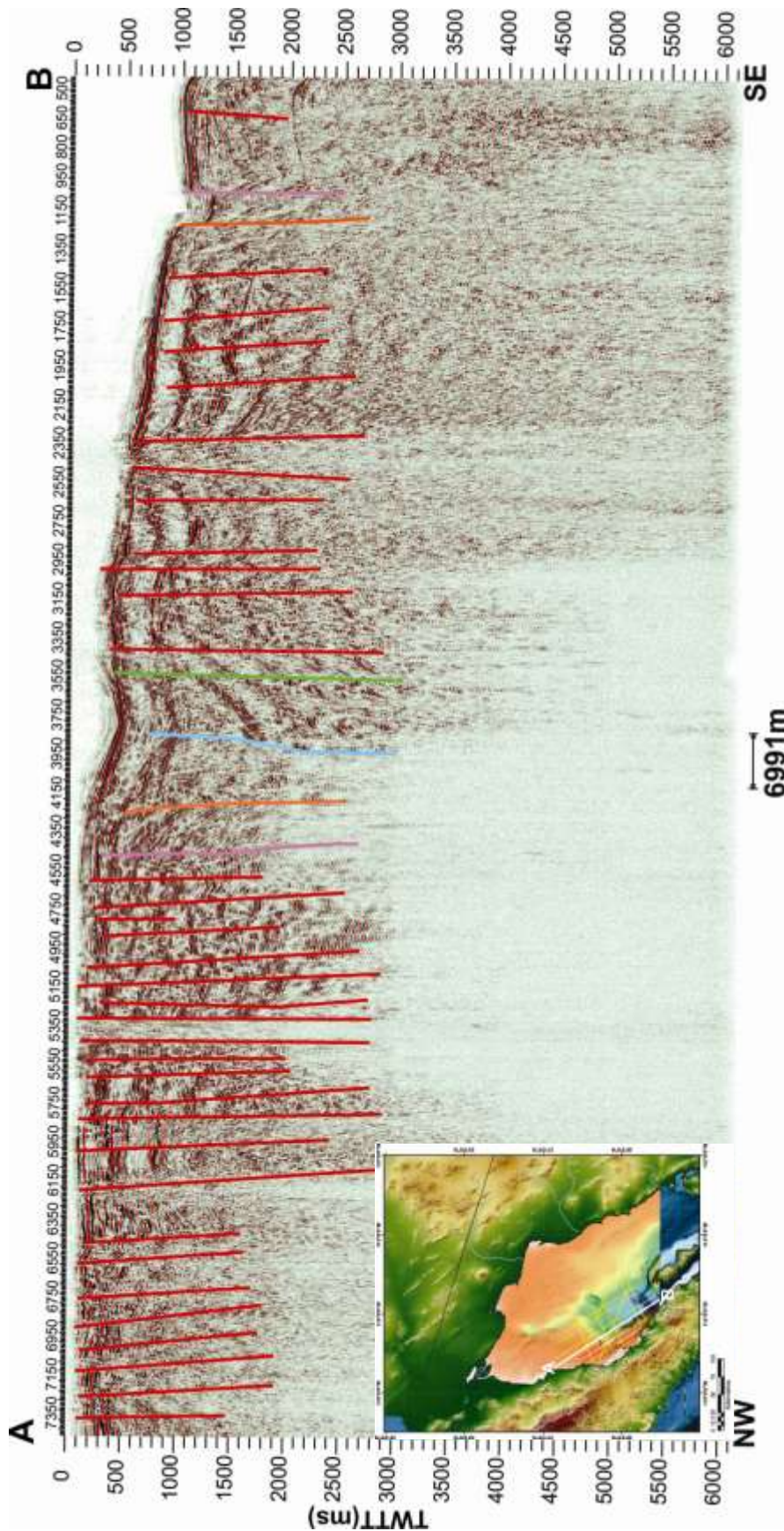


Figura 4.12 Línea 5072, presenta flujos hidrotermales en el CDP 5450-5350 y en el CDP 2450-2350, la densidad de fallas es de 3/7 km, las fallas tienen un carácter semiparalelo entre ellas y son casi verticales, las del sector NW desde el CDP 7350 tienen un echado hacia el este, y las del sector SE hacia el oeste, la secuencia converge en el CDP 3950, en donde se localizan las fallas correlacionadas: 1) Falla Volcanes Norte 2 (anaranjada), 2) Delfin Superior Central (azul), 3) Volcanes Sur (verde); hacia el SE de la sección, del CDP 1200-950, se encuentra una depresión prominente perteneciente a el área de la cuenca Delfin Inferior, este hundimiento de aproximadamente 12 Km., esta limitado en sus extremos por las fallas que se interpretaron y correlacionaron como: 4) Falla Delfin Inferior Oeste (anaranjada), 5) Falla Delfin Inferior Este (rosa). Las fallas en la sección son normales y a su vez generan antitéticas. La Falla Volcanes limita en la parte oeste a las Cuencas Delfin y se considera como la falla actualmente dominante y activa

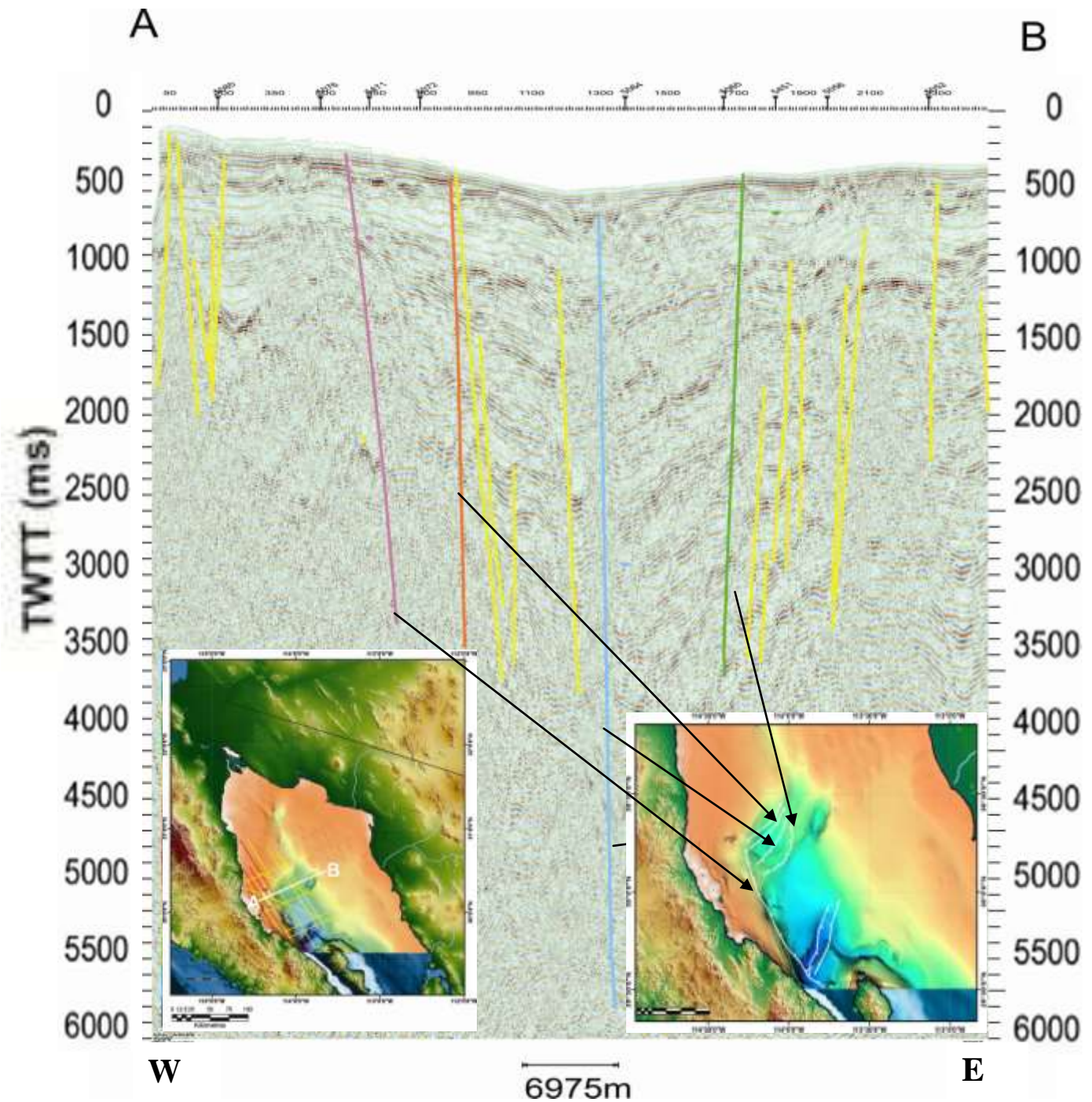


Figura 4.13 Línea 5451 con dirección W-E, muestra la falla Volcanes (rosa), falla Volcanes Norte 2 (anaranjada), falla Delfín Superior Central (azul), ubicada en el depocentro de la Cuenca Delfín Superior y falla Volcanes Sur (verde), todas ellas funcionando como límites de la cuenca Delfín Superior. El mapa en la esquina inferior izquierda muestra la ubicación del segmento A-B de la línea sísmica.

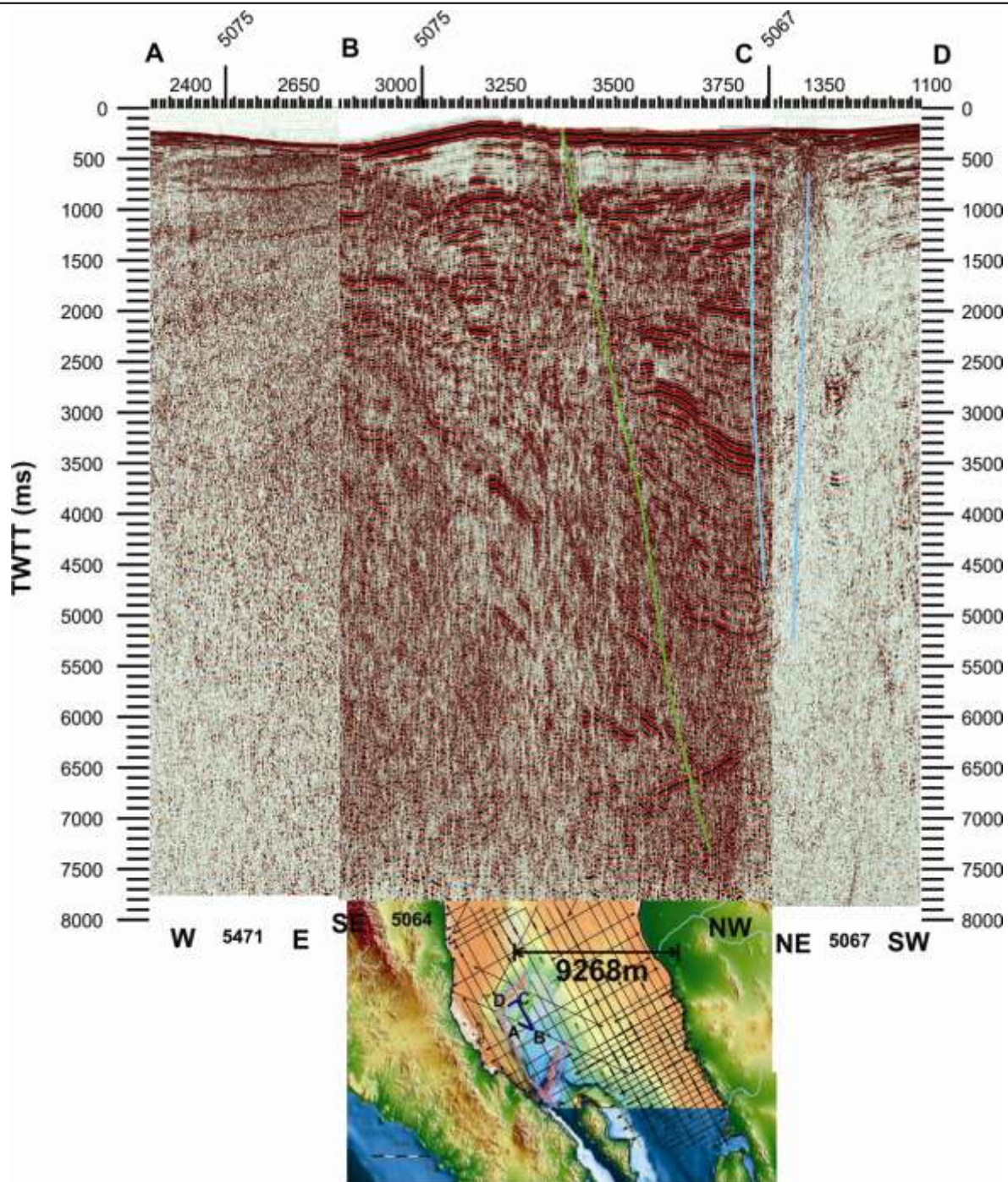


Figura 4.14 Sección en Zig-Zag de las líneas 5471, 5064, 5067 con dirección W-E, SE-NW y NE-SW respectivamente. La falla Volcanes Sur esta representada en color verde y la falla Delfín Superior Central en azul. Las secuencias tienden a hundirse en el trazo B-C y C-D, debido a su ubicación cerca del depocentro de la Cuenca Delfín Superior. En el mapa inferior se incluye la interpretación de los depocentros de las cuencas del norte realizada por Persuad *et al.* (2003), las siete estructuras correlacionadas para este trabajo, así como la malla sísmica de PEMEX en su totalidad. Nótese que la dirección de los segmentos A-B-C-D indica la trayectoria que sigue el despliegue de Zig-Zag.

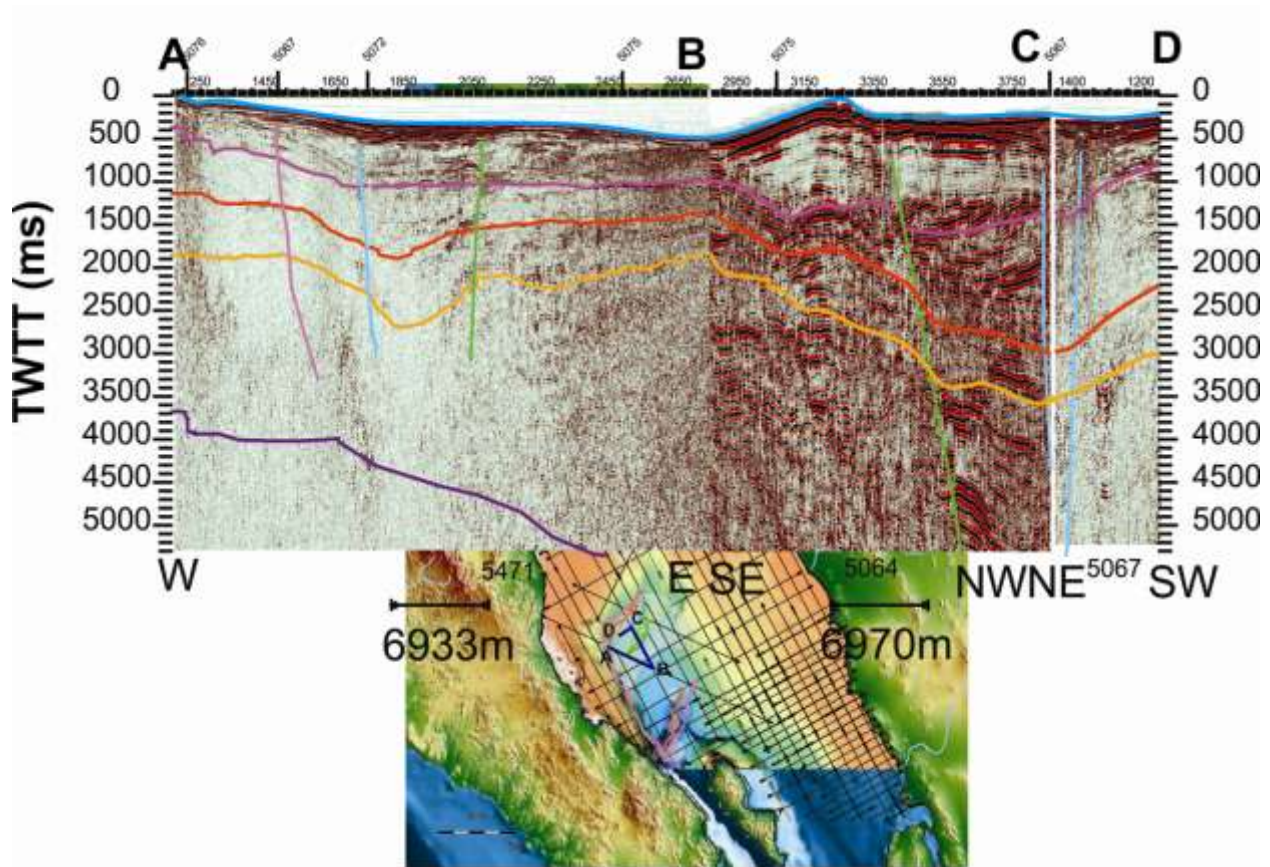


Figura 4.15 Sección en Zig-Zag de las líneas 5471W-E,5064 SE-NW,5067 NE-SW, en el segmento A-B se visualiza el echado aparente hacia el E de las fallas Volcanes (rosa), Delfin Superior Central (azul) y Volcanes Sur (verde) hacia el W. En el sector B-C la caída de la falla Volcanes Sur concuerda con lo interpretado en el segmento A-B y finalmente en el segmento C-D el plano de la falla Delfín superior Central converge, esta convergencia se usa como criterio para la correlación de fallas; es decir, de acuerdo al ángulo que forman las líneas correlacionadas, su orientación, forma y echado natural de la falla, se determina cómo será el comportamiento de una misma falla en diferentes secciones, esto es; si debe ser convergente o divergente. El mapa inferior muestra en color azul las secciones A-B-C-D y su interacción con las fallas mencionadas. La cuenca Delfín Superior esta delimitada en su parte oeste por la Falla Volcanes, la cual controla actualmente la deformación en el area y presenta gran actividad volcánica; las otras tres fallas correlacionadas dentro de esta cuenca, parecen derivarse de esta falla principal. El mapa inferior muestra las siete estructuras correlacionadas en este trabajo y estan representadas con los colores con los que aparecen en los perfiles sísmicos.

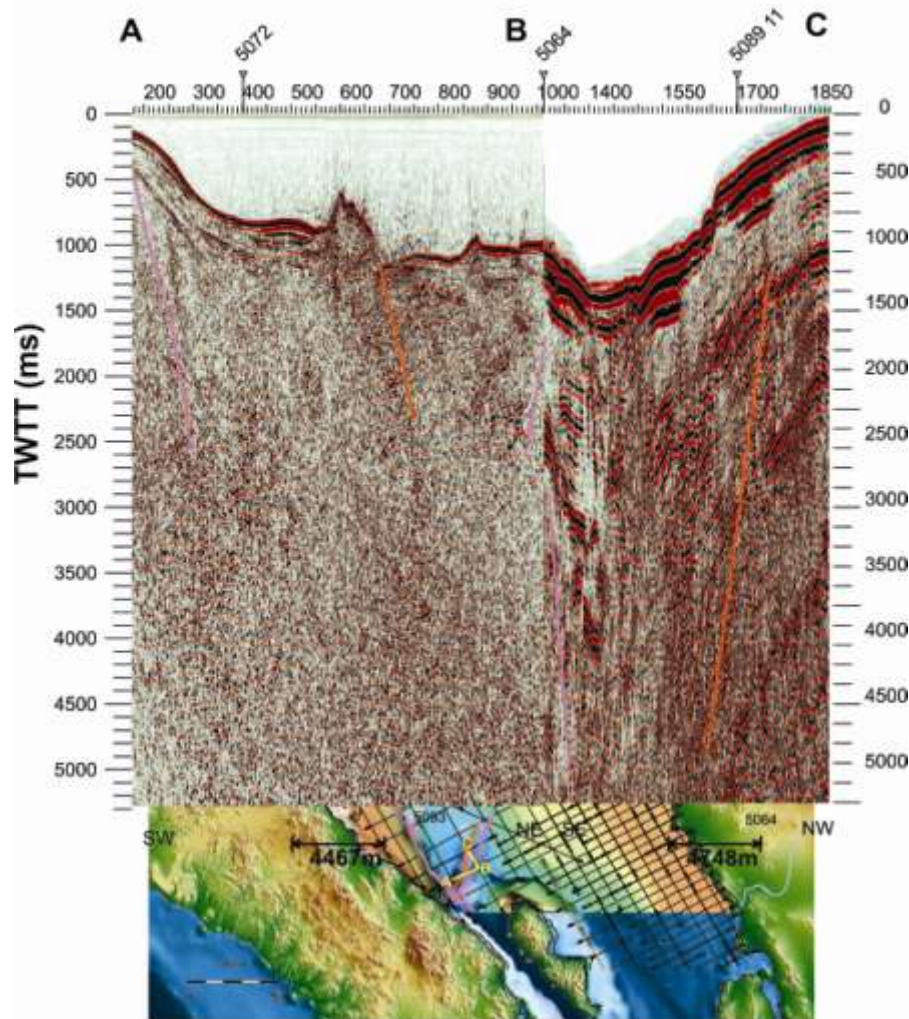


Figura 4.16 Sección en Zig-Zag de las líneas 5093 con dirección SW-NE y 5064 SE-NW, en la zona Delfín Inferior. El segmento A-B muestra de derecha a izquierda: 1) Falla Volcanes (rosa) buzando al E, tiene una componente normal y un desplazamiento lateral derecho, 2) Falla Delfín Inferior Oeste (anaranjado) con echado al E, 3) Falla Delfín Inferior Este (rosa) hacia el W. Otra característica importante en este segmento es la obvia profundización del fondo marino hasta 1,200 ms y el pico prominente ubicado entre el CDP 550-650, este levantamiento en la secuencia del Holoceno-Pleistoceno es originado posiblemente por la alta actividad volcánica del Plioceno Tardío, en esta cuenca activa. En el Segmento B-C la falla Delfin inferior oeste converge con la de la sección A-B y la Falla Delfín Inferior Este diverge con su respectiva en la sección A-B, esto concuerda con los criterios de correlación, ya que el segmento B-C tiene una dirección SE-NW.

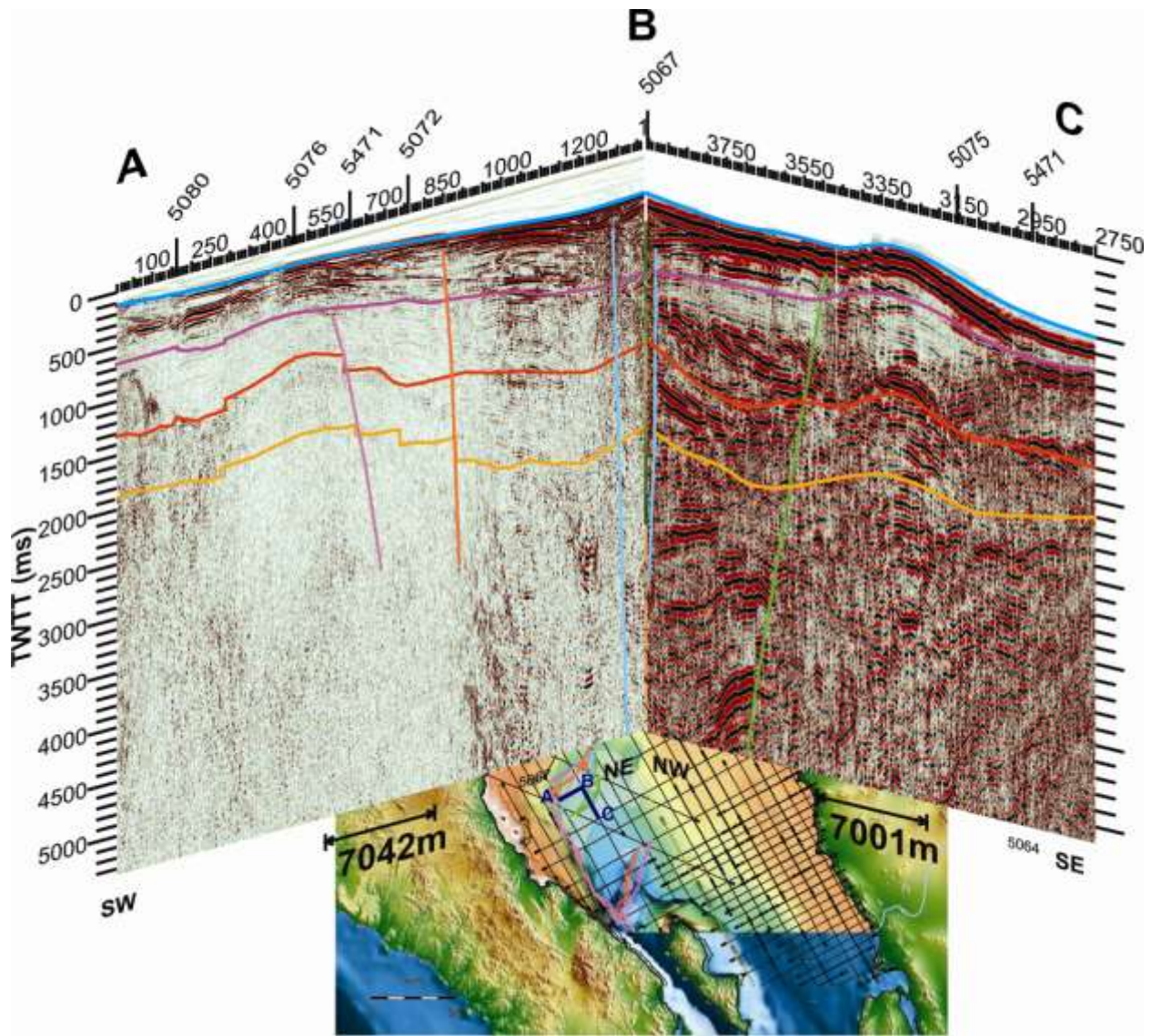


Figura 4.17 Sección en Zig-Zag de las líneas 5067 con dirección SW-NE y 5064 NW-SE en la zona Delfín Superior. El segmento A-B despliega de izquierda a derecha a la fallas Volcanes, Volcanes Norte, Delfin Superior Central y la B-C a las fallas Delfin Superior central, la cual converge con su respectiva en el segmento A-B y a la falla Volcanes Sur, ésta última no aparece en la primera sección por que no es tocada por la línea, como se puede visualizar en el mapa inferior que despliega la ubicación de los segmentos A-B-C en color azul.

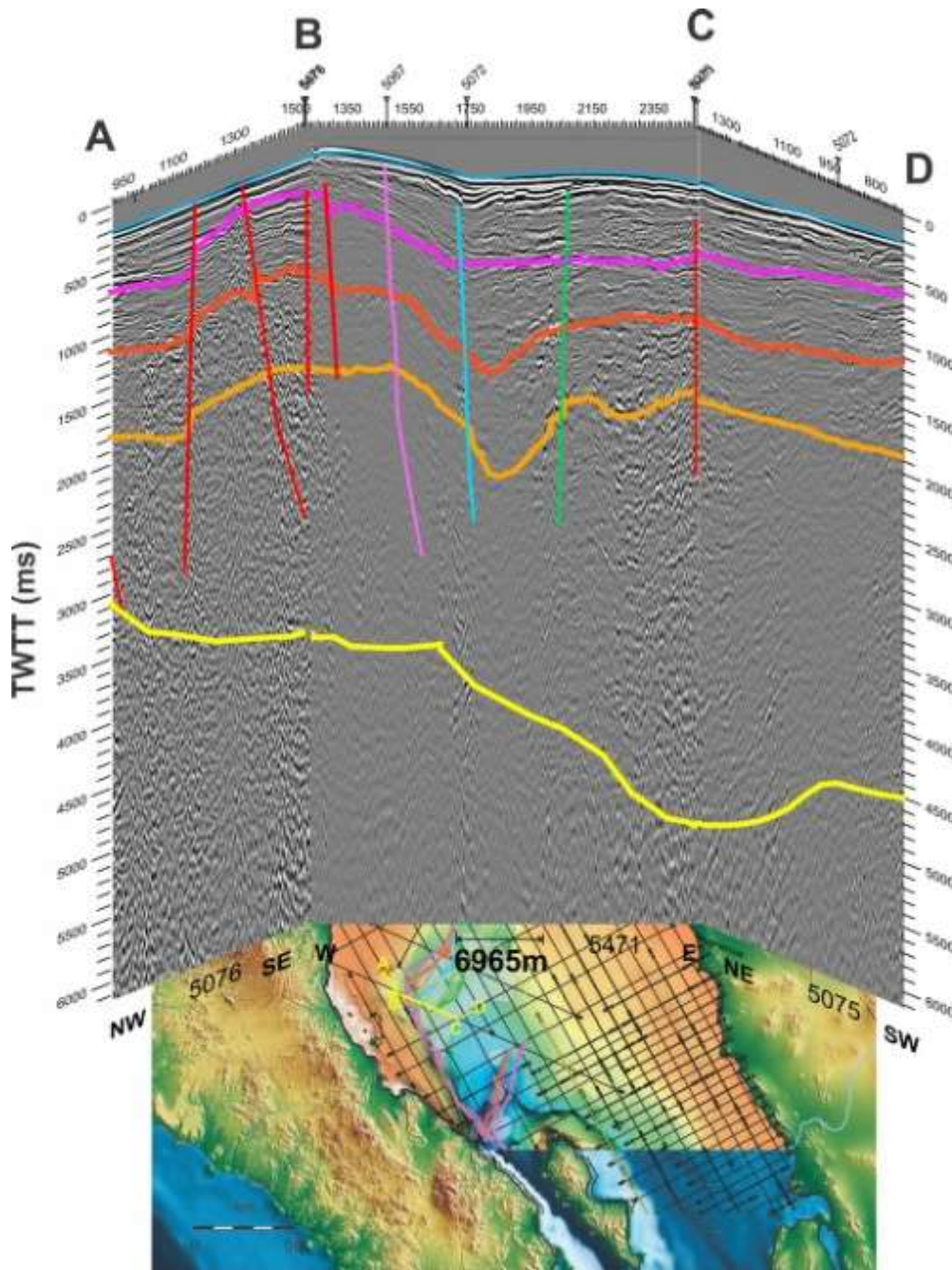


Figura 4.18 Sección en Zig-Zag de las líneas 5076 con dirección NW-SE, 5471 W-E y 5075 NE-SW respectivamente, en la zona Delfín Superior, Las fallas volcaneas, Delfín Superior Central y Volcaneas Sur son desplegadas de izquierda a derecha en el segmento B-C, estas fallas acomodan subsidencia en la cuenca, modificando la geometría en las secuencias estratigráficas que están representadas en la sección por las líneas de colores horizontalmente semicontinuas. En el CDP 1,700- 2,100 hay un hundimiento de aproximadamente 400 m, representando el depocentro de la cuenca Delfín Superior. Las fallas juegan un papel fundamental, controlando la subsidencia de las cuencas, para esta área predominan las fallas de carácter normal y oblicuo. El mapa inferior muestra en color amarillo la ubicación de los segmentos A-B-C-D.

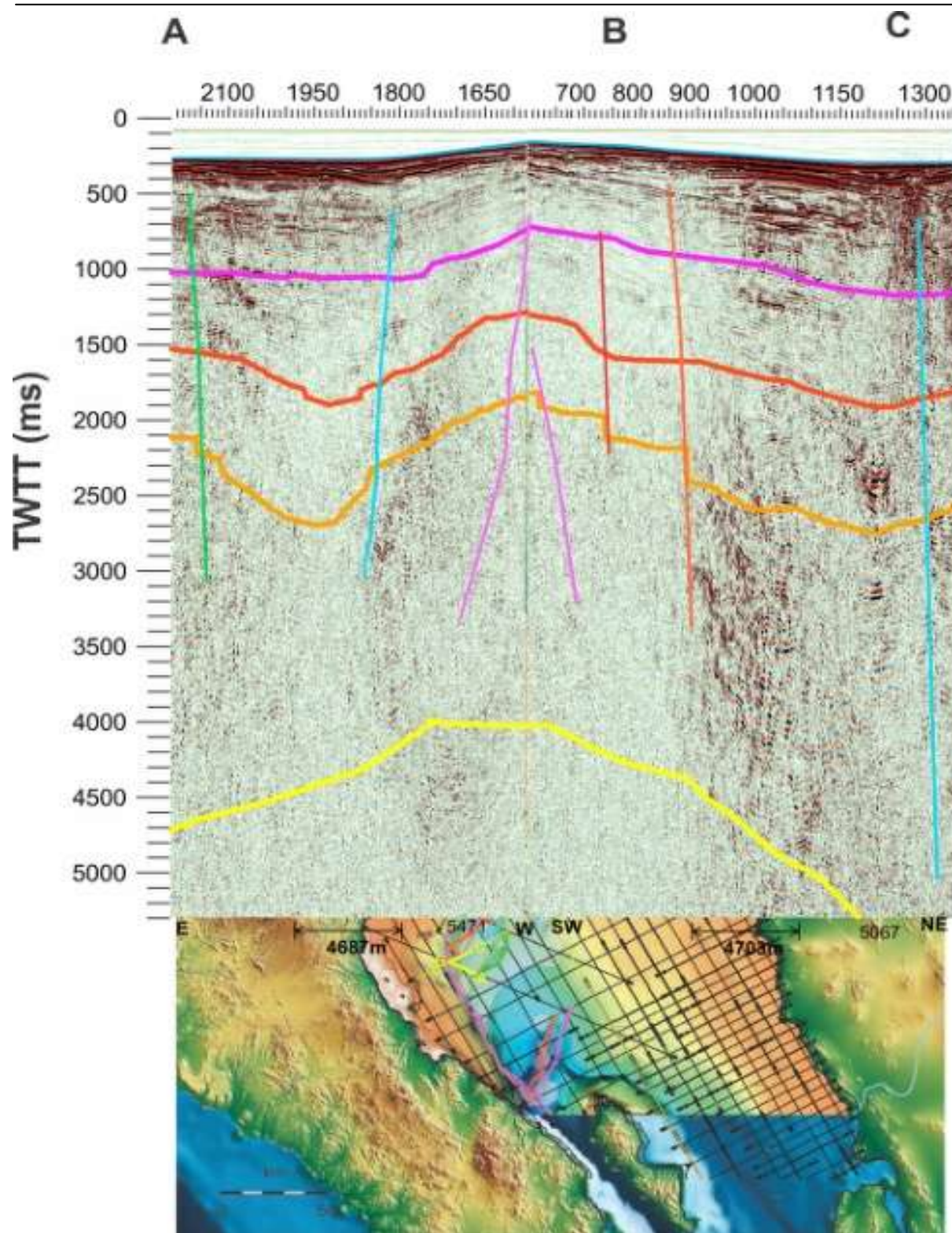


Figura 4.19 Sección en Zig-Zag de las líneas 5071 con dirección E-W y 5467 SW-NE, la falla Volcanes en rosa y la Delfín Superior Central divergen en las secciones, ya que las dos tienen una caída hacia el E; el mapa inferior muestra en amarillo la ubicación de los segmentos A-B-C.

4.3.3 CONFIGURACIÓN DE HORIZONTES, BASAMENTO ACÚSTICO Y FONDO MARINO

Se utiliza el término *facie* cuando los elementos que componen una roca o medio comparten rasgos y características que los identifican como uno; por ejemplo, cuando comparten contenido de fósiles similares se le llama *bio-facie* o en el caso de la sísmica; *sismo-facie*, si conllevan atributos similares de amplitud, fase, polaridad, forma de onda y/o coherencia. La *estratigrafía de secuencias* se refiere a la interpretación y modelado *estratigráfico* de un conjunto de *facies* a través de la determinación de sus límites.

Vincent *et al.* (1998) definieron a la *Estratigrafía de Secuencias* como sucesiones sedimentarias que pueden ser divididas en unidades limitadas por discordancias (secuencias o superficies que separan estratos jóvenes de antiguos), las cuales se formaron durante un ciclo de cambio del nivel del mar.

Estas características de las secuencias *estratigráficas*, se ven traducidas en los perfiles estudiados como secuencias sísmicas limitadas en su base y cima por superficies discontinuas, marcadas por terminación de reflectores, representando una secuencia de depósito conformada por una sucesión de estratos genéticamente relacionados. Se menciona lo anterior debido a que los resultados presentados en esta sección de la tesis, se obtuvieron a través de la interpretación *sismo-estratigráfica* y de su ajuste con datos del pozo W2, propiedad de Petróleos Mexicanos, los límites o cimas de las secuencias con las que se llevó a cabo la correlación contaban con líneas de tiempo avaladas y establecidas a partir de registros geofísicos, recuperación de muestras de canal y el estudio *bioestratigráfico*, petrológico y geoquímico de núcleos.

La interpretación *estratigráfica* consistió básicamente en la observación y el análisis de las secciones sísmicas longitudinales con orientación NW-SE (con una separación de 5km), las secciones transversales SW-NE (con separaciones entre ellas que varían de los 32-6 km) y las dos secciones E-W (separadas 21 Km), definiendo y correlacionando así, cuatro horizontes, simbolizando a las cimas de los límites de secuencias pertenecientes al Holoceno, Pleistoceno, Plioceno y Mioceno Tardío; el procedimiento incluyó la selección de cada reflector representativo de la cima secuencial, en una línea sísmica que tuviera datos de pozo con el que se pudiera ajustar/correlacionar y así definir una correcta posición para estos límites de secuencia, en este caso se inició el seguimiento de los horizontes en las líneas procesadas 5080, 5084, 5072, 5076 como se muestra en las Figuras 4.20, 4.21, 4.22 y 4.23. Una vez delimitadas las cimas en

estas líneas, se correlacionaron los reflectores con las líneas vecinas, del mismo modo se hizo el seguimiento y correlación para hacer una propuesta de la configuración del basamento acústico, el cual se caracteriza por una pérdida en la coherencia de los reflectores, ya que las ondículas suelen presentar formas caóticas, además se delineó en cada línea de manera individual el fondo marino para presentar un mapa de su disposición.

A continuación, se presenta una descripción del comportamiento de los horizontes delimitados y la estratigrafía que los representa. La información estratigráfica se tomó del pozo W2 propiedad de Petroleos Mexicanos, dicho pozo se encuentra relativamente cerca del área de estudio (Fig.4.25).

1) **Fondo Marino:** La Figura 4.32 muestra el comportamiento de la batimetría en el área de estudio, la profundización de el fondo submarino se hace evidente en la zona SW de la Cuenca Delfín Inferior, llegando hasta los 1500 en la línea 5072 y 700 ms en la línea 5076; las líneas pegadas a la margen peninsular presentan una somerización que puede llegar hasta un mínimo de 50 ms y no rebasa los 200 ms. La Cuenca Delfín Superior profundiza hasta a no más de 700 ms. La historia genética de la Provincia Extensional del Golfo, se traduce en la formación de cuencas someras con gran amplitud en el norte y profundas y estrechas al sur, desarrolladas en la frontera entre las placas Pacífico y Norteamérica. Esta geometría se ve reflejada en el cambio de posición del lecho marino.

2) **Holoceno:** La cima de esta secuencia de sedimentos jóvenes ≤ 1 Ma., es más somera al oeste, cerca de la línea de costa Figura 4.28, con valores en tiempo doble que varían entre 100 a 200 ms máximo hacia el este; al tocar la zona de la Cuenca Delfín Superior toma valores de 284-639 ms, el contraste más fuerte se visualiza al SE, acercándose a la Cuenca Delfín Inferior, donde profundiza hasta 1,000 ms. Estos cambios en la profundidad de los horizontes están controlados por las fallas presentes que fragmentaron y siguen acomodando subsidencia en las secuencias sedimentarias, moldeando la geometría típica de estas zonas que están siendo sometidas a esfuerzos de transtención. Los datos del pozo W2 indican que la cima del Holoceno está dominada por lodos de ambiente somero nerítico-interno, que marcan la transgresión de esta secuencia. El espesor del Holoceno no rebasa los 500 m.

3) **Pleistoceno:** La configuración que se visualiza en el mapa (Fig.4.29) para este horizonte, está en el rango de 100-650 ms en las zonas mas someras cerca de la costa, al alejarse de la margen peninsular toma valores de 700-1,700 ms, este último valor ocurre en Delfín Superior, llega a un mínimo de 1600 y un máximo de 2280 ms al adentrarse en Delfín Inferior. El espesor promedio varía de 500-750, esta secuencia tiende a acuñarse mientras se aleja de la línea de costa. De acuerdo al pozo W2 el Pleistoceno esta conformado por paquetes gruesos de lodolita calcáreo-arenosa, intercalada con arenas cuarzosas de grano fino y limolitas ligeramente calcáreo-arenosa de poco espesor ~ 40 m, también presenta paquetes de lutita y arenisca de hasta 125 m. El desarrollo del delta del Río Colorado y su progradación en el norte del Golfo de California, influyó de manera importante en el crecimiento del relleno sedimentario de las cuencas en esta área. De acuerdo a la paleobatimetría el ambiente en la cima del Pleistoceno es nerítico-intermedio y la base pertenece a zonas de transición.

4) **Plioceno:** Esta secuencia también se relaciona con los efectos del Río Colorado, a partir del Plioceno se empiezan a generar las grandes fallas principales que acomodan la actual geometría de las cuencas del norte, como resultado de un cambio en el regimen de esfuerzos e inicio de la deformación transtensiva; la cual genera espacios grandes para la acumulación de potentes secuencias sedimentarias. El mapa de la (Fig.4.30), muestra la aparición de la cima del Plioceno desde los 550 ms, hasta un máximo de 2,400 ms en la Cuenca Delfín Inferior, esto indica una mayor subsidencia de los estratos hacia el SE en la zona central de la Cuenca Delfín Superior, donde se localizan los depocentros de dichas estructuras. La estratigrafía de pozo W2 reporta secuencias lodosas en la cima con espesores de 350 m y en la base lodolitas de espesores grandes de aproximadamente 150 m que indican una transgresión marina al inicio del Plioceno.

5) **Mioceno Tardío:** Está caracterizado por espesores mayores de 1500 ms, su cima alcanza valores que van desde 900 ms hasta los 2,800 ms en las zonas más profundas, su gran despliegue se debe al inicio de la incursión marina en el Golfo. La cima esta definida por arenas potentes que pertenecen a una regresión, hacia la base se ven los efectos de una transgresión, este ciclo transgresivo-regresivo es de ambiente transicional. No se encuentra registro de un Mioceno Medio en la columna estratigráfica del pozo W2.

6) **Basamento acústico:** Se presenta por lo general desde los 2,500 ms, y es difícil su seguimiento, ya que no todas las líneas muestran claramente sus límites, el mapa de la Figura 4.33 presenta una propuesta de basamento acústico, inferido a través la pérdida de señal en las secciones, es importante remarcar que el término basamento acústico y basamento cristalino, no debe confundirse, acústico indica que los reflectores ya no son claros o interpretables a detalle marcando el inicio de este basamento; por ejemplo, en zonas de gran relleno sedimentario la señal se deteriora antes de cruzar las potentes capas sedimentarias; por otro lado el basamento cristalino es la roca más antigua que sirve de base o soporte de toda la columna estratigráfica y su profundidad es mayor que la del basamento acústico en la mayor parte de los casos. De acuerdo a la columna del pozo W2 el Mioceno Tardío descansa sobre rocas volcánicas terciarias definida como una andesita porfídica fechada en 8 ± 1 Ma. a través de la relación K/Ar (IMP, 1981), las andesitas sobreyacen a un basamento granítico del Cretácico Superior, relacionado al volcanismo de arco, producto de la subducción de la placa Farallón bajo el Borde de Norteamérica, generando la intrusión ígnea del batólito peninsular.

Las Figuras 4.24, 4.26 y 4.27 muestran el despliegue del pozo W2 en diferentes líneas sísmicas y el ajuste de los horizontes correlacionados, con las cimas de los datos de pozo, además para complementar la interpretación de los horizontes sismoestratigráficos y poder visualizar su comportamiento dentro del área de estudio, se realizaron mapas de isopacas en tiempo doble para cada secuencia, así como para el fondo marino y el basamento acústico. Todos estos muestran que tanto la batimetría como las secuencias estratigráficas, aumentan su profundidad al acercarse a la Cuenca Delfín Inferior y que, la geometría irregular de las secuencias se debe al efecto del patrón de fallas normales y oblicuas que dominan el área, lo que genera algunos levantamientos en las secuencias pero principalmente hundimientos. Por otro lado, el espesor de las secuencias es regular en las cercanías de la costa peninsular, mayor en los depocentros de las cuencas Delfín Superior e Inferior y finalmente tienden a acunarse hacia el este.

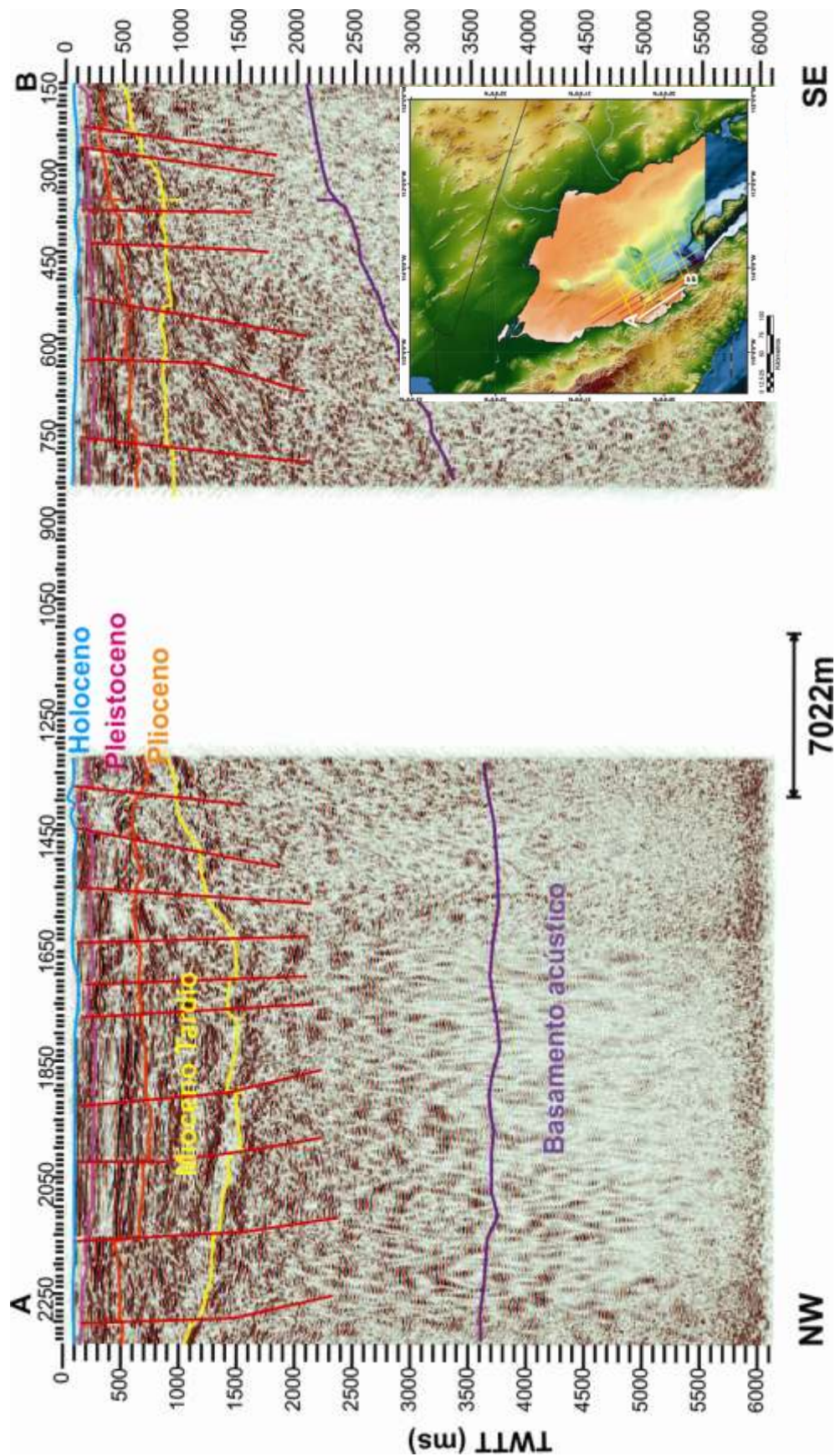


Figura 4.20 Línea 5084 NW-SE localizada en las cercanías de la costa peninsular, muestra las secuencias estratigráficas correlacionadas. La profundidad del fondo marino no es mayor de 100 ms, los espesores para las secuencias del Holoceno, Pleistoceno y Plioceno no supera los 500 ms, mientras que el Mioceno Tardío alcanza un espesor máximo de 2300 ms .

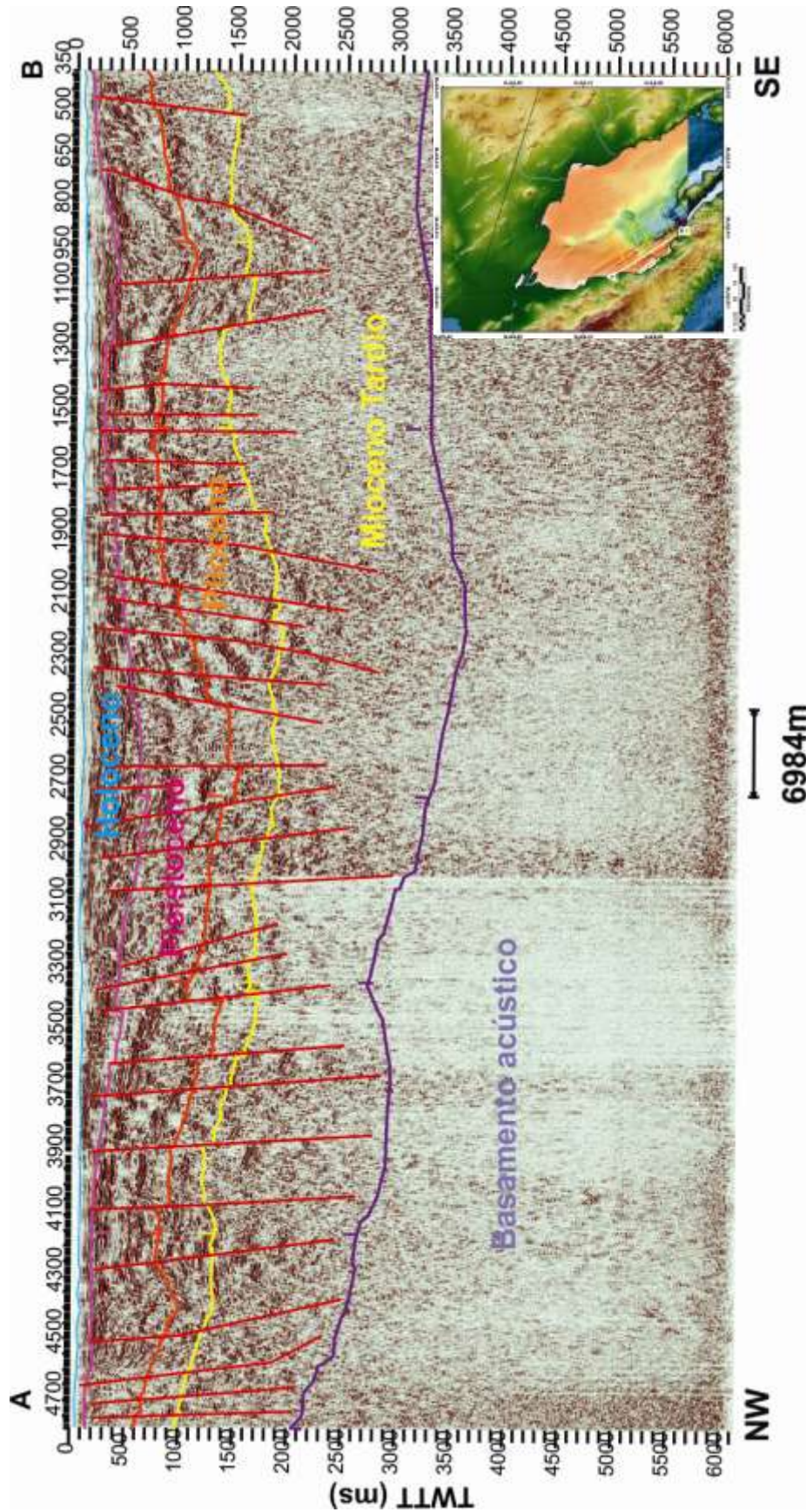


Figura 4.21 Línea 5080 localizada paralelamente a 10 km de distancia de la costa peninsular. El lecho marino se muestra somero, no superando los 150 ms, el Holoceno presenta espesores de 100-500 ms, el Pleistoceno de 400-1,300 ms, el Plioceno de 300-1,000 ms y el Mioceno Tardío 1000-2000 ms; los valores máximos en los espesores ocurren del CDP 3,100-2,300 para el Holoceno-Pleistoceno y del CDP 2,300-1,300 para el Plioceno-Mioceno Tardío, y los valores mínimos, se localizan para todas las secuencias, en el extremo NW de la sección. El mapa inferior muestra la ubicación del la sección A-B.

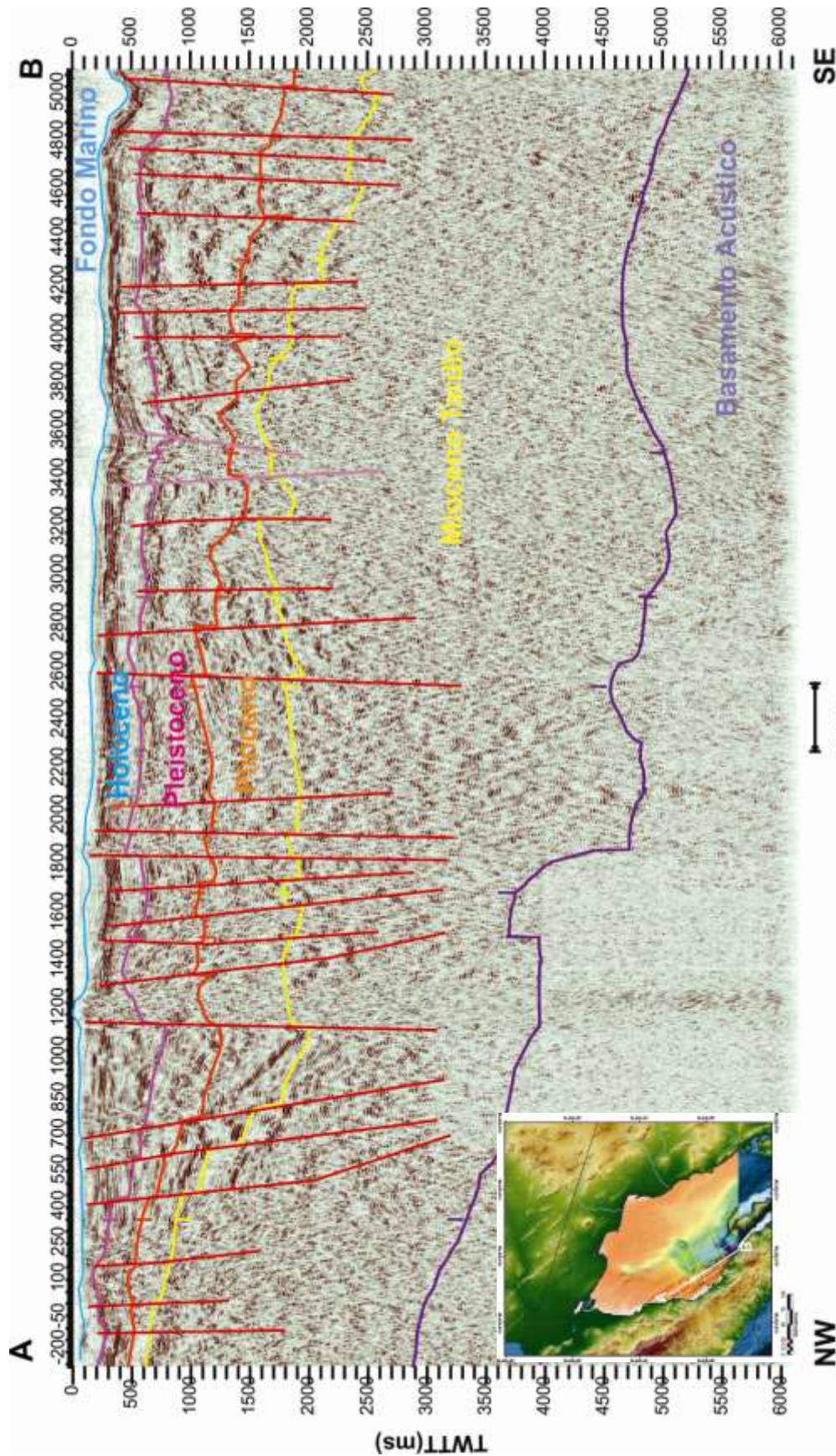


Figura 4.22 Línea 5076 NW-SE, muestra un lecho marino muy somero de aproximadamente 150 ms, el cual profundiza 400 ms al acercarse a la Cuenca Delfin Inferior. Los espesores aproximados para el Holoceno, Pleistoceno y Plioceno están acunados en la parte NW de la sección y no superan los 200 ms, en el rango del CDP 700-1200 y el CDP 2,000-2,600, se visualiza un aumento considerable en el espesor de estas tres secuencias, llegando a un máximo de 650 ms, ambos crecimientos en la secuencia están limitados en sus extremos por fallas que caen en sentido contrario. En la secuencia Miocénica, el espesor es de 2,100 ms en los extremos y 2,700 ms del CDP 2,800-400. El basamento acústico profundiza hacia Delfin Inferior.

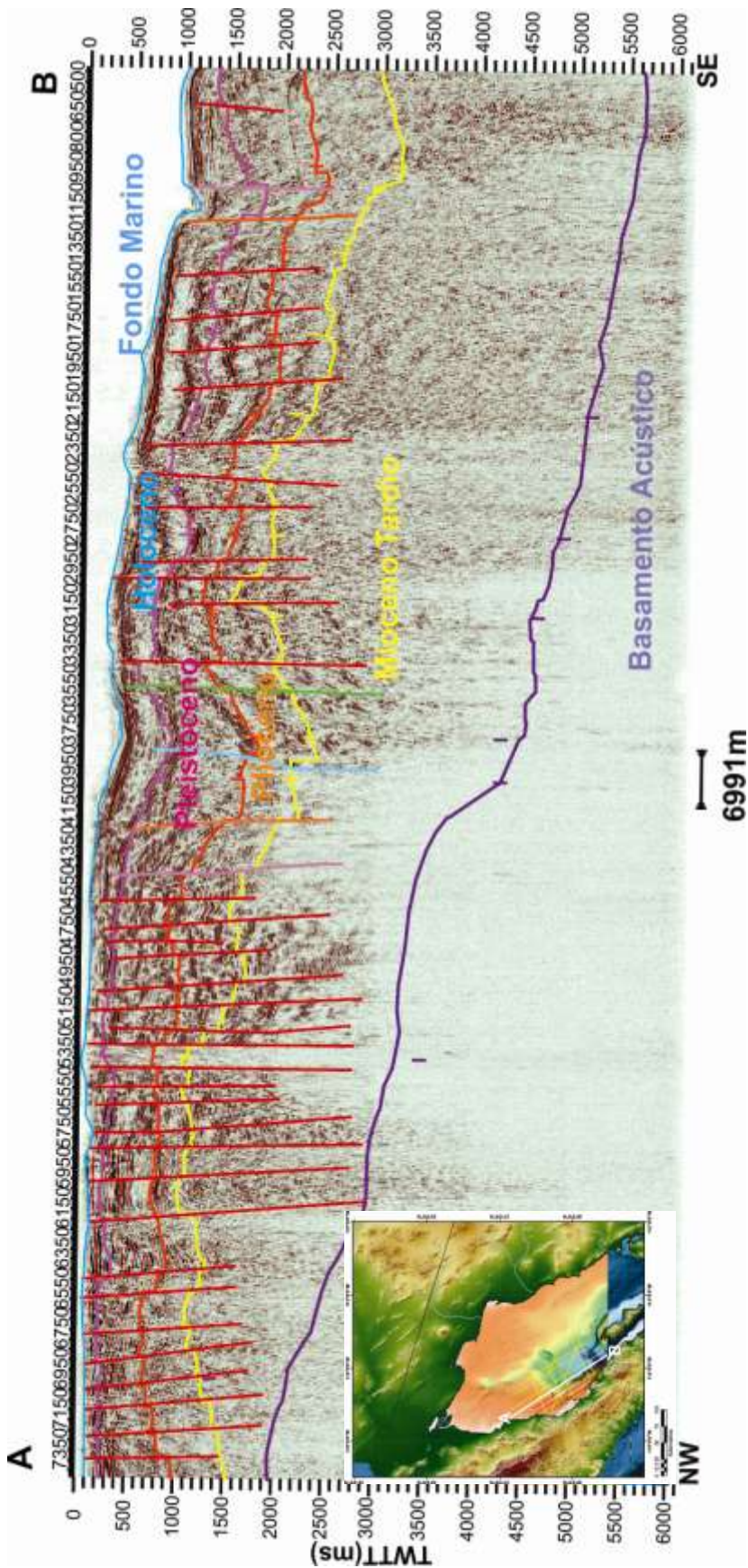


Figura 4.23 Línea 5072 con orientación NW-SE donde se muestra que el fondo marino en el sector NW es muy somero en comparación con la parte sur, donde alcanza los 1,300 ms al delinear los extremos E y W de la Cuenca Delfin Inferior, representados por la falla Delfin Inferior Este (rosa) en el CDP 950 y falla Delfin Inferior Oeste (anaranjada) en el CDP 1,350. El espesor en el sector NW para el Holoceno, Pleistoceno, Plioceno y Mioceno Tardío es de 100, 600, 650 y 500 ms, respectivamente; el espesor aumenta 300 ms en el CDP 4750-3150 donde se encuentran las fallas Volcanes, Volcanes Norte, Delfin Superior Central y Volcanes Sur, las cuales delinear a la Cuenca Delfin Superior

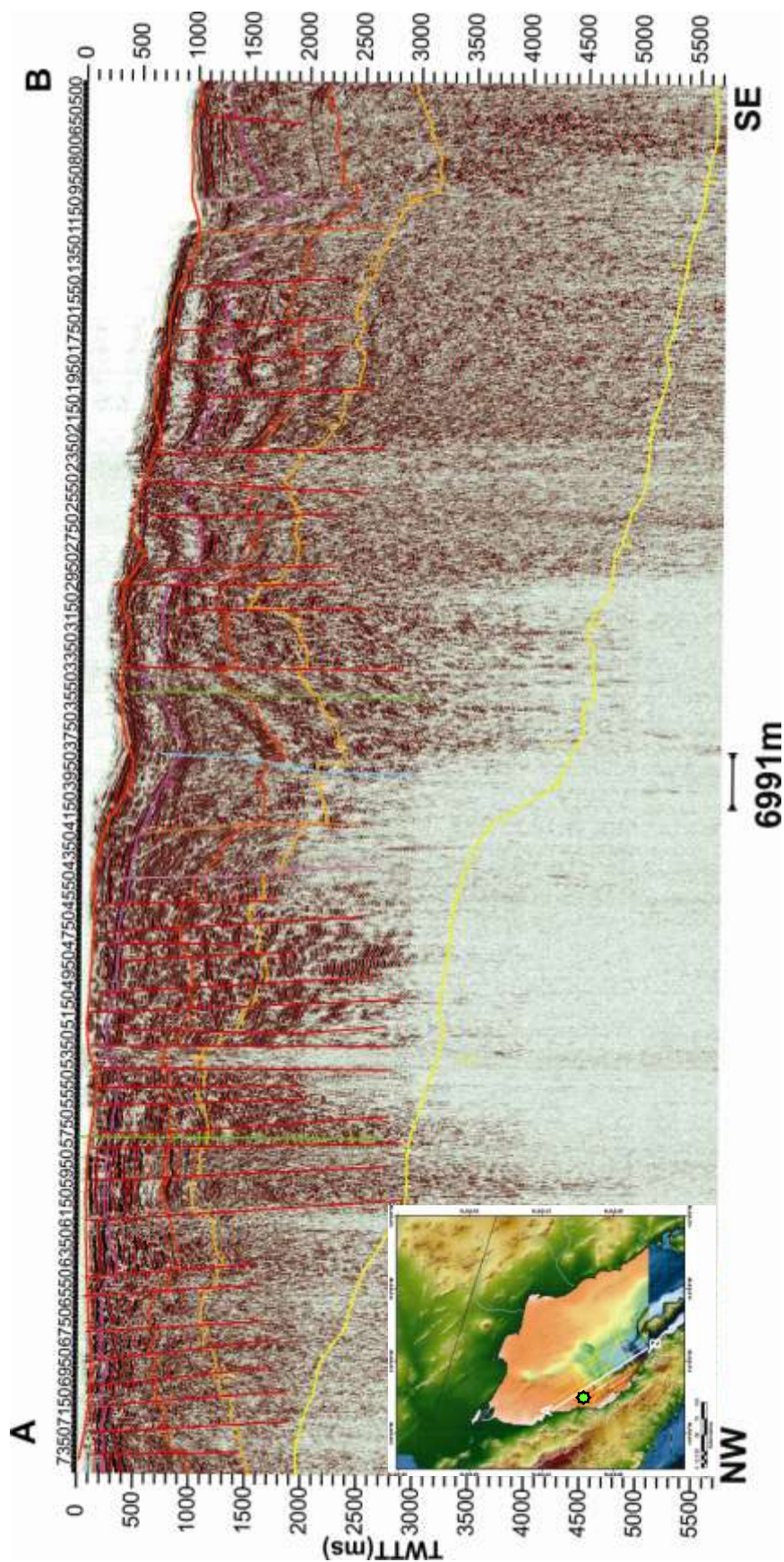


Figura 4.24 Línea 5072 con orientación NW-SE, muestra al pozo W2 y el despliegue de sus cimas para cada secuencia estratigráfica. Los marcadores ajustan con los horizontes interpretados.

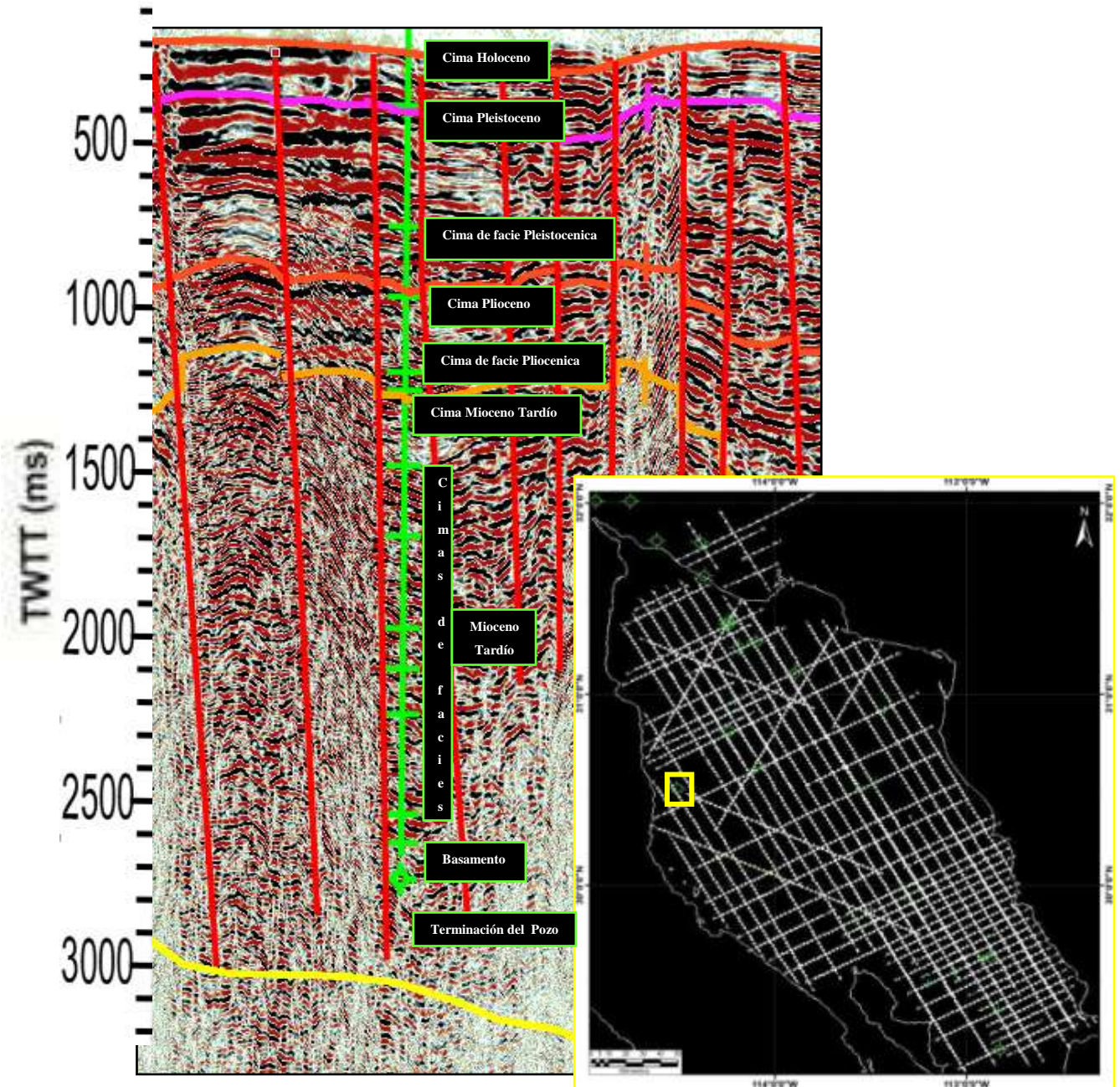


Figura 4.25 Acercamiento de la trayectoria del pozo W2 en la línea 5072, los marcadores del pozo que representan la cima de las secuencias coincidiendo satisfactoriamente con la ubicación de los horizontes interpretados; por otro lado, el pozo incluye a las cimas de las diferentes facies dentro de las secuencias principales, las cuales no fueron correlacionadas en este trabajo. El mapa en la parte inferior derecha muestra dentro del recuadro amarillo la localización del pozo W2.

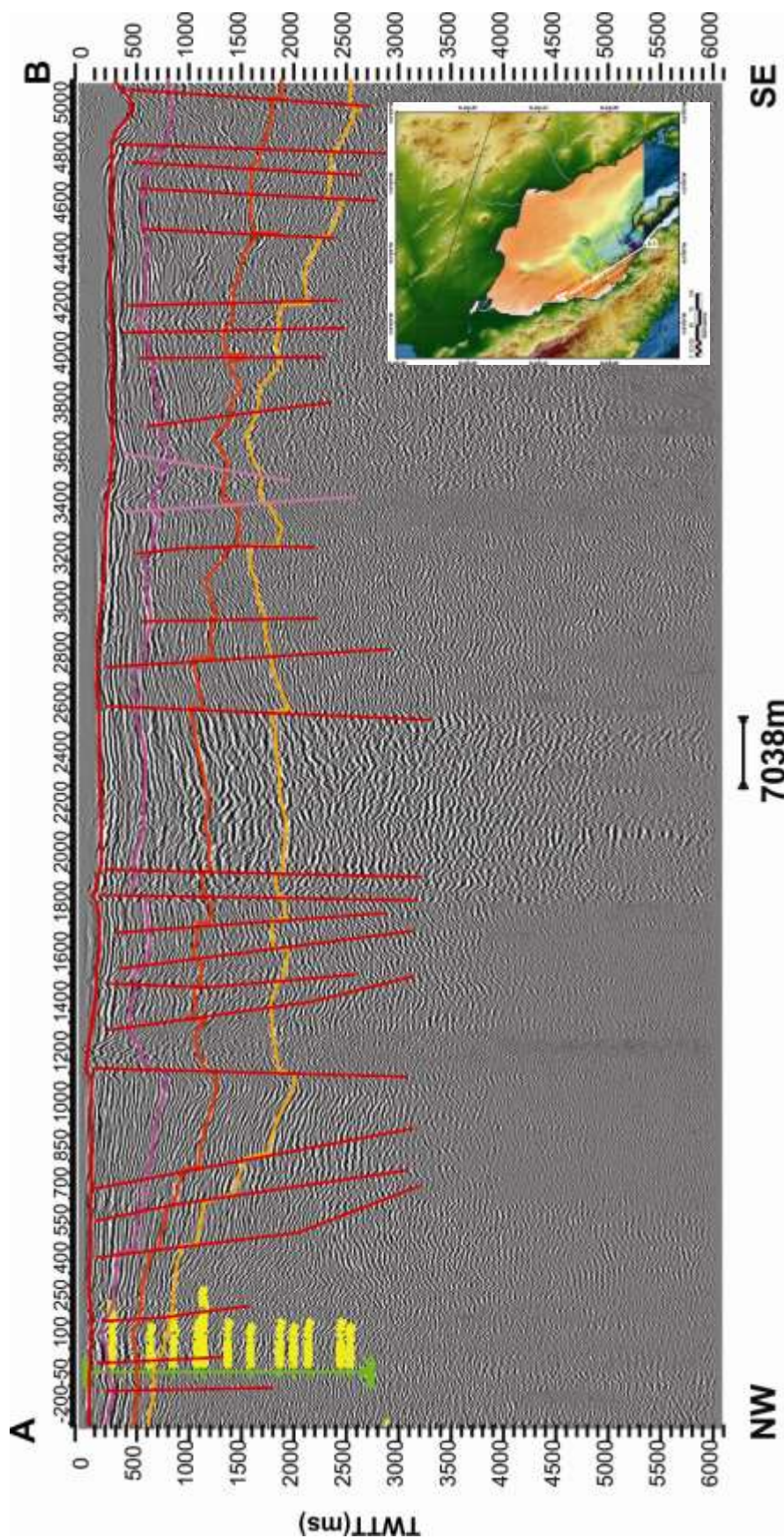


Figura 4.26 Línea 5076 con orientación NW-SE; muestra el pozo W2 y el despliegue de sus cimbras para cada secuencia estratigráfica. Los marcadores ajustan con los horizontes interpretados .

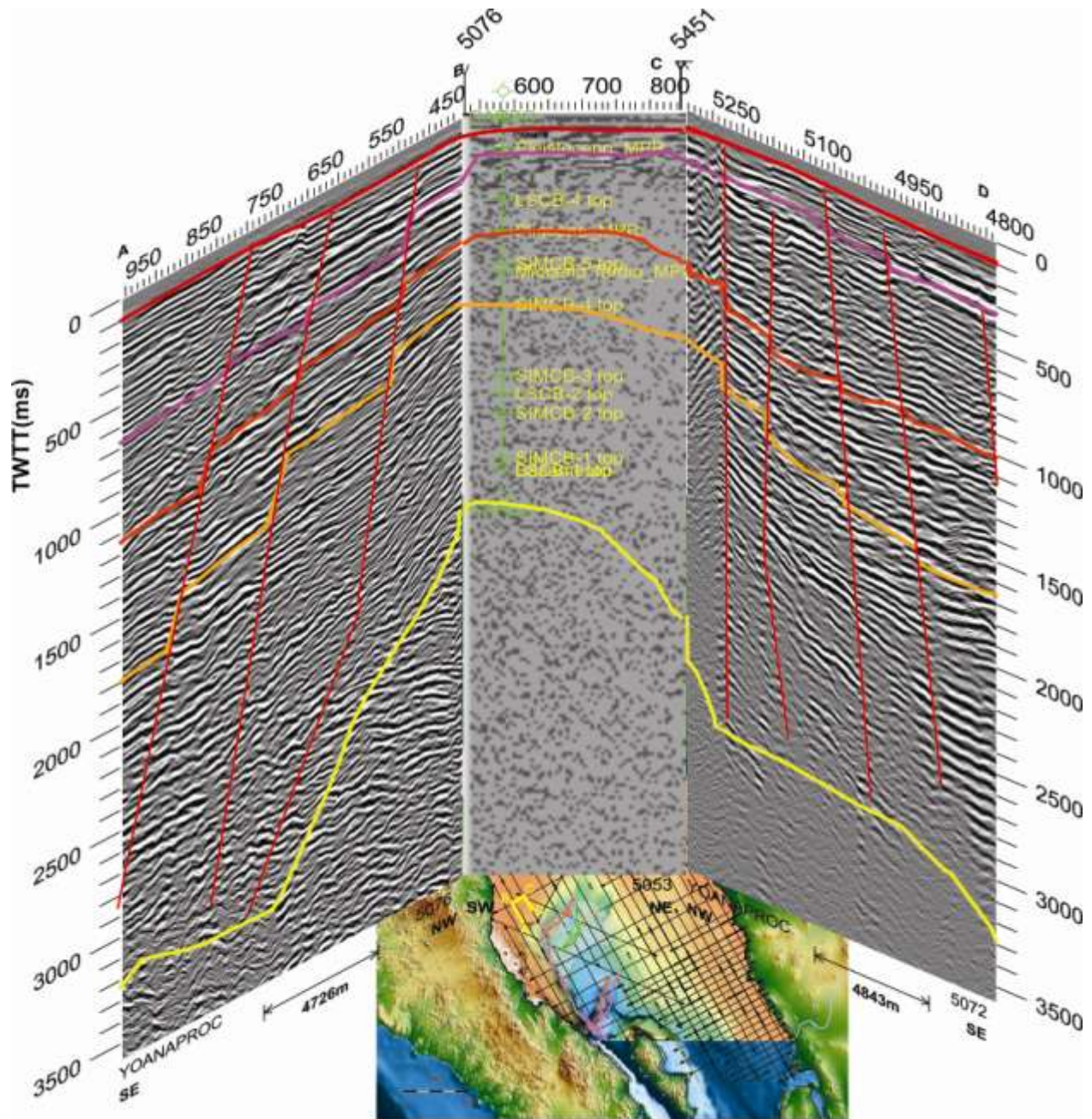


Figura 4.27 Sección en Zig-Zag de las líneas 5076, 5053, 5072 con dirección SE-NW, SW-NE y NW-SE, respectivamente, en donde hay una coherencia en el comportamiento de los reflectores interpretados en los tres segmentos y un ajuste ideal con los datos del pozo W2. El mapa inferior muestra la ubicación de los segmentos A-B-C-D en color amarillo. Nótese que el basamento acústico tiende a subir en el segmento B-C y que el comportamiento de las secuencias esta controlado por el patrón de fallas.

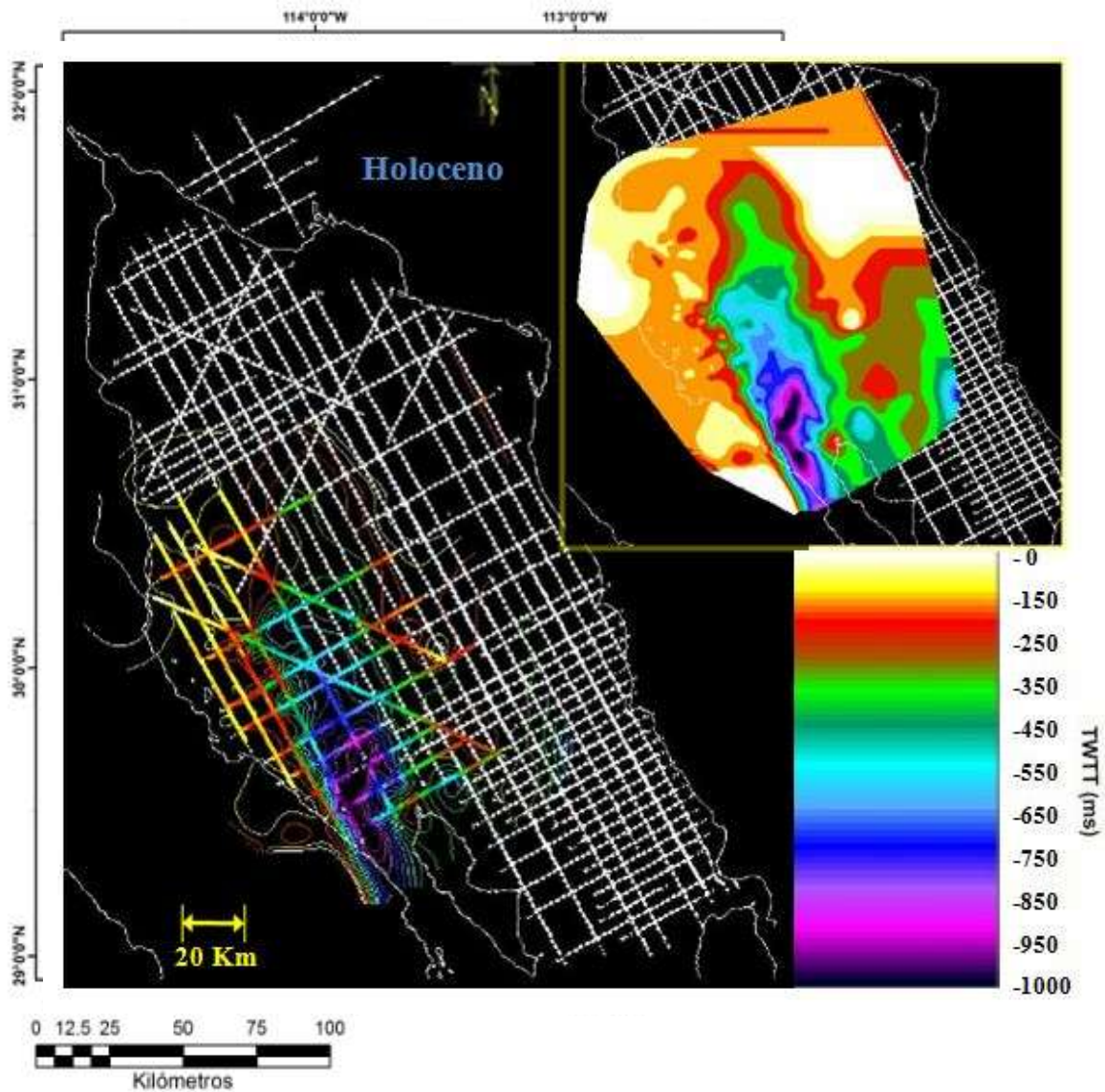


Figura 4.28 Mapa de isolíneas para la secuencia Holoceno, la cima de esta secuencia de sedimentos jóvenes ≤ 1 Ma. es mas somera al oeste, cerca de la línea de costa, con valores en tiempo doble que varían entre 100 y 200 ms máximo hacia el este; al tocar la zona de la Cuenca Delfín Superior toma valores de 284-639 ms, el contraste más fuerte se visualiza al SE acercandose a la Cuenca Delfín Inferior donde profundiza hasta 1,000 ms.

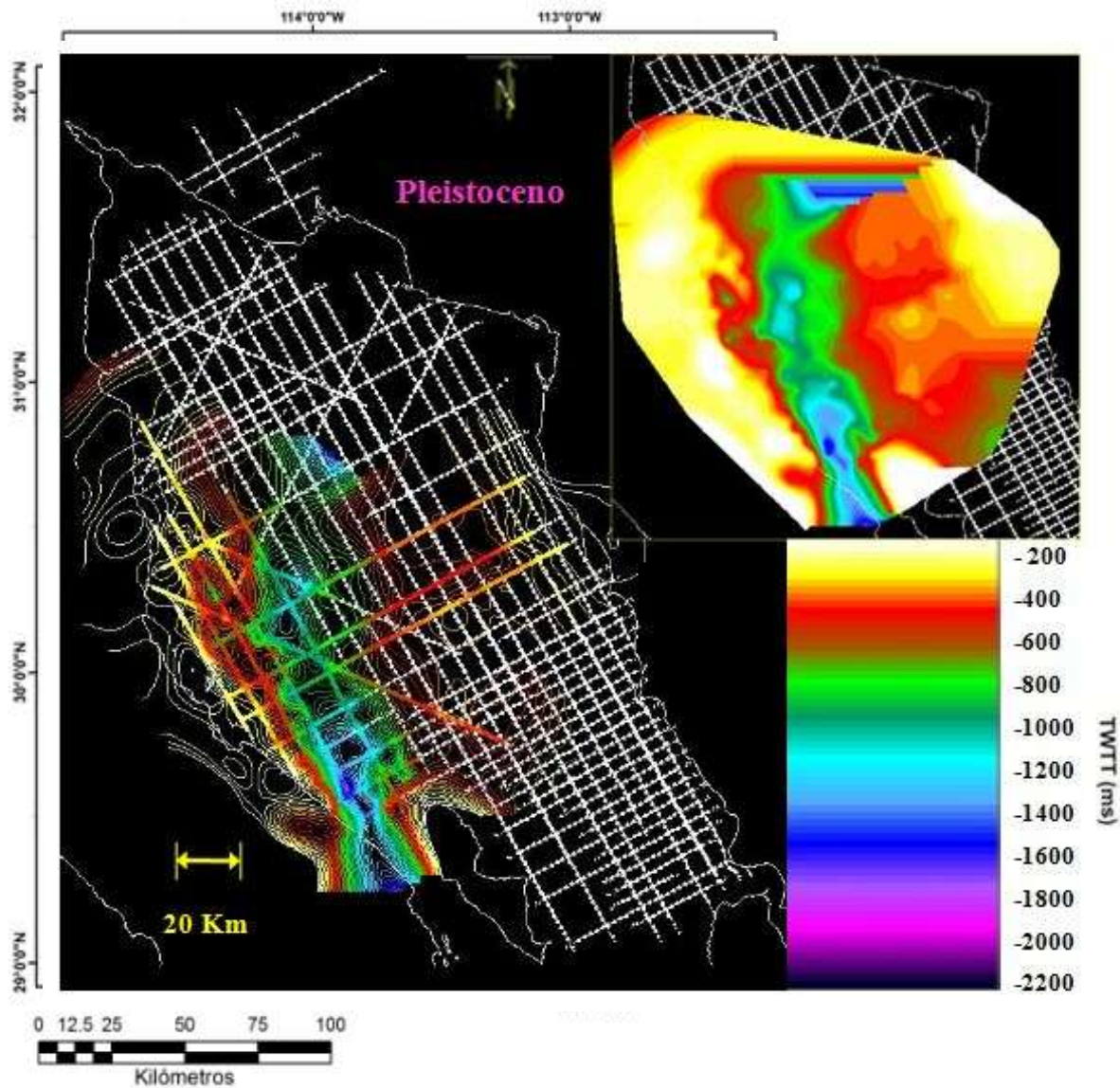


Figura 4.29 Mapa de isolíneas para la secuencia Pleistoceno, los colores en las líneas representan los lugares donde se interpretó y correlacionó el horizonte sismo-estratigráfico, esta secuencia alcanza valores máximos de 2,200 ms al acercarse a la zona de la Cuenca Delfín Inferior y los valores mínimos en las zonas pegadas a la costa peninsular, estas son de aproximadamente 200-600 ms, en la zona de la Cuenca Delfín Superior, los valores característicos están en 650-900 ms.

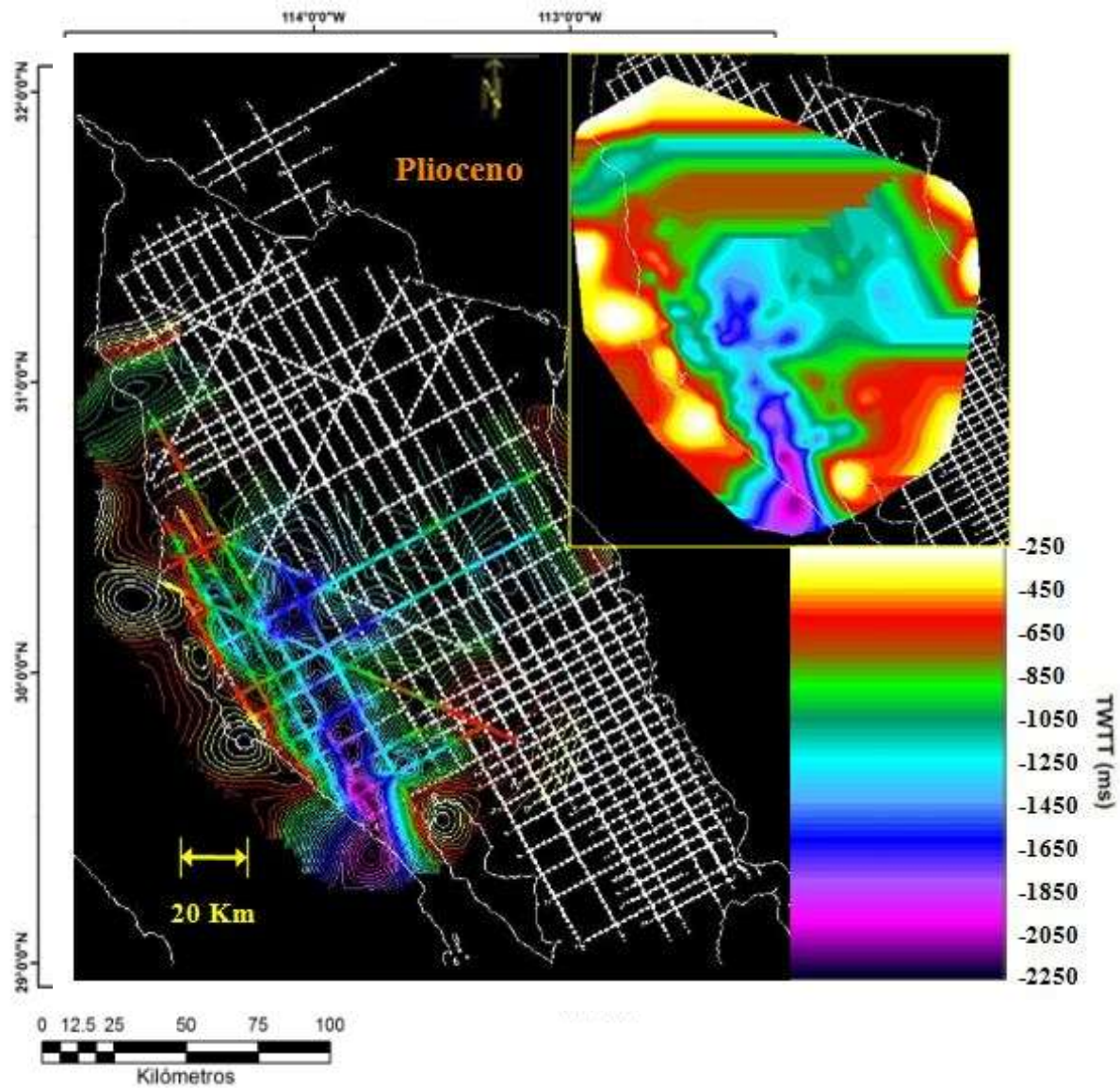


Figura 4.30 Mapa de isolíneas para la secuencia Pliocénica, los colores en las líneas representan los lugares donde se interpretó y correlacionó el horizonte sismo-estratigráfico, esta secuencia tiene valores de que van de 250 – 2,250 ms, los valores más altos forman una línea recta desde Delfín Superior hasta Delfín Inferior, siendo en esta última cuenca donde se alcanza un valor máximo de 2,250 ms, en la zona de costa peninsular los valores son mínimos y están representados en el mapa por los colores amarillo-rojo-verde.

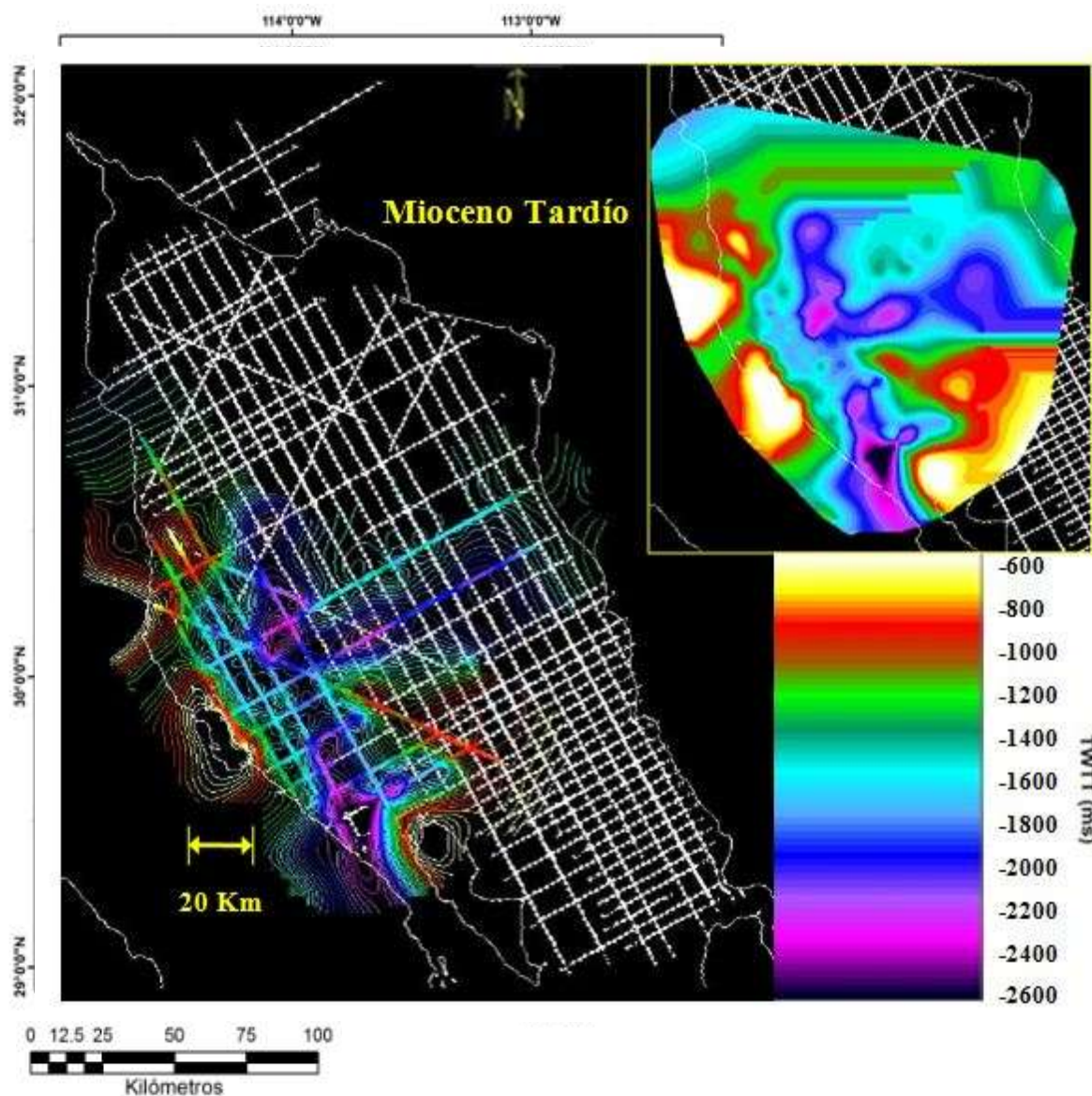


Figura 4.31 Mapa de aislías para la secuencia perteneciente al Mioceno Tardío, este horizonte sismoestratigráfico está caracterizado por espesores mayores de 1,500 ms, su cima alcanza valores que van desde 900 hasta los 2,800 en las zonas más profundas o depocentros de las cuencas, su gran despliegue se debe a el inicio de la incursión marina en la Provincia Extensional del Golfo de California y a toda la carga sedimentaria que se depositó durante esta época. En la secuencia interpretada, así como en los datos de pozo, no se reporta Mioceno Medio, posiblemente debido a una erosión.

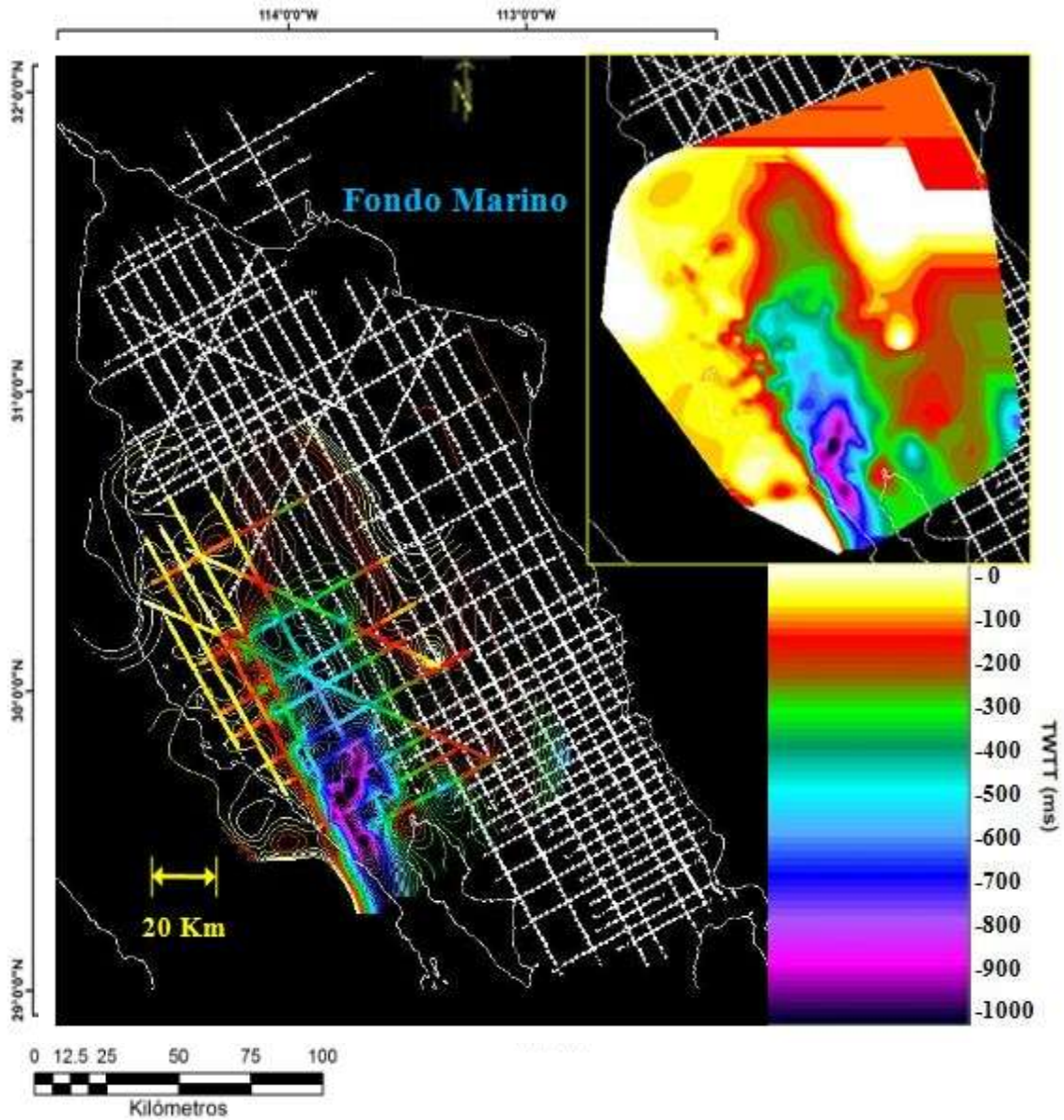


Figura 4.32 Mapa de isolíneas para la configuración batimétrica o del lecho marino, la profundización de el fondo submarino se hace evidente en la zona SW de La Cuenca Delfín Inferior llegando hasta los 1,500 en la línea 5072 y 700 ms en la línea 5076, las líneas pegadas a la margen peninsular presentan una somerización que puede llegar hasta un mínimo de 50 ms y no rebasa los 200 ms. La Cuenca Delfín Superior profundiza hasta a no más de 700 ms.

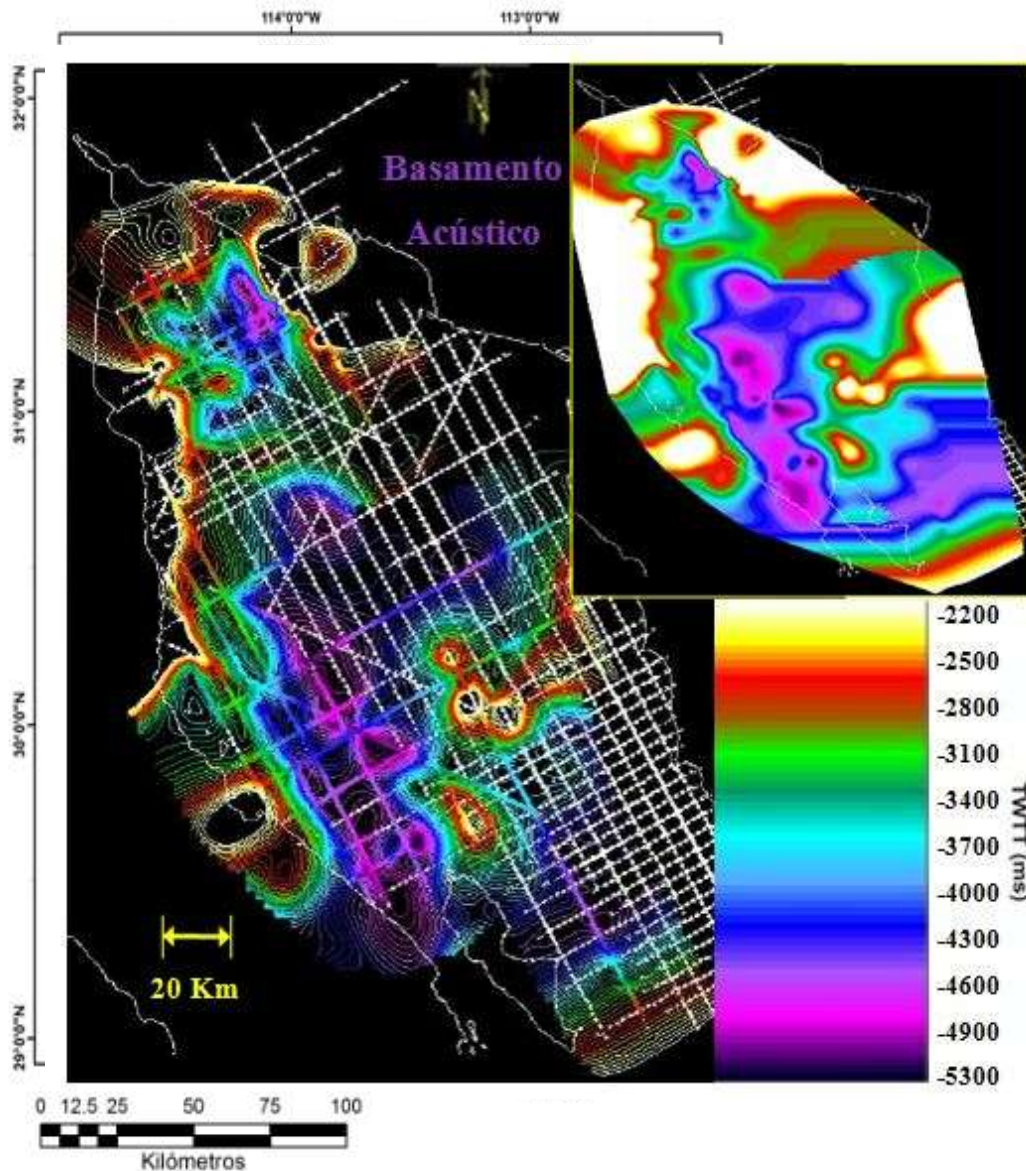


Figura 4.33 Mapa de isófonas para la configuración del basamento acústico; como se visualiza en el mapa, el basamento se presenta desde los 2,500 ms hasta los 5,300 ms. El mapeo del basamento no es tarea fácil, ya que en varias líneas su cima suele ser muy difusa, lo que complica su seguimiento; por esta razón, el mapa que aquí se presenta es solamente una propuesta de la posible ubicación inferida a través de la pérdida de señal en las secciones.

4.3.4 BLOQUE VOLCANICO PUERTECITOS

La península de Baja California se divide en dos zonas separadas por el escarpe principal del Golfo, al oeste la zona estable; es decir, área no fue afectada por la extensión, y al este la zona inestable, con un carácter topográfico mas complejo ocasionado por efectos tectónicos. El bloque volcánico Puertecitos, se ubica dentro del área de la península que fue afectada tectónicamente, en esta zona volcánica el escarpe pierde relieve pero vuelve a recuperarlo hacia el sur.

Uno de los objetivos de este trabajo consistió en la búsqueda de una posible continuación, hacia la zona marina, de la estructura Arroyo-Matomí, reportada por Dokka y Merriam (1982), dicha característica estructural se localiza dentro del continente, como parte del bloque volcánico Puertecitos, acomodando extensión entre dos de los tres dominios de fallamiento propuestos por Dokka y Merriam (1982).

La misma estructura fue explorada recientemente por Persuad *et al.* (2003), utilizando sísmica del proyecto Ulloa, estos datos sísmicos se caracterizaban por su poca penetración (aproximadamente 2km), pero alta resolución. Persuad *et. al* (2003) reportaron una falta de evidencia sobre la continuación de las estructuras mapeadas en continente hacia la parte marina o alguna falla que igualara en dimensión a los grandes *offsets* de las fallas dentro de continente (como por ejemplo el de la Falla San Pedro Mártir) y especulando que las estructuras marinas reflejan un regimen diferente y mas reciente de esfuerzos en comparación con las estructuras continentales, pero dejando abierta la posibilidad de que, utilizando sísmica más profunda, se pudiera encontrar algun rasgo que indicara la presencia de la continuación de la estructura Arroyo-Matomí.

Dentro de las secciones analizadas para este trabajo y teniendo un alcance de la sísmica hasta los 6 km, no se encontró evidencia alguna de la continuación de la estructura Arroyo-Matomí y el patrón de fallas es muy distinto a el que presenta la zona continental, a lo que se concluye que, posiblemente, la estructura fué borrada por el tectonismo reciente y se toma a la falla Volcanes (límite entre las placas Norteamericana y Pacífica) como la falla actualmente dominante, dicha estructura normal-oblicua (desplazamiento lateral derecho) corre a lo largo de la costa peninsular con un rumbo que cambia de NNW-SSE en su extremo norte a NW-SE en su parte sur, funciona como límite oeste de las Cuencas Delfín Superior y Delfín Inferior, genera

varias ramificaciones de fallas, despliega varias zonas con actividad volcánica y acomoda deformación en los paquetes sedimentarios.

La estratigrafía de Puertecitos se obtuvo a través de la información del pozo W2, estas secuencias están correlacionadas bioestratigráficamente; a continuación se muestra una lista que incluye las divisiones realizadas, las cuales se encuentran ordenadas desde los sedimentos más recientes hasta el basamento cristalino:

1. Una alternancia de estratos de lutita, limolita y arenisca del Mioceno Tardío (depósitos marinos de ambiente nerítico), Plioceno y Pleistoceno. No se encuentra Mioceno Medio en las líneas, ni en los datos de pozo, posiblemente esta secuencia fue erosionada durante el levantamiento del basamento. El Plioceno Tardío representa un periodo de actividad volcánica importante que ha sido fechado entre 3.2 y 2.5 Ma en esta provincia (Martín-Barajas *et al.*, 1995). La fuente de este evento volcánico se ubica actualmente bajo el mar, frente a la parte central de esta provincia (Martín-Barajas *et al.*, 1997).
2. Rocas volcánicas del Terciario, representadas por andesitas porfídicas.
3. Basamento granítico Mesozoico clasificado como diorita cuarcífera (PEMEX, 1982), con edades inferidas del Cretácico Tardío, concordante con las edades del Batolito Peninsular (Ortega-Gutierrez *et al.*, 2007).

La Figura 4.34 muestra dos líneas, ambas con dirección NW-SE, siendo estas la 5076 y la 5072, las secuencias estratigráficas están inclinadas hacia el E y las fallas buzan también hacia esta dirección, lo que contrasta con la dirección de la estructura de acomodo Arroyo-Matomí (representada en el mapa en color negro), o del comportamiento que se esperaría si existiera una continuación de esta. La figura también incluye la interpretación de los depocentros de las cuencas del norte y de las fallas principales que fueron reportadas por Persuad *et al.*(2003).

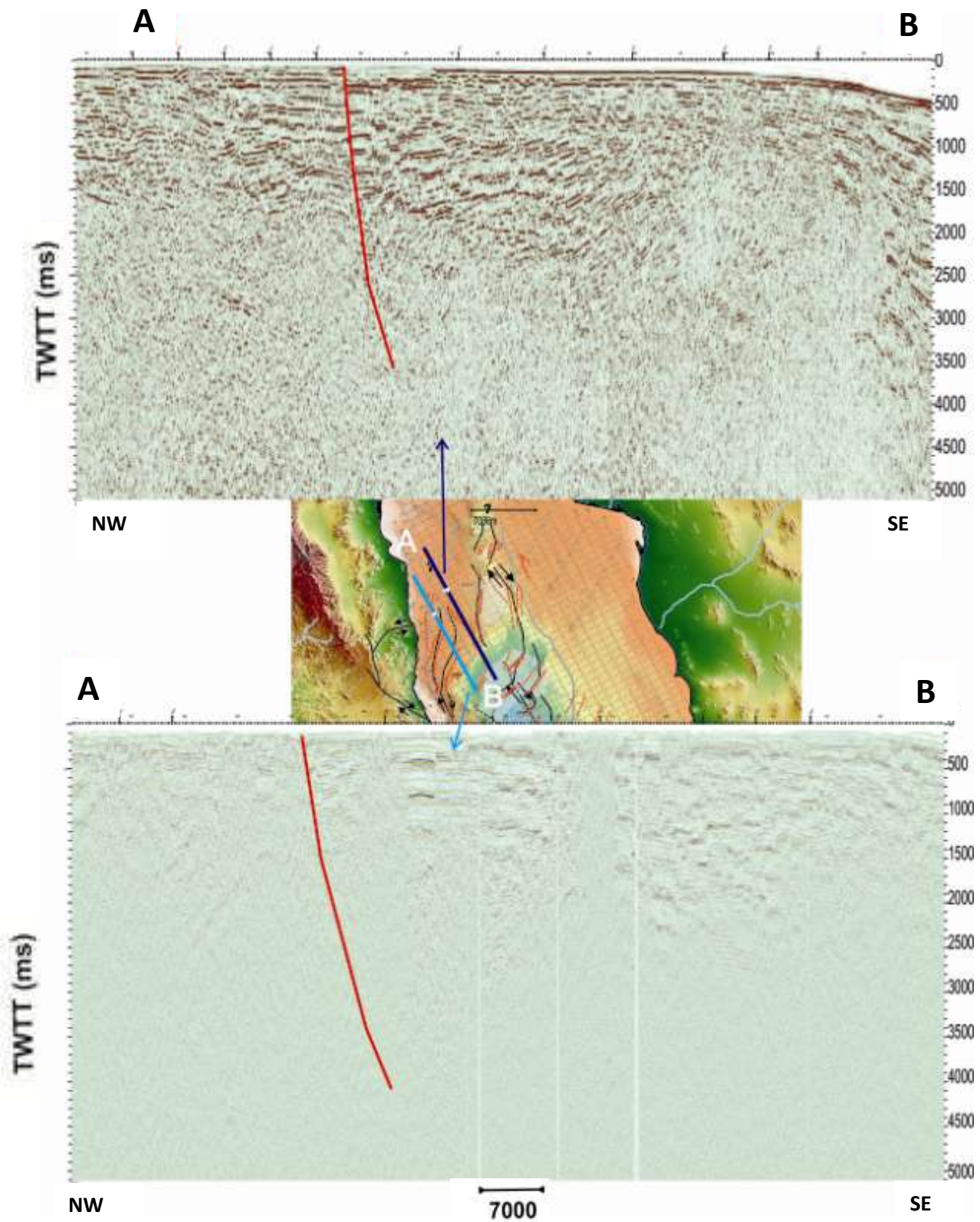


Figura 4.34 Línea 5076 y 5072 que muestran una falla que controla estructuralmente el área de estudio, con una echado al Este, inclinando a las secuencias sedimentarias hacia esa misma dirección, lo que contrasta con lo que se esperaría si existiera la continuación de la estructura Arroyo-Matomí.

CAPÍTULO V

DISCUSIONES

5.1 INTRODUCCIÓN

La Provincia Extensional del Golfo de California es un ejemplo de transición de *rifting* continental y oceánico (extensión cortical) a dispersión de piso oceánico. Las cuencas en todo el Golfo de California son producidas por un sistema extensional oblicuo en el cual la deformación a rumbo se acomoda en fallas transformes en el sur y en fallas de rumbo y oblicuas derechas en el norte (Fenby y Gastil, 1991; Nagy y Stock, 2000; Stock, 2000).

Las cuencas del norte, se han desarrollado en la frontera entre las placas Norteamérica-Pacífico y están caracterizadas por contener una alta densidad de fallas, haber acumulado grandes espesores sedimentarios desde el Mioceno provenientes del río Colorado y ser zonas anchas y someras, en donde la deformación está distribuida en varias zonas de *rift* dominadas por fallamiento normal y oblicuo derecho (Persaud *et al.*, 2003).

A través del procesado de cuatro líneas con dirección NW-SE, más la utilización complementaria de ocho líneas transversales SW-NE, dos E-W y una paralela a la costa del Golfo de California, procesadas por Aragon-Arreola (2007) y González-Escobar (2006), se analizó e interpretó una malla sísmica de aproximadamente 7,254 km², localizada al Noroeste del Golfo de California, abarcando a las cuencas de *rift* Consag, Delfín Superior y Delfín Inferior con el objetivo de conocer la estructura y los rasgos principales que dominan la zona, además de contribuir a la base de datos procesados y trabajados por: Persaud *et al.* (2003), Aragón-Arreola (2007); González-Escobar *et al.* (2006), Aguilar Campos (2007); Pérez-Tinajero (2007); Pérez-Hernández (2008) y Martínez-Hernández (2009).

Este trabajo presenta una nueva interpretación sobre los principales rasgos estructurales y estratigráficos, encontrados en el sector noroeste del Golfo de California, los resultados incluyen los siguientes puntos:

- 1) El patrón de fallas y sus características principales.
- 2) La configuración de horizontes sismoestratigráficos, que representan a las cimas de las secuencias del Terciario y Cuaternario.
- 3) La profundidad del lecho marino y su comportamiento a lo largo del área de estudio.
- 4) Una propuesta inferida para la configuración del basamento acústico.

- 5) El análisis para determinar si existe una continuación de la estructura Arroyo-Matomí hacia la zona marina y,
- 6) Discusión sobre el carácter de la corteza en el sector noroeste del Golfo de California.

5.2 FALLAS

- ❖ La densidad de fallas dentro de las secciones analizadas es alta, aproximadamente se encontraron cuatro fallas por cada kilómetro, pero solamente se interpretaron las de carácter regional y de mayor tamaño, lo que disminuyó considerablemente su densidad.
- ❖ Las fallas muestran una configuración característica de zonas transtensivas; es decir, el patrón estructural, está representado por fallas normales de ángulo moderado, casi verticales y semiparalelas entre ellas, que a su vez generan fallas antitéticas con buzamiento e inclinación de los estratos en sentido contrario, a la dirección de la tendencia regional. En la parte NW de los perfiles sísmicos por lo general las fallas presentan una ligera caída hacia el E y en el sector SE un echado hacia el W.
- ❖ En la parte central de algunos perfiles sísmicos, se logran ver algunas estructuras en forma de flor negativa característica de ambientes de extensión con desplazamiento lateral, las fallas secundarias dentro de estas estructuras convergen en profundidad hacia una zona de falla única y tienen un comportamiento mixto de tipo transcurrente-normal, por lo cual se puede decir que la zona interior está extendiéndose y además está siendo sometida a hundimiento, este proceso es producto de una compensación volumétrica. La convergencia de las fallas hacia la parte central acomoda subsidencia en el área, por este motivo, se deduce que la interacción de las fallas con las secuencias sedimentarias juega un papel fundamental en la morfología de las cuencas del norte del Golfo de California.
- ❖ Las fallas comienzan su despliegue alrededor de los 200 ms o menos, cuando las fallas están presentes en regiones someras o cuando cortan la superficie del piso marino, es un indicador relativo de que la zona es activa tectónicamente, ya que los sedimentos han sido recientemente cortados.

En general se interpretaron alrededor de dos fallas/5km, de las cuales se correlacionaron siete principales a lo largo de la malla sísmica. A continuación se hará una breve descripción de las siete estructuras correlacionadas dentro del área de estudio.

- **Falla Volcanes:** La falla Volcanes forma parte del límite entre las placas Norteamérica y Pacífico, y se considera como la falla activa actualmente dominante, dicha estructura normal-oblicua (lateral derecha) presenta un rumbo que cambia de NW-SE en su parte sur a NNW-SSE en su extremo norte y buza hacia el ENE a lo largo de la costa peninsular (Fig. 5.1). Esta falla presenta una longitud cercana a los 100 km y acomoda deformación mayor en los paquetes sedimentarios, además genera ramificaciones de fallas a lo largo de su extensa longitud, funcionando como una estructura de “cola de caballo (*horse tail splay*)” en su parte norte, esta falla presenta actividad volcánica y funciona como límite oeste de las cuencas Delfín Superior e Inferior. En las secciones sísmicas puede ser mapeada hasta los 3,000 ms lo que equivale aproximadamente a 3,000 km.
- **Falla Volcanes Norte 1:** La falla Volcanes Norte 1 funciona como límite norte de la Cuenca Delfín Superior, tiene una longitud de 40 km y presenta un rumbo SW-NE con un buzamiento preferencial al SE. Esta falla normal es una ramificación de la falla maestra Volcanes (Fig. 5.1).
- **Falla Volcanes Norte 2:** La falla Volcanes Norte 2 cruza a la cuenca Delfín Superior, su extensión no supera los 50 km, presenta la misma configuración de rumbo y buzamiento que la falla Volcanes 1 y también parece ramificarse de la estructura principal Volcanes (Fig. 5.1).
- **Falla Volcanes Sur:** Limita a la Cuenca Delfín Superior en su parte sur, su extensión es mayor por algunos kilómetros a la de las fallas Volcanes Norte 1, Volcanes Norte 2 y Delfín superior Central. Como muestra la Figura 5.1, esta falla presenta una forma curva cóncava hacia el NW, cambia de rumbo aproximadamente SW-NE a N-S, del sur al

norte, respectivamente, con un buzamiento al NW contrario a la tendencia de la fallas Volcanes Norte1, Volcanes Norte2 y Delfín Superior Central.

- **Falla Delfín Superior Central:** Esta falla tiene un rumbo SW-NE y buza hacia el SE, atraviesa el depocentro de la Cuenca Delfín Superior y, su extensión, rumbo e inclinación es similar al de las fallas Volcanes Norte 1 y Volcanes Norte 2 (Fig. 5.1).
- **Falla Delfín Inferior Este:** Funciona como límite este de la Cuenca Delfín Inferior, corre en dirección SW-NE y tiene un buzamiento hacia el NW, con una extensión aproximada de 80 km (Fig. 5.1).
- **Falla Delfín Inferior Oeste:** Funciona como límite oeste de la Cuenca Delfín Inferior, igual que la falla Delfín Inferior Este, presenta un rumbo SW-NE pero con un buzamiento opuesto, es decir hacia el SE, su longitud es de aproximadamente de 70 km (Fig. 5.1).

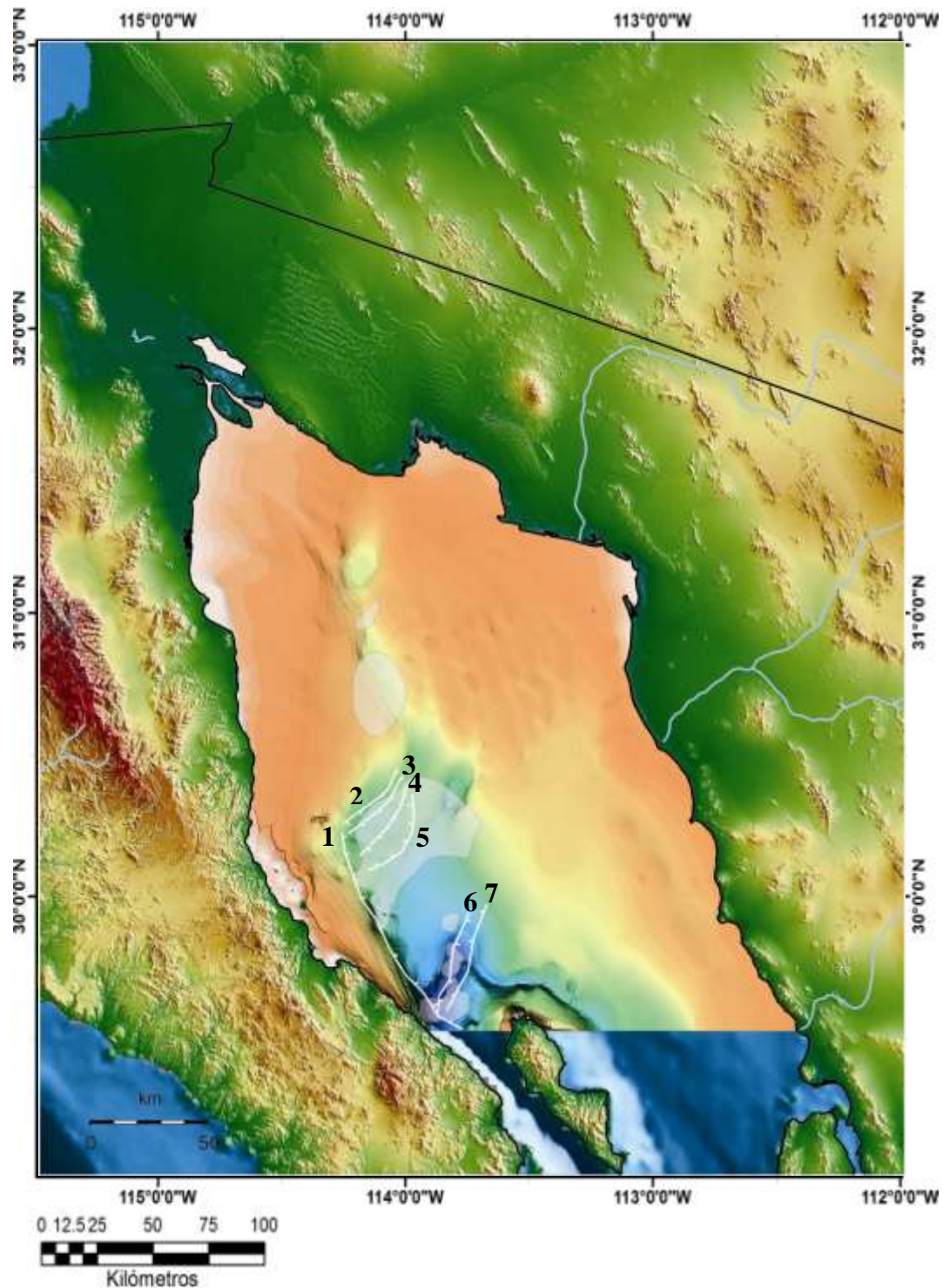


Figura 5.1 Distribución de las siete fallas interpretadas y correlacionadas en el área de estudio, representadas en el mapa por los siguientes números: 1) Volcanes, 2) Volcanes Norte 1, 3) Volcanes Norte 2, 4) Delfín Superior Central, 5) Volcanes Sur, 6) Delfín Inferior Oeste y 7) Delfín Inferior Este. El mapa también incluye la interpretación de los depocentros de las cuencas del norte realizada por Persuad *et al.* (2003).

5.3 HORIZONTES SISMO-ESTRATIGRÁFICOS

Se definieron y correlacionaron cuatro horizontes sismoestratigráficos, representando a las cimas de los límites de secuencias pertenecientes a Holoceno, Pleistoceno, Plioceno y Mioceno Tardío, los cuales fueron ajustados con los datos del pozo W2 propiedad de Petróleos Mexicanos, para definir una posición correcta de los mismos. A continuación, se presenta la descripción del comportamiento de las secuencias en el área de estudio, la cual se obtuvo a través del análisis sismoestratigráfico llevado a cabo en el presente trabajo.

- **Holoceno:** La cima de esta secuencia de sedimentos jóvenes ≤ 1 Ma., es más somera al oeste, cerca de la línea de costa (Fig.4.28), con valores en tiempo doble que varían entre 100 a 200 ms como máximo hacia el este; al tocar la zona de la Cuenca Delfín Superior alcanza valores de 284-639 ms, el contraste más fuerte se visualiza al SE, acercándose a la Cuenca Delfín Inferior, donde profundiza hasta 1,000 ms. Estos cambios en la profundidad de los horizontes están controlados por las fallas presentes que fragmentaron y siguen acomodando subsidencia en las secuencias sedimentarias.
- **Pleistoceno:** Esta secuencia alcanza valores máximos de 2,200 ms al acercarse a la zona de la Cuenca Delfín Inferior y los valores mínimos en las zonas pegadas a la costa peninsular, alcanzando aproximadamente 200-600 ms, en la zona de la Cuenca Delfín Superior los valores característicos están entre 650-900 ms.
- **Plioceno:** Esta secuencia tiene valores que varían 250-2,250 ms, los valores más altos forman una línea recta desde Delfín Superior hasta Delfín Inferior, siendo en esta última cuenca donde se alcanza un valor máximo de 2,250 ms; en la zona de costa peninsular los valores son mínimos y son de 450 ms aproximadamente.
- **Mioceno Tardío:** Este horizonte sismoestratigráfico está caracterizado por espesores de 1500 ms, su cima alcanza valores que van desde 900 hasta los 2800 en las zonas más profundas o depocentros de las cuencas, su gran despliegue se debe al inicio de la incursión marina en la Provincia Extensional del Golfo de California y a toda la carga sedimentaria que se depositó durante esta época. En la secuencia interpretada, así como en los datos del pozo W2, no reportan sedimentos del Mioceno Medio, posiblemente debido a una erosión.

5.4 FONDO MARINO

El comportamiento de la batimetría en el área de estudio y la profundización del fondo submarino, se hace evidente en la zona SW de la Cuenca Delfín Inferior, llegando hasta los 1,500 ms (aproximadamente equivalente a 1,500 m) en la línea 5072 y 700 ms en la línea 5076, las líneas pegadas a la margen peninsular, presentan una somerización que puede llegar hasta un mínimo de 50 ms y no rebasa los 200 ms. La Cuenca delfín Superior profundiza hasta a no más de 700 m. La historia genética de la Provincia Extensional del Golfo, se traduce en la formación de cuencas someras con gran amplitud en el norte y profundas y estrechas al sur, desarrolladas en la frontera entre las placas Pacífico y Norteamérica. Esta geometría se ve reflejada en el cambio de posición del lecho marino (Fig. 5.2).

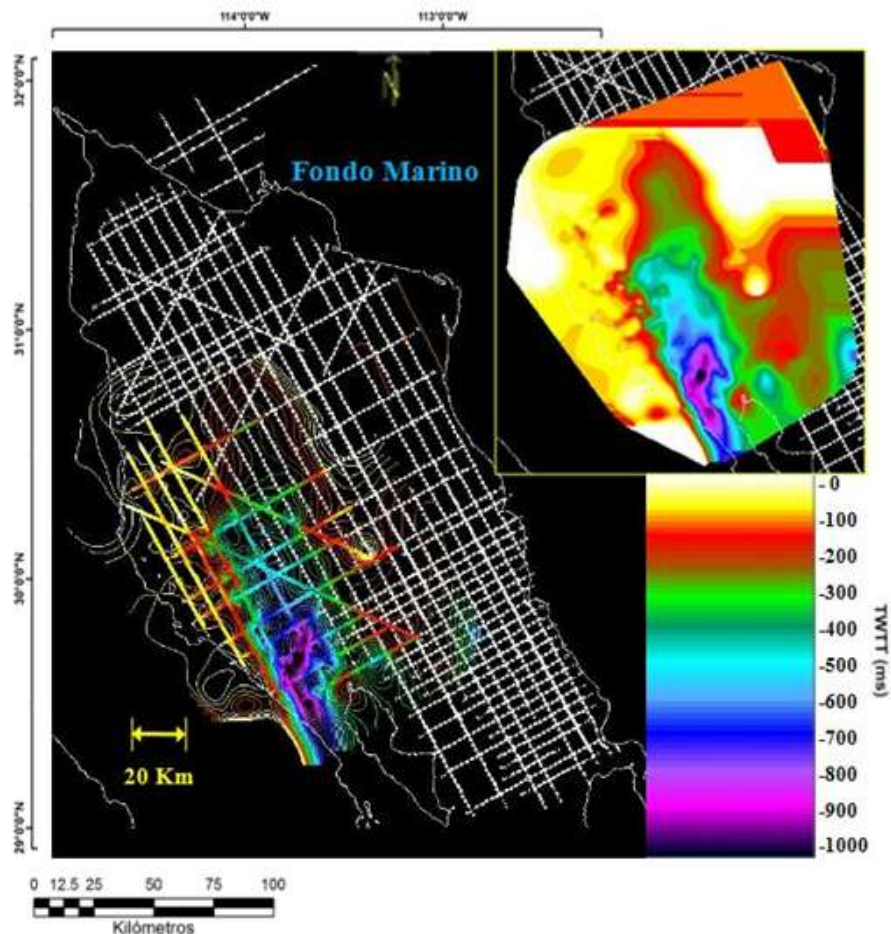


Figura 5.2 Configuración final del Fondo Marino para el área de estudio. Los colores indican el tiempo doble en milisegundos en el que se encuentra el lecho marino, siendo los amarillos los más bajos y los purpura los máximos (no rebasan los 1,000 ms). Cabe mencionar que la equivalencia de milisegundos y metros, es de uno a uno aproximadamente.

5.5 BASAMENTO ACÚSTICO

El basamento se presenta, por lo general, desde los 2500 ms hasta los 5300 ms. El mapeo del basamento no es tarea fácil, ya que en varias líneas su cima suele ser muy difusa, lo que complica su seguimiento, por esta razón el mapa que aquí se presenta es solamente una propuesta de la posible ubicación inferida a través la pérdida de señal en las secciones (Fig. 5.3).

De acuerdo a la columna del pozo W2 propiedad de PEMEX, el basamento cristalino es de caracter granítico y fué clasificado como una diorita-cuarcífera del Cretácico Superior (PEMEX, 1982), relacionado al volcanismo de arco producto de la subducción de la placa Farallón bajo el borde de Norteamérica, generando la intrusión ígnea del batólito peninsular (informe inedito PEMEX, 2006).

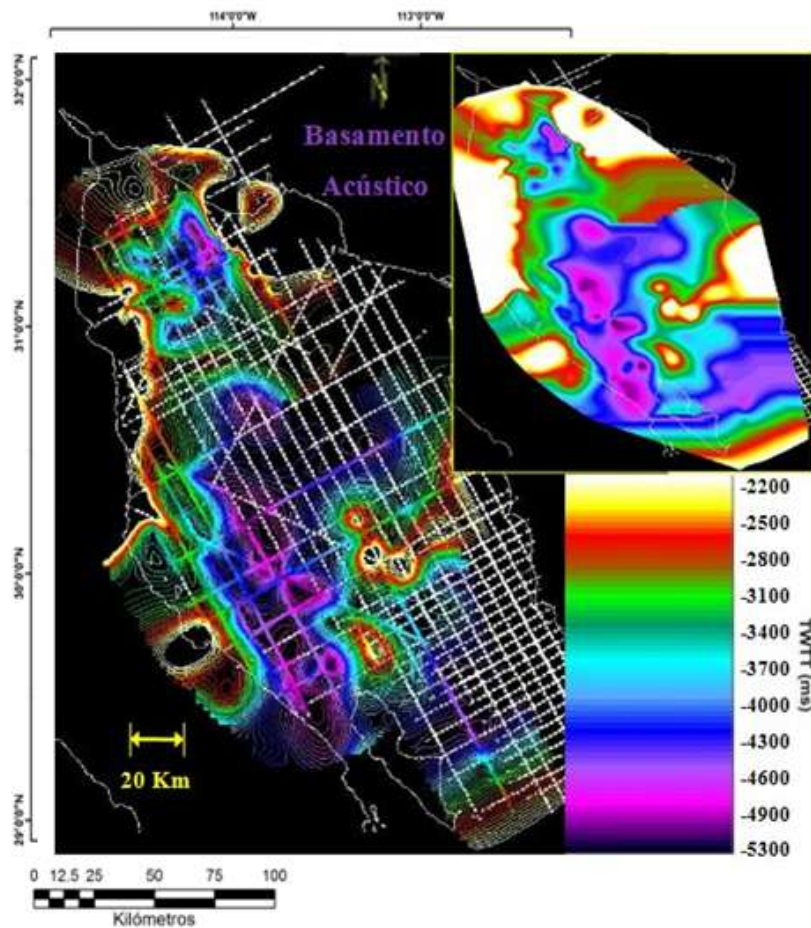


Figura 5.3 Configuración final para el basamento acústico en el área de estudio. Los colores indican el tiempo doble al que se encontró el basamento acústico en las secciones analizadas para este trabajo.

5.6 BLOQUE VOLCÁNICO PUERTECITOS/ ESTRUCTURA ARROYO-MATOMÍ

No se encontró evidencia de una continuación hacia la zona marina de la estructura Arroyo-Matomí, reportada por Dokka y Merriam (1982) y buscada con anterioridad por Persuad *et al.* (2003). Esta característica estructural localizada dentro del continente, como parte del bloque volcánico Puertecitos, acomodó extensión entre dos de los tres dominios de fallamiento propuestos por Dokka y Merriam (1982), pero actualmente no juega un papel importante en la tectónica dentro del Golfo de California.

Las líneas analizadas muestran un contraste entre las estructuras continentales y las marinas en cuanto al patrón de fallas y no existe algún rasgo con el que se pueda correlacionar a la estructura Arroyo-Matomí. Por ejemplo, en las líneas 5076 y 5072 aparece una falla de gran longitud que controla la estructura de la zona, con un echado al este, basculando a las secuencias sedimentarias hacia esa misma dirección, lo que contrasta con lo que se esperaría encontrar si existiera la continuación de la estructura en discusión.

Con base en lo anterior, se concluye que, posiblemente la estructura fue borrada por tectonismo reciente y no juega hoy en día un papel importante dentro del noroeste del Golfo de California, debido a esto se considera aquí a la Falla Volcanes como la falla activa actualmente dominante la cual acomoda la deformación entre los paquetes sedimentarios y funciona además como límite entre las placas Norteamérica y Pacífica.

5.7 CORTEZA DEL NOROESTE DEL GOLFO DE CALIFORNIA ¿OCEÁNICA O CONTINENTAL?

El desplazamiento lateral derecho neto; tanto en el norte como en el sur del Golfo de California, inició a los 6.3 Ma., el cual acumuló el mayor desplazamiento hacia el NW 255 ± 10 km, a esta distancia se le suman 41 ± 13 km para determinar el desplazamiento total (Oskin *et al.*, 2001). Debido al adelgazamiento cortical generado por esta separación, se desarrollaron dorsales oceánicas menores dentro del Golfo de California a los 3.5 Ma., dando como resultado la formación de corteza oceánica en la boca del Golfo (Demets, 1995; Lonsdale, 1989). Por otra parte, Persuad *et al.* (2003) establecieron que el norte del Golfo de California carece de corteza oceánica “sensu stricto” ya que no presenta anomalías magnéticas simétricas y no se ha documentado corteza oceánica.

Entonces, si la Provincia Extensional del Golfo de California ha experimentado la misma cantidad de extensión con una componente lateral derecha, en su parte norte y sur, ¿por qué no hay evidencia de un sistema de dispersión de fallas transformes en el norte y si en el sur?, ¿por qué el norte del Golfo de California muestra más un carácter de *rift* que uno de expansión marina?, ¿qué hace diferente al norte del sur?, estas preguntas pudieran ser respondidas si tomamos en cuenta la gran influencia del delta del Río Colorado en las cuencas del norte del Golfo de California. El peso de la capa sedimentaria aportada por este delta pudiera estar retrasando la generación de piso oceánico y generando transiciones en la composición de la corteza. Dorsey (2010) propone que las cuencas transtensionales del noroeste del Golfo de California, incrustadas en el sistema de falla de San Andrés, han sido rellenadas por el delta del Río Colorado desde hace 5-6 Ma. y que los sedimentos aportados por éste son rápidamente sepultados, calentados y mezclados con intrusiones en las cuencas profundas formando una nueva generación de corteza reciclada a lo largo del límite de placa activo. El depósito de sedimentos tiene un efecto de enfriamiento, aunado a esto, el estilo estructural del norte del Golfo de California compuesto por fallas oblicuas y normales transfiere menos calentamiento a la corteza continental que el sistema de fallas transformes en el sur (Persuad *et al.*, 2003).

Uno de los objetivos principales de este estudio consistió en la búsqueda de alguna evidencia de piso oceánico en la malla sísmica del noroeste del Golfo de California, traducido en términos geofísicos, un indicador de la presencia de corteza oceánica serían velocidades $\geq 5,500$ m/s. Ninguna de las secciones analizadas presentó estas características requeridas, por lo que se interpreta aquí que dentro del área de estudio la corteza es de carácter continental adelgazado a transicional y no hay corteza oceánica aún. Cabe mencionar que el alcance de la sísmica utilizada en esta interpretación es de ~ 6 km, lo cual deja la puerta abierta a la opción de que a mayor profundidad pueda existir la tan buscada evidencia de piso oceánico.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

El procesado y la interpretación de líneas sísmicas marinas de reflexión 2D multicanal propiedad de PEMEX permitieron establecer el comportamiento estructural y estratigráfico del área de estudio situada en el noroeste del Golfo de California.

Se proponen siete estructuras principales para la zona: 1) Falla Volcanes, 2) Falla Volcanes Norte 1, 3) Falla Volcanes Norte 2, 4) Falla Delfín Superior Central, 5) Falla Delfín Superior Sur, 6) Falla Delfín Inferior Este y, 7) Falla Delfín Inferior Oeste. El patrón estructural en el área de estudio, está definido por estas fallas normales y oblicuas de bajo ángulo que inclusive, en algunos casos, son casi verticales, todas con rumbo SW-NE. La tendencia regional de las estructuras presenta buzamiento hacia el NW, aunque debido a la generación de fallas antitéticas el buzamiento se vuelve mixto (NW y SE). La estructura dominante es la falla Volcanes conformando parte del límite entre las placas Norteamérica y Pacífico, dicha estructura normal-oblicua (lateral derecha) presenta un rumbo que cambia de NW-SE en su parte sur a NNW-SSE en su extremo norte y buza hacia el ENE a lo largo de la costa peninsular. Esta falla presenta una longitud cercana a los 100 km y acomoda deformación mayor en los paquetes sedimentarios; además, funciona como una estructura de “cola de caballo (*horse tail splay*)” de la cual se ramifican las otras seis fallas correlacionadas en este trabajo. Se determinó que la zona oeste del Norte del Golfo de California es activa ya que las estructuras cortan en superficie el lecho marino. Las fallas activas de este sistema occidental empezaron a fragmentar a las cuencas del norte del Golfo de California desde el Plioceno, controlando así la morfología y subsidencia actual de estas.

De acuerdo a los sedimentos encontrados en las secciones sísmicas y a los datos del pozo W2 propiedad de PEMEX, las cuencas comenzaron a abrirse desde el Mioceno. No se encontró Mioceno Medio en la columna estratigráfica del pozo W2, a lo que se infiere una discordancia erosional ocasionada por los ciclos progradantes del Río Colorado seguido de una regresión que depositó ~ 1,500 km de sedimento perteneciente al Mioceno Tardío, este último paquete sedimentario es claramente visible en las secciones analizadas. De acuerdo a los mapas de isopacas aquí presentados para el Holoceno, Pleistoceno, Plioceno, Mioceno, basamento acústico y fondo marino, se determina para todos un aumento en su profundidad al acercarse a la Cuenca

Delfín Inferior. La geometría irregular de las secuencias se debe al efecto del patrón de fallas normales y oblicuas que dominan el área, lo que genera algunos levantamientos en las secuencias pero principalmente hundimientos. Por otro lado, el espesor de las secuencias es regular en las cercanías de la costa peninsular, mayor en los depocentros de las cuencas Delfín Superior e Inferior y finalmente tienden a acunarse hacia el este.

Por otra parte, no se encontró evidencia de la continuación hacia la zona marina de la estructura continental: “Arroyo-Matomí”, perteneciente al Bloque Volcánico Puertecitos y, se concluye que actualmente no juega un papel importante en el noroeste del Golfo de California ya que posiblemente fue borrada por el tectonismo reciente.

Finalmente, no se documentó corteza oceánica en el área de estudio, lo que implica que la corteza puede ser de carácter continental adelgazado a transicional, debido posiblemente a la cercanía con el delta del Río Colorado y su gran aporte sedimentario hacia las cuencas del norte del Golfo de California; es decir, el peso de la capa sedimentaria pudiera estar retrasando la generación de piso oceánico y generando transiciones en la composición de la corteza.

BIBLIOGRAFÍA.

Aguilar-Campos, C. 2007. Sísmica de reflexión en el alto Golfo de California (Tesis de Maestría en Ciencias). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE). México, 90 p.

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

Aragón-Arreola, M., A. Martín-Barajas., y M.J. Stock. 2003. Tectonic implications of abandoned and active basin architecture in the northern Gulf of California rift. Mexico. Geological Society of America, 21 p.

Aragón-Arreola, M., y A. Martín-Barajas. 2007. Westward migration of extension in the northern Gulf of California, México.

Badley, M.E. 1985. Practical Seismic Interpretation. IHRDC. Boston, 185 p.

Bischoff y Henyey. 1973. Tectonic Elements of the Northern Part of the Gulf of California. Geological Society of America, 315-330 p.

DeMets, C.A. 1995. Reappraisal of seafloor spreading lineations in the Gulf of California: Implications for the transfer of Baja California to the Pacific plate and estimates of Pacific-North America motion. Geophysical Research Letters, 3545-3548 p.

Dokka y Merriam. 1982. Late Cenozoic extensión of the northeastern Baja California, Mexico. Geological Society of America Bulletin. v.93, 371-378 p.

Dorsey, R.J., Fluette, A., McDougall, K.A., 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*. v. 35, 57–60 p.

Dorsey. 2010. Sedimentation and crustal recycling along an active oblique-riftmargin: Salton Trough and northern Gulf of California. *Geology*. no. 5; 443–446 p.

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

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

Fletcher, J.M., M. Grove, D. Kimbourg, O. Lovera y G.E. Gehrels. 2007. Neogene tectonic evolution of the magdalena shelf and southern gulf of california: insights from detrital zircon u-pb ages from the magdalena fan and adjacent areas. *Geological Society of America Bulletin*.

Fuis, G.S., y Kohler, W.M. 1984. Crustal structure y tectonics of the Imperial ValleyRegion, California. *Pacific Section S.E.P.M.* 1-13 p.

Gans, P.B. 1997. Large-magnitude Oligo-Miocene extension in southern Sonora: Implications for the tectonic evolution of northwest Mexico. *Tectonics*. 388-408 p.

Gastil, G., Morgan, G.J., y Krummenacher, D. 1978. Mesozoic history of peninsular California y related areas east of the Gulf of California: in *Mesozoic Paleogeography of the Western United States*. Pacific Section Society of Economic Paleontologists y Mineralogists, California, U.S.A. 107-116 p.

González-Escobar M., Martín-Barajas, A., Abdeslem-García, J., y Aragón-Arreola, M. 2006. Evolución Tectonoestratigráfica de las Cuencas del Norte del Golfo de California, Procesamiento e interpretación de datos de sísmica de reflexión. Reporte técnico 410303843, PEMEX. 23 p.

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

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

Helenes, J., Carreño, A.L., y Carrillo, R.M. 2009. Middle to late Miocene chronostratigraphy y development of the northern Gulf of California, *Marine Micropaleontology*. 10–25 p.

Hernández-Pérez, J. A. 2008. Estructura y estratigrafía en las cuencas Wagner y Consag, Golfo de California, a partir de sísmica de reflexión. Tesis de maestría en ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. 100 p.

Larson, P.A., Mudie, J.D., y Larson, R.L. 1972. Magnetic anomalies and fracture-zone trends in the Gulf of California. *Geol. Soc. Am. Bull.* 83. 3361-3368 p.

Lee, J., Miller, M.M., Crippen, R., Hacker, B., y 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*. 505-525 p.

Liner, C.L. 2004. *Elements of 3D seismology*. Penwell Co. Segunda Edición. Tulsa, Oklahoma, 608 p.

Lizarralde, D., Axen G. J. 2007. Variation in styles of rifting in the Gulf of California. *Nature* 448: doi:10.1038.

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

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

Martín-Barajas, A., Vazquez-Hernandez, S., Carreño, A.L., Helenes, J., Suárez-Vidal, F., y Alvarez-Rosales, J. 2001. Late Neogene stratigraphy and tectonic control on facies evolution in the Laguna Salada Basin, northern Baja California, Mexico. *Sedimentary Geology*. 5-35 p.

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

McQuillin, R., Bacon, M., y Barclay, W. 1979. *An introduction to seismic interpretation*. Gulf Publishing Company. Houston. 199 p.

Molnar, P. 1988. Continental tectonics in the aftermath of plate tectonics. *Nature*. 131-137 p.

Moore, D.G. 1973. Plate-edge deformation and crustal growth, Gulf of California Structural Province. *Geol. Soc. Am. Bull.* 84. 1883-1906 p.

Nagy, E.A., y J.M. Stock. 2000. Structural controls on the continent-ocean transition in the northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*. 16,251-16,269 p.

Oskin, M. y M.J. Stock. 2003. Pacific-North America plate motion and opening of the Upper Delfín basin, northern Gulf of California, Mexico. *Geological Society America Bulletin*. 1173-1190 p.

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

Pacheco-Romero, M. 2004. Estructura y evolución de la Cuenca de Altar, Sonora, a partir de la integración de datos geofísicos y geológicos. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, B.C. 124 p.

Pérez Tinajero, C. I. 2007. Sísmica de reflexión en el Desierto de Altar, Sonora, México. Tesis de maestría en ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C. México. 101 p.

Persaud, P. 2003. Images of Early Continental Breakup in and around the Gulf of California and the Role of Basal Shear in Producing Wide Plate Boundaries. Thesis Doctor of Philosophy, California Institute of Technology. 144 p.

Persaud, P., J.M. Stock, M. Steckler, A. Martin-Barajas, J.B. Diebold, A. Gonzalez-Fernandez y G. Mountain. 2003. Active deformation and shallow structure of the Wagner, Consag and Delfin Basins, Northern Gulf of California, Mexico. *Journal of Geophysical Research*. 2355 p.

Sheriff R.E. y Gerald, L.P. 1995. *Exploration Seismology*. Cambridge University Press. Segunda Edición. New York. 592 p.

Sheriff, R.E., 1980. *A First Course In Geophysical Exploration and Interpretation*. 80-89 p.

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

Stock, J.M., y Lee, J. 1994. Do microplates in subduction zones leave a geological record? *Tectonics*. 1472-1487 p.

Stock, J. M., 2000. Relation of the Puertecitos Volcanic Province, Baja California, Mexico, to the development of the plate boundary in the Gulf of California. Cenozoic tectonics y volcanism of Mexico. Geological Society of America Special Paper. 143-156 p.

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

Yilmaz, O. 1987. *Seismic Data Processing. Investigations in Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists. Segunda Edición. Tulsa, Oklahoma. 526 p.

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