



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Instituto de Geofísica

03060

9

**Modelo Estructural de la Cuenca Wagner
en el Golfo de California basado en Sísmica
de Reflexión Multicanal**

T E S I S

para obtener el grado de
Maestría en Ciencias de la tierra
(Sismología)

P R E S E N T A

Angel David Hurtado Artunduaga

Director de Tesis

Dr. Carlos Mortera Gutiérrez

México, D F

Octubre 2002

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. Antecedentes	5
2.1 Conceptos generales de zonas de extensión	5
2.2. Tectónica regional	7
2.3. Geología Cuenca Wagner	10
2.4. Estudios geofísicos al Norte del Golfo de California	11
3. Metodología	14
3.1. Sísmica de reflexión	14
3.1.1 Adquisición sísmica	14
3.1.2 Procesamiento sísmico	19
3.1.3 Digitalización sísmica	27
3.2. Análisis estructural y secuencias estratigráficas	28
3.2.1 Correlación sismoestratigráfica	28
3.2.2. Correlación estructural	28
4. Resultados	32
4.1. Secciones sísmicas	32
4.1.1 Datos sísmicos PEMEX-80	34
4.1.2 Datos sísmicos ULLOA-99	35
4.2. Fallamiento	37
4.2.1 Secciones PEMEX-80	39
4.2.2 Secciones ULLOA-99	48
4.3. Horizontes sismoestratigráficos	52
4.3.1 Unidad A	53
4.3.2. Unidad B	57
4.3.3 Unidad C	58
4.3.4 Unidades profundas en PEMEX-80	58

5. Estructura y Estratigrafía	61
5.1 Estructura de la Cuenca Wagner	61
5.1.1. Falla Wagner	63
5.1.2. Deformación asociada a la Falla Wagner	64
5.2. Fallamiento al Norte y NW de la Falla Wagner	65
5.3. Sismoestratigrafía Cuenca Wagner	68
5.4. Estructura regional alrededor de la Cuenca Wagner	70
5.4.1. Falla Cerro Prieto	70
5.4.2. Dominio Estructural Wagner Cerro-Prieto	71
5.4.3. Cuenca Consag	72
CONCLUSIONES	74
REFERENCIAS	77
ANEXOS	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.	Localización de la Cuenca Wagner	2
Figura 1.2.	Líneas sísmicas utilizadas en el presente estudio y marco estructural del Golfo de California	4
Figura 2.1.	Mapa estructural del Norte de Baja California y Golfo de California	8
Figura 3.1.	Geometría de la adquisición sísmica en áreas marinas	15
Figura 3.2.	Registros sísmicos de áreas marinas de la línea 10	17
Figura 3.3.	Componentes de la traza sísmica ideal y real de campo	21
Figura 3.4.	Análisis de velocidad bajo el método <i>Velocidad Constante</i>	23
Figura 3.5.	Análisis de velocidad bajo el método <i>Espectro de Semblanza</i>	25
Figura 3.6.	Corrección de NMO usando modelo de velocidades	26
Figura 4.1.	Diagrama panel mostrando la variación en densidad del fallamiento entre las secciones orientadas SW-NE y NW-SE	36
Figura 4.2.	Mapa estructural de la Cuenca Wagner utilizando los datos Sísmicos ULLOA-99 y PEMEX-80	38
Figura 4.3.	Cartografía del fallamiento regional alrededor de la Cuenca Wagner utilizando los datos sísmicos PEMEX-80	40
Figura 4.4.	Dominios estructurales diferenciados con las secciones de PEMEX-80	41
Figura 4.5.	Falla Wagner, pliegues <i>rollover</i> y las unidades sismoestratigráficas en el bloque de techo de la Falla Wagner, en la sección 5037 de PEMEX-80	42
Figura 4.6.	Velocidades Intervalo a ambos costado de la Falla Wagner	45
Figura 4.7.	Plano de la Falla Cerro Prieto en la sección 5037 de PEMEX-80	47
Figura 4.8.	Dominios estructurales diferenciados con las secciones ULLOA-99	50

Lista de Figuras (Continuación)

Figura 4.9. Correlación de las discordancias vistas en las secciones sísmicas ULLOA-99, para el 1 s de tiempo doble	54
Figura 4.10. Unidades sismiestratigráficas en el costado Oeste de la Cuenca	59
Figura 5.1. Mapa estructural de la Cuenca Wagner, zona de acomodación y Dominio estructural Wagner Cerro Prieto	62
Figura 5.2. Rampa de relevo al Oeste de la Cuenca Wagner	67

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1.	Principales parámetros de adquisición de los datos sísmicos de PEMEX-80	18
Tabla 3.2.	Principales parámetros de adquisición de los datos sísmicos de ULLOA-99	19
Tabla 4.1.	Filtrado usado por el IMP en el procesamiento de los datos de PEMEX-80	34

ANEXOS

ANEXO 1.	<i>Programas de Computadora Personal: Seismic Unix y Visul Sunt</i>	83
ANEXO 2.	<i>Programa para Estación de Trabajo. LandMark</i>	84
ANEXO 3.	<i>Secciones ULLOA-99. Dirección NW-SE 3, 6a, 6b, 8, 10, 22</i>	85
ANEXO 4.	<i>Secciones ULLOA-99 Dirección SW-NE 2, 21_2, 23</i>	92

Agradecimientos

Agradezco al Posgrado Ciencias de la Tierra por darme la oportunidad de realizar mi maestría. Expreso mis más sinceros agradecimientos a mis asesores de este estudio, al Dr. Carlos Mortera Gutiérrez del Instituto de Geofísica y al Dr. Antonio González Fernández del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), porque han sido mis amigos y consejeros en los momentos difíciles.

Quiero agradecer a la Dirección General de Estudios de Posgrado (DGEP) y a la Organización de los Estados Americanos (OEA) por creer en mi capacidad profesional y académica apoyando económicamente mi estancia en este país durante todo el período de mis estudios.

Agradezco muy cordialmente al CICESE por abrirme sus puertas y acogerme como uno de sus estudiantes durante el desarrollo de mi tesis. Aprovecho para dar mil gracias a los demás investigadores que estuvieron pendientes de mi trabajo en esta institución y por brindarme su ayuda: Dr. Arturo Martín Barajas, Dr. Juan Contreras Pérez y MC Manuel Aragón Arreola, ya que sus comentarios y consejos oportunos hicieron posible que el desarrollo de mi trabajo me permitieran crecer personal y profesionalmente. No podría dejar de mencionar la valiosa ayuda y apoyo del grupo administrativo de la División Ciencias de la Tierra, en especial Lupita Martínez, Mary Carmen Pérez, Ana Rosa Soto y la Sra. Martha E. Barrera. Un afectuoso agradecimiento también a los estudiantes Dulce, Idalmis, Yanina, Selene, Martín, Edgardo, Jazmín y Juan Carlos.

No podría olvidar darle gracias al Dr. Thierry Calmus, al Dr. René Chávez, al Dr. William Bandy y al Dr. Gustavo Tolson, por sus comentarios y apreciaciones.

Estoy muy agradecido con Dios y con mi familia, que sólo con sus oraciones y energía han logrado que permanezca constante en el logro de mis objetivos académicos y profesionales.

También doy gracias a Patricia Valdez Llamas por darme su compañía y apoyo. Gracias a Lucy Mora, Araceli Chaman, Mónica Salgado, Patricia Carrasco, Elia y Gabriel por su ayuda y amistad.

Por último quiero agradecer a la interminable lista de amigas y amigos y a todos los que de una u otra forma ayudaron a impulsar y animar el desarrollo de esta noble causa.

*A mi mamá Liliba, a mi papá Angel, a mi abuelita
Tulia y a mis queridos hermanos Beatriz y Oscar
Este gran logro de mi vida ha sido gracias a sus oraciones y entusiasmo
que me regalan día a día, y al tesón que me han inculcado
para luchar y alcanzar las metas que me he trazado en la vida*

*Comprender las cosas que nos rodean
es la mejor preparación
para comprender las cosas que hay mas allá*

HIPATIA
(aprox. 370-aprox. 415, D.C.)

Modelo Estructural de la Cuenca Wagner en el Golfo de California basado en sismica de reflexión multicanal

Angel David Hurtado Artunduaga
Instituto de Geofísica - UNAM

Resumen

En este trabajo se presenta un estudio de la estructura de la Cuenca Wagner en el Norte del Golfo de California. Los datos fuente son secciones de sismica de reflexión multicanal adquiridas en las campañas ULLOA-1999 con 1 s de penetración en tiempo doble (TD) y secciones sísmicas de PEMEX-1980 con 6 s de penetración en TD.

La Cuenca Wagner es una depresión NNE-SSW de ~30 km de larga, ~20 km de ancha y está cubierta por un tirante de agua máximo de ~210 m. La parte Este de la cuenca está cortada por la traza de la Falla Wagner en dirección ~N23E. Hacia la parte Oeste de esta falla, la cuenca está dominada por flexión de los horizontes sismoestratigráficos, los cuales están afectados por un fallamiento secundario antitético y sintético asociado a la Falla Wagner, que ocasionan pliegues de tipo rollover. La Cuenca Wagner además está influenciada por un grupo de fallas en el borde NW de la Cuenca, que transfieren la deformación al sistema de Falla Cerro Prieto (SFCP). La Falla Wagner es la principal estructura que controla la subsidencia del semigraben que conforma la Cuenca Wagner. La Falla Wagner con dirección ~N23E tiene una geometría lítrica buzando en su parte somera ~79° al NW y disminuye gradualmente a profundidad ~58° a 0.6 s de TD y ~28° después de ~1.8 s de TD. El fallamiento antitético y sintético tiene longitudes de trazas menores a 10 km y una dirección NE. La mayoría de estas fallas tienen componente lateral oblicua. La tendencia de migración de los depocentros en la Cuenca Wagner es hacia el NNE-NE, lo que sugiere que el fallamiento ha migrado en esa misma dirección como respuesta a una constante actividad de la Falla Wagner. En el borde NW de la Cuenca Wagner el fallamiento tiene una dirección N-NNE buzando preferentemente hacia el E. Su relación con la Falla Wagner es incierta. Sin embargo, se interpreta que este fallamiento es una prolongación hacia el SSE de un dominio estructural al NNW de la Cuenca Wagner, definido en este estudio como Dominio Estructural Wagner-Cerro Prieto (DWCP). Aparentemente es de naturaleza transcurrente, por el cual se transfiere la deformación hacia SFCP de dirección NW-SE. La parte S de la conexión entre DWCP y SFCP (~31.35N) limita dos segmentos de actividad del SFCP. Hacia el SE, el sistema tiende a ser inactivo, mientras que hacia el NW, el segmento del SFCP presenta evidencias de actividad reciente. Bajo estas condiciones tectónicas, la Cuenca Wagner está limitada por dos sistemas transcurrentes, al N por DWCP y al S por el fallamiento NW-SE de la Cuenca Consag, lo cual sugiere que la subsidencia de la Cuenca Wagner está relacionada con la deformación por extensión de una cuenca *pull-apart*.

1. INTRODUCCION

El límite entre las placas Norteamérica y Pacífico a lo largo del Golfo de California está controlado por un amplio sistema extensional oblicuo [Lonsdale, 1989; Fenby et al., 1991; Nagy et al., 2000] que acomoda básicamente dos tipos de desplazamiento: Uno perpendicular y el otro en dirección paralela al movimiento relativo entre las dos placas. Estos sistemas se encuentran bien desarrollados desde la parte media del Golfo (27.5° N) hacia el Sur (Figura 1.1). En esta región está incluida la boca del Golfo, en el cual se genera piso oceánico a partir de la Cuenca Alarcón [Lonsdale, 1989; Lonsdale, 1995; DeMets, 1995; Nagy y Stock, 2000; Stock, 2000] Esto contrasta con la parte media y Norte del Golfo, donde la deformación se encuentra distribuida en una región más amplia con múltiples zonas de rift controladas por fallas normales y oblicuas [Persaud et al., 2002]. Esta arquitectura da lugar a numerosas cuencas sedimentarias desarrolladas en corteza continental sin un registro claro de anomalías magnéticas, que evidencien una verdadera corteza oceánica [Lonsdale, 1989; Nagy y Stock, 2000; Stock, 2000], ya que hacia el Norte de la Cuenca Alarcón la corteza oceánica se infiere sólo por batimetría [Lonsdale, 1989] La región Norte también se caracteriza por una fuerte sedimentación proveniente de diversas fuentes del centro y Norte del Golfo, principalmente del Río Colorado, que enmascara los rasgos estructurales presentes en el basamento. En el caso de la Cuenca Wagner en el extremo Norte del Golfo, la sedimentación proviene principalmente del Río Colorado. Hasta el presente no hay un estudio que explique claramente estos contrastes geológicos y cómo el campo de esfuerzos controla la subsidencia regional. Varios de estos factores se tratarán en este estudio, siendo el objetivo principal aportar una primera descripción de la arquitectura estructural y de la sismoestratigrafía de la Cuenca Wagner, para lo cual se propone un modelo de la tectónica que pudo haber dado origen y que controla la cuenca, y una descripción semidetallada de la sismoestratigrafía reciente presente en la cuenca. Se tiene como base el análisis e interpretación de datos sísmicos de reflexión multicanal, provenientes de dos campañas geofísicas: PEMEX-80 (6 s de registro tiempo doble) y ULLOA-99 (2 s de registro tiempo doble).

El área de estudio es la Cuenca Wagner (Figura 1.1). Es la cuenca más septentrional de la provincia extensional del Golfo de California y se considera una zona difusa de deformación transtensional en el Norte del Golfo [Nagy y Stock, 2000] Específicamente está localizada en el extremo Norte del Golfo de California, en las coordenadas geográficas 30.8° y 31.2° Norte y 114.4° y 113.9° Oeste (Figura 1.1), abarcando un área de ~700 km². Morfológicamente, la cuenca es una depresión semielíptica con un eje mayor de ~40 km en dirección NNE y un eje menor de ~20 km en dirección

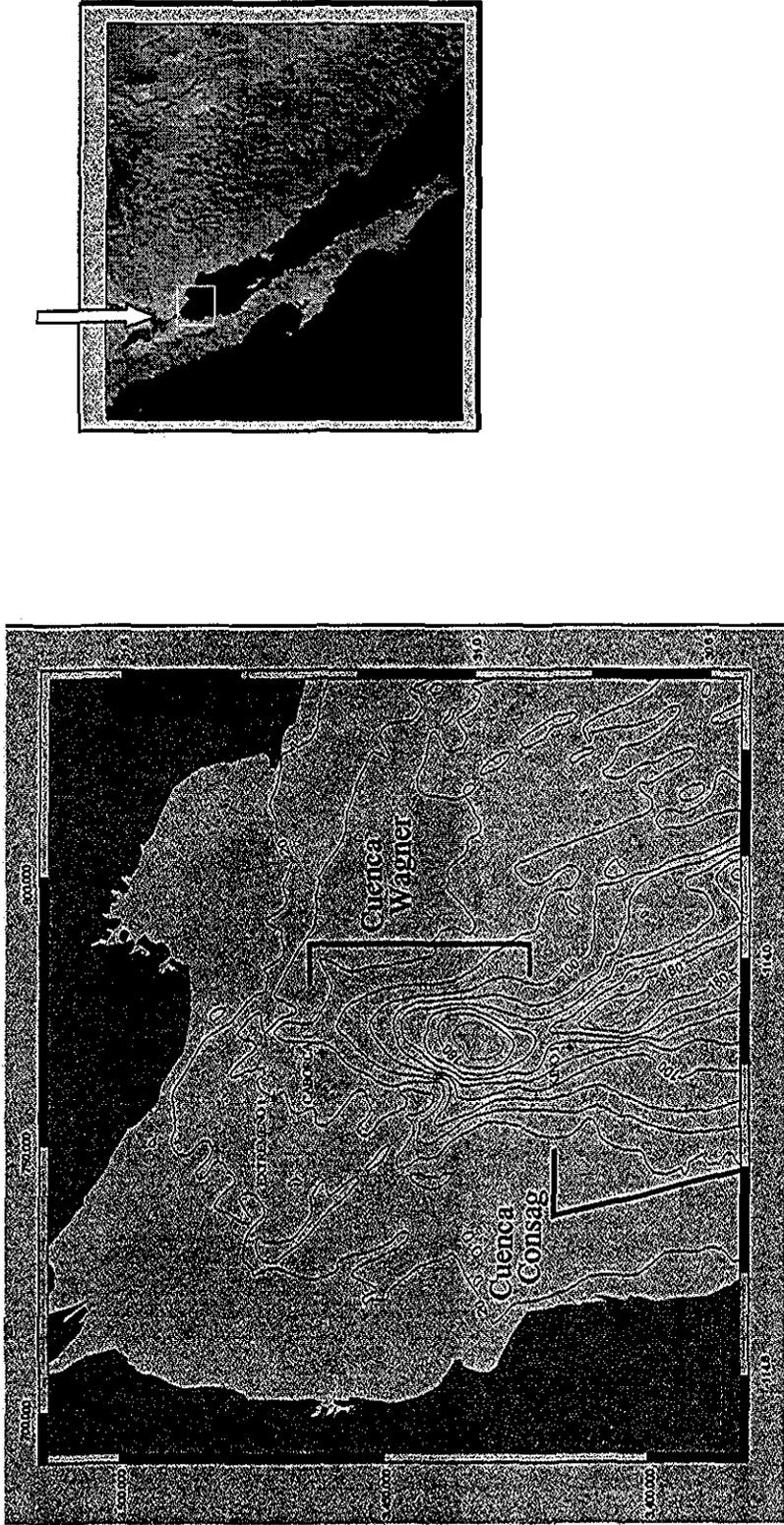


Figura 1.1. La Cuenca Wagner está localizada al Norte del Golfo de California. Es considerada como la cuenca más septentrional del Golfo. Limita hacia el Sur con la Cuenca Consag y al Norte con el sistema transcurriente de las fallas San Andrés, Imperial, Cerro Prieto (ver figura 2.2). La forma de la cuenca es elíptica ~40 km al NNE por ~20 km de ancho, y una profundidad máxima de 210 m. Isobatas dibujadas cada 20 m, tomadas de PEMEX [1980]. Las coordenadas UTM pertenecen a la zona 11.

NW. El tirante de agua máximo en la cuenca es de 210 m. Las pendientes que encierran la cuenca son asimétricas. Los flancos Oeste y Sur de la cuenca muestran pendientes mayores que sus contrapartes Este y Norte. El flanco Oeste tiene las pendientes más pronunciadas que el flanco Sur. El mismo flanco Oeste tiene un valle profundo que llega a la cuenca en dirección SSE. Geológicamente, la Cuenca Wagner está localizada en una región clave para comprender la relación tectónica entre los regímenes extensionales del sistema Imperial - Cerro Prieto al Norte, y el sistema tectónico desarrollado en las cuencas Delfín – Tiburón al Sur.

Para este estudio se interpretaron 5 secciones sísmicas de la campaña PEMEX-80 y 8 secciones sísmicas de la campaña ULLOA-99 (Figura 1.2). Con estas secciones se definieron las estructuras que controlan la geometría de la Cuenca Wagner y las áreas cercanas, para lo cual se utilizó los datos de ULLOA-99 en la parte somera y los datos de PEMEX-80 para identificar la continuidad de las estructuras someras en profundidad. Del análisis de estos resultados se propuso un modelo tectónico que caracteriza la arquitectura y sismoestratigrafía reciente de la Cuenca Wagner. La sismoestratigrafía se realizó para el primer segundo de las secciones sísmicas de ULLOA-99.

Considerando estos objetivos, la tesis está organizada de la siguiente manera: El segundo capítulo describe brevemente los antecedentes tectónicos de la región. En el tercero se reseña las características de los datos sísmicos y la metodología empleada en el procesado sísmico y en los criterios utilizados para el análisis y la correlación de las estructuras y de los horizontes sismoestratigráficos. En el cuarto capítulo se exponen los resultados obtenidos de fallamiento y sismoestratigrafía. Y en el quinto se hace una discusión de los resultados y se propone el modelo tectónico y sismoestratigráfico para la Cuenca Wagner, refinando la descripción y discusión con algunos aspectos relevantes sobre la tectónica regional del Norte del Golfo y su relación con la Cuenca Wagner.

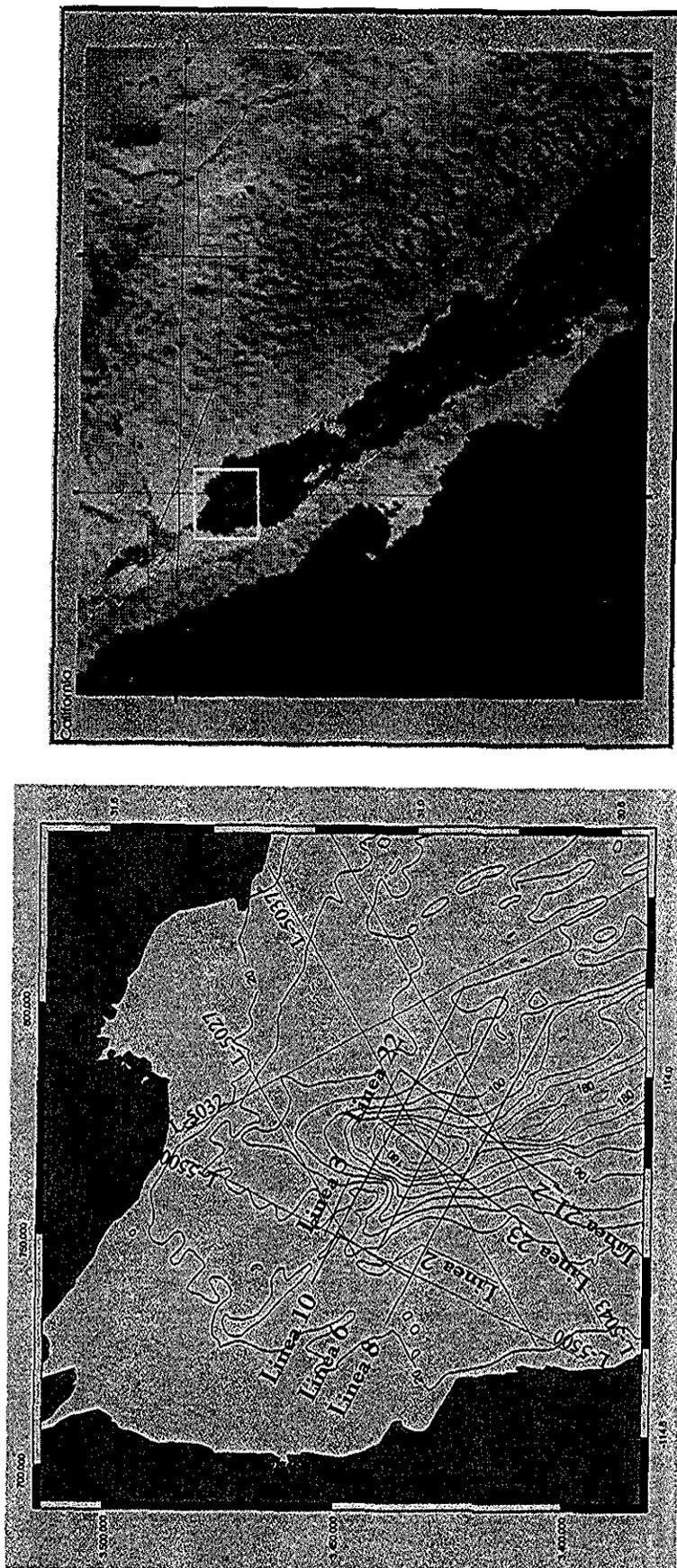


Figura 1.2. Líneas sísmicas utilizadas en el presente estudio (cuadro izquierdo): campañas de adquisición PEMEX-80 (líneas rojas) y ULLOA-99 (líneas azules). En cuadro de la derecha se muestra la localización de la Cuenca Wagner en el marco estructural del Golfo de California [Fenby y Gastil 1991], en el cual se indican las principales cuencas (líneas rojas cortas) y fallas (líneas azules).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2. Antecedentes

2.1. Conceptos Generales de Zonas de Extensión

Son muchos los términos que se manejan alrededor de una zona de extensión; sin embargo, se harán algunos comentarios sólo de algunos términos tectónicos de uso más frecuente en la discusión e interpretación de los resultados del presente estudio:

- Fallas lístricas
- Zonas de transferencia y zonas de acomodamiento
- Cuencas poligenéticas y polihistóricas
- Sistemas en *en-echelón* y rampas de relevo

Fallas Lístricas. En el modelo Andersoniano [Anderson, 1951; Morley, 1999a], las fallas que controlan una zona de rift o zona de extensión son fallas planas con altos ángulos de buzamiento en el rango de 45 – 70°. Sin embargo, en otras regiones de extensión el modelo de cizalla simple es difícil de explicar en términos de dicho modelo Andersoniano [Gartrell, 1997]. Muchos de estos casos coinciden con zonas controladas por fallas normales que inician con buzamiento alto y tienden a disminuirlo con la profundidad hasta ángulos muy bajos. Estas estructuras son llamadas fallas lístricas [Davinson, 1986; Williams y Vann, 1987; Gartrell, 1997; Peacock et al., 2000]. A profundidad los buzamientos pueden ser menores a 45° [Morley, 1999a] o menores a 30° [Gartrell, 1997]. La causa de este tipo de estructura no es clara [Busby e Ingersoll, 1995; Gartrell, 1997; Morley, 1999a]; sin embargo hay consenso en algunos argumentos que pueden definir su origen [Busby e Ingersoll, 1995; Morley, 1999a]:

- Podrían ser consecuencia de un caso especial de rotación de fallas de alto ángulo y/o con variaciones locales en el buzamiento, que hacen parte de un modelo tipo dominó.
- También podrían ser producto de las inestabilidades isostáticas ocasionadas por el fallamiento que ocasiona que haya rotación de las fallas de gran desplazamiento
- O son consecuencia de la reactivación de fábricas preexistentes de bajo ángulo.
- Podrían ser zonas de cizalla relacionadas con ambientes controlados por estructuras *budín* (llamado con frecuencia *Boudinage*), que afectan la base de la zona quebradiza, en la transición dúctil – frágil de la litosfera.

Zonas de transferencia y zonas de acomodamiento. Las zonas de transferencia y de acomodamiento son elementos fundamentales en la arquitectura de las regiones bajo régimen en extensión [Faulds y Varga, 1998]. Ambas están relacionadas con el campo de esfuerzos que controla la zona de transición entre la terminación de un sistema de falla normal y el inicio de otro sistema. Faulds y Varga [1998] exponen los diversos estudios donde ambos términos son usados sin un consenso para denotar un mismo ambiente tectónico, sin un control de parámetros de referencia comunes. Faulds y Varga [1998] reúne las características comunes de cada tipo de zona y proponen una clasificación que los separa como conceptos diferentes. Teniendo en cuenta esto, las zonas de transferencia son zonas de falla discreta que acomodan grandes componentes de movimiento lateral y/o oblicuo, con rumbos de falla que tienden a ser paralelos a la dirección de la extensión. Pueden ser clasificadas con base en la dirección del buzamiento relativo y sentido dominante de movimiento de los sistemas de falla de la zona de transferencia (antitéticas vs. sintéticas y dextral vs. sinistral). Las zonas de transferencia también están definidas como una zona de estructuras transformes que conectan dominios diferentes de extensión [Busby e Ingersoll, 1995; Faulds y Varga, 1998]. En contraste, las zonas de acomodamiento corresponden a cinturones con sistemas de falla normal que se traslapan conjuntamente, con rumbos que pueden ser paralelos, perpendiculares u oblicuos a la tendencia de dirección de la extensión predominante del sistema. Pueden ser clasificados con base en la dirección del buzamiento relativo y geometría dominante de los sistemas de fallas (antitéticas vs. sintéticas y anticlinales vs. sinclinales).

Cuencas Poligenéticas y Polihistóricas Para clasificar las cuencas asociadas con desplazamientos laterales, Busby e Ingersoll [1995] proponen cuatro tipos de sistemas que controlan las cuencas en un ambiente extensional, basados en la geometría y la cinemática de las mismas. De ellas sólo se mencionarán las cuencas poligenéticas y la polihistóricas, por ser las más similares al ambiente tectónico que rige la Cuenca Wagner. Las cuencas poligenéticas están relacionadas con las zonas de transferencia o acomodamiento. Bajo un régimen de movimiento lateral, estas zonas conectan grandes sistemas de fallas normales. En cuanto a las cuencas polihistóricas, son el resultado de episodios de extensión o compresión pura, alternando con movimientos laterales; esto genera cuencas complejas y comúnmente policíclicas.

Sistemas en "en-echelón" y Rampas de Relevo. Las cuencas *pull-apart* y el fallamiento tipo en *en-echelón* tienen un papel importante en la dinámica de los fenómenos mencionados y en particular en las zonas de extensión. Los sistemas en *en-echelón* son un sistema estructural que responde al tipo de ambiente tectónico del Golfo de California y en particular a la Cuenca Wagner. Estas estructuras

se presentan como un grupo de fallas paralelas o semiparalelas cercanas, que al parecer responden a un mismo campo de esfuerzos. Por este hecho, existe una importante tendencia de las fallas a juntarse o unirse, aprovechando la cercanía de sus extremos que se traslapan, y formar una sola estructura [Willemse et al., 1996; Gupta et al., 1998; Cowie y Roberts, 2001; Crider, 2001]. Esta captura también sucede con todos los elementos asociados a cada falla, como el régimen sedimentario y los depocentros, para formar un solo sistema [Gupta y Scholz, 2000b; Cowie y Roberts, 2001; Crider, 2001]. Este grado de conexión entre fallamiento va a definir el estado de madurez del sistema, siendo mayor en la medida que haya más captura entre fallas [Gupta y Scholz, 2000b; Cowie y Roberts, 2001]. Todo este escenario define una geometría que se enmarca en una serie de características estratigráficas y geomorfológicas únicas, que servirán para su evaluación e identificación en una sección sísmica o afloramiento rocoso [Willemse et al., 1996; Gupta et al., 1998; Morley, 1999b; Gawthorpe y Leedor, 2000; Gupta y Scholz, 2000b; Cowie y Roberts, 2001; Crider, 2001]. Las rampas de relevo son otro elemento asociado al sistema en *en-echelón*, las cuales hacen parte de la zona que morfológicamente separan las dos fallas cercanas en traslape. Estas rampas permiten el acceso de material sedimentario hacia el depocentro asociado a ambas fallas. Los modelos numéricos ayudan a visualizar la naturaleza de este rasgo estructural, para su reconocimiento en una sección sísmica [Gawthorpe, 2000; Contreras, 2001; Crider, 2001].

2.2. Tectónica Regional

A lo largo del Golfo de California ocurre el desplazamiento relativo entre las placas Pacífico (PAC) y Norteamérica (NAM), con una velocidad relativa promedio de ~5.6 cm/año [Curry y Moore, 1984]. En los límites de PAC-NAM en el Golfo se manifiestan ambientes continentales al Norte y centro; mientras que al Sur existen adelgazamientos de la corteza continental con una evolución suficiente que han permitido la formación de pequeños centros de dispersión [Lonsdale, 1989; DeMets, 1995]. Al Norte del Golfo, se encuentra el sistema transcurrente de las fallas de San Andrés, Imperial y Cerro Prieto (Figura 2.1), desarrollado sobre el margen continental [Parson y McCarthy, 1996]. En contraste, el Sur del Golfo presenta un sistema de fallas transformes que conectan cuencas con generación de corteza oceánica, con claras anomalías magnéticas, desde el Sur de la boca del Golfo hasta la zona donde se encuentra la Cuenca Alarcón en el interior del Golfo (~23.5° Norte) [Larson et al., 1972; Klitgord et al., 1974; Lonsdale, 1989 y DeMets, 1995]. La generación de esta corteza oceánica en el Golfo ocurre desde ~3.5 Ma. En general, estas características sugieren un Golfo con una tectónica joven, donde está ocurriendo una evolución de

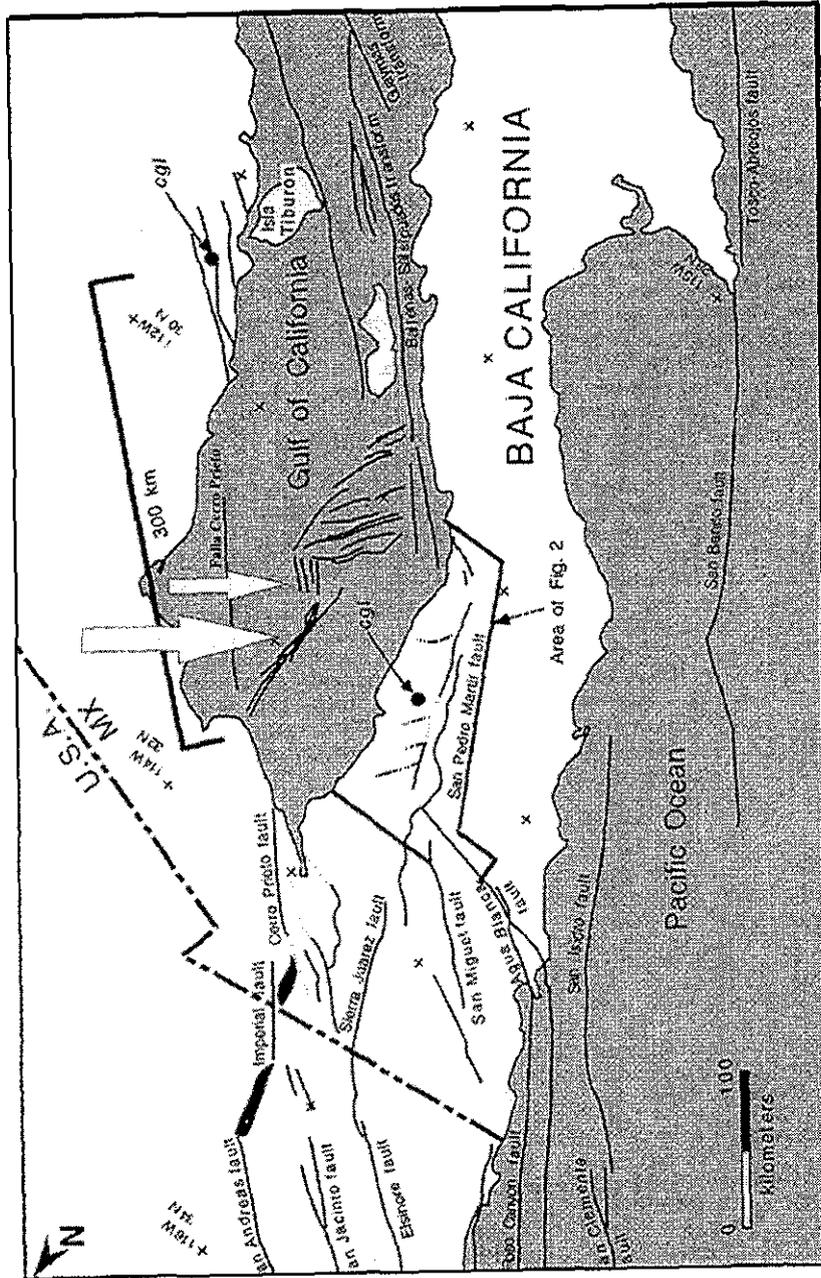


Figura 2.1. Mapa estructural del Norte de Baja California y Golfo de California. Se muestra las estructuras entre la placa Norteamérica y Pacífico [Gastil and Krummenacher, 1977; Fenby and Gastil, 1991; Ness y Lyle, 1991]. Los círculos nombrados como "cgl" indican los afloramientos de un conglomerado correlacionado entre Sonora y Baja California, que sugieren ~300 km de desplazamiento lateral derecho [Gastil et al., 1973]. La flecha mayor muestra la localización de la Cuenca Wagner. La flecha menor adjunta muestra la Cuenca Consag. Gráfica modificada de Lewis y Stock [1998].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ambientes de corteza continental a ambientes de corteza oceánica [Lonsdale, 1989; Stock y Hodges, 1989; DeMets, 1995; Nagy y Stock, 2000; Stock, 2000].

Los trabajos geológicos en la margen Este del Golfo, cerca de Sonora, indican que el último episodio de deformación antes de iniciar la apertura el Golfo fue extensional y ocurrió principalmente entre ~30 y ~16 Ma [Nagy y Stock, 2000]. Esta etapa de extensión continental de dirección ENE, forma parte de la provincia Sierras y Cuencas (*Basin and Range*) que afectó el Oeste de México y E.U.A. [Henry, 1989; Nagy y Stock, 2000]. Paralelamente en el Oeste, la placa Farallón se subducía de manera oblicua a lo largo del margen Oeste de la placa NAM, la región que posteriormente sería la Península de California. La subducción cesó ~16 Ma en la parte Norte de la península [Nagy y Stock, 2000], y cesó después ~12 Ma en la parte central y Sur de la península [Mammerickx y Klitgord, 1982]. Posterior a estos eventos (~12 Ma), el desplazamiento relativo PAC-NAM tuvo un incremento de ~33 a 52 mm/año; y para ~8 Ma, el movimiento relativo de las placas (N60W) cambió a N37W, y se conserva en esa dirección hasta el presente [Atwater y Stock, 1998; Nagy y Stock, 2000]. Esta variación en la dirección de los esfuerzos fue una de las causas del inicio de la apertura del golfo hace ~5.5 Ma, ocasionando una extensión NW-SE [Lonsdale, 1989]. Otra probable influencia en la variación de los esfuerzos fue el inicio de actividad del sistema de fallamiento moderno de San Andres [Lewis y Stock, 1998]. Finalmente, hace ~4 Ma se formaron las primeras cuencas *pull-apart* entre el bloque que conforma parte de las Californias y el bloque que conforma el NW de México no peninsular. Estas cuencas están limitadas por un arreglo de fallas transformes dispuestas en *en-echelón* con un corrimiento lateral derecho [Lonsdale, 1989]. Estas nuevas cuencas acomodan actualmente la deformación causada por la apertura del Golfo. Evidencias geológicas recientes permiten estimar que después de los 6 Ma, la apertura del Golfo se ha desplazado relativamente de la placa NAM: 255 ± 10 km [Oskin et al., 2001] y ~300 km [Gastil et al., 1973; Lewis y Stock, 1998], asumiendo que la velocidad ha permanecido constante es este intervalo de tiempo (~56 mm/año).

En el Norte del Golfo de California el régimen de extensión (a lo largo de los ~300 km) probablemente ha causado un adelgazamiento importante de la corteza continental en el margen Este de NAM [Gastil et al., 1973; Lewis y Stock, 1998]. Esto se evidencia por una deformación extensional formada por cuencas abandonadas, cuencas activas y sistemas de fallas pobremente organizados [Lonsdale, 1989]. Aún así, el adelgazamiento en la parte Norte del Golfo no ha sido suficiente para la generación de corteza oceánica, como es el caso al Sur, en la boca del Golfo [Larson et al., 1972; Klitgord et al., 1974; Lonsdale, 1989 y DeMets, 1995]. Esta diferencia de los

ambientes tectónicos entre el Norte y el Sur no se explica claramente aún; sin embargo, la presencia aún de corteza continental en el Norte del Golfo podría estar relacionada con alguno de los siguientes escenarios: 1) Existencia de mayor acoplamiento entre la corteza y el manto en la parte Norte que en la región Sur. Al parecer este acoplamiento inhibe deformación y suprime la evolución de una zona de falla [Gupta et al., 1998; Lavier y Buck, 2000]. 2) Presencia de estructuras tipo *budín* (“*boudinage*”) en la corteza continental por el contraste reológico de capas con diferente viscosidad [Gartrell, 1997]. Estas estructuras responden a una inestabilidad mecánica que ocurre en horizontes plásticos que subyacen una corteza rígida [Gartrell, 1997]. 3) Existencia de grandes volúmenes de sedimentación, característica que podría estar aumentando la rigidez de la corteza y originando una deformación distribuida [Ackermann et al., 2001]. 4) Existencia de cambios en el espesor de la corteza y flujo de calor [Buck, 1993]. Esto estaría relacionado con una dinámica conjugada entre estructuras extensionales prerift y un aumento de rigidez de la corteza por la disminución en el flujo de calor. La diferencia de tiempo entre el cese del arco magmático al Norte y al Sur del Golfo (~16 Ma y ~12 Ma, respectivamente) causó un contraste de temperatura entre estas dos regiones, ocasionando al parecer un aumento en la rigidez por el enfriamiento prematuro del Norte con respecto al Sur, donde aún permanecía un flujo de calor mayor. Esto pudo inhibir las condiciones favorables para un adelgazamiento de la corteza asociado a la generación de piso oceánico [Nagy y Stock, 2000]. 5) Es probable que parte de la deformación del Norte del Golfo se haya desarrollado en el interior continental, principalmente en el estado de Sonora, y la extensión en el Golfo no haya sido suficiente para adelgazar y romper la litósfera [John Fletcher, CICESE, comunicación verbal].

2.3 Geología de la Cuenca Wagner

Los estudios realizados en la Cuenca Wagner son pocos, sobre todo los relacionados con la estratigrafía, la mayoría de las investigaciones se concentran en campañas geofísicas para estudios muy regionales de la evolución tectónica del Norte del Golfo. Estos estudios presentan conclusiones muy aisladas, ocasionando que sea difícil correlacionar las ideas entre ellos, específicamente para la Cuenca Wagner. Entre los estudios más importantes podrían mencionarse los realizados por Henyey y Bischoff [1973], Gastil y Krummenacher [1977], Lonsdale [1989], Stock y Hodges [1989], Fenby y Gastil [1991] y Nagy y Stock [2000]. En Henyey y Bischoff [1973] se concluye que la Cuenca Wagner es una zona de falla transforme complementaria a la Cuenca Delfín hacia el Norte. Por su parte Gastil y Krummenacher [1977], Fenby y Gastil [1991] y Lewis y Stock, [1998] realizan una cartografía de las estructuras principales que afectan el Golfo de California (Figura 1.2), con énfasis

en el Norte del Golfo (Figura 2.1). En estos estudios se enfatiza el papel de la Cuenca Wagner como un probable centro de dispersión que conecta las Cuenca Delfín con el sistema de fallamiento del Valle Imperial. Stock y Hodges [1989] describe la deformación causada por la extensión ENE de la provincia de Sierras y Cuencas, y su efecto en marcar las direcciones ENE en las estructuras alrededor del Golfo hasta los ~6 Ma. Por otra parte, Nagy y Stock [2000] presentan un modelo de los rasgos estructurales más importantes en la transición océano-continente en el norte del Golfo. Para ello proponen una región llamada *Zona de Transición Wagner*, la cual inicia desde el Norte de la Cuenca Delfín y finaliza en la desembocadura del Río Colorado. En el modelo se indica que la zona está caracterizada por una deformación difusa con reactivación de fallas normales en dirección NNW y Norte.

2.4. Estudios Geofísicos al Norte del Golfo de California

El principal objetivo de la adquisición de datos geofísicos en el Norte del Golfo ha sido investigar la tectónica regional, y su relación con los sistemas de dispersión oceánica. Secundariamente, estos datos geofísicos se han utilizado para fines de estratigrafía o de exploración de recursos no renovables. Las campañas de adquisición geofísica incluyen sísmica de reflexión, sismología de terremotos, magnetismo, gravedad y flujo de calor, como las más importantes. Uno de los trabajos clásicos en sísmica de reflexión de baja penetración y flujo de calor para esta área Norte es el realizado por Henyey y Bischoff [1973], quienes concluyen que en la Cuenca Wagner no existen evidencias de centros de dispersión de corteza oceánica. Con estos resultados, integran un mapa con las principales estructuras reconocidas desde la Cuenca Delfín hacia el Norte, mostrando aquellas fallas que afectan o desplazan los sedimentos superficiales del fondo oceánico. Identifican además, que en la Cuenca Delfín la dirección del fallamiento es NE, en la Cuenca Consag gira al NW y finalmente en la Cuenca Wagner tiende hacia el Norte y NNE. Con base en sísmica de refracción, Phillips [1964] estima que la parte superficial del Golfo Norte consiste de cuatro capas en los primeros 1.5 km, desde sedimentos no-consolidados (2.0-2.1 km/s) hasta el basamento (5.4 km/s). Sus resultados infieren que la estructura estimada para el Norte del Golfo es muy similar a la observada en la parte continental del Sur de California con un espesor de corteza que muestra un espesor de ~25 km. Refinando esta estimación, Couch et al. [1991] estima un espesor de corteza de ~13 km para la zona Norte, usando anomalías de gravedad de aire libre. Los resultados de Doguin [1988] presentan un perfil SW-NE de la parte Norte de la Cuenca Consag con las fluctuaciones de anomalías de gravedad de aire libre. El perfil muestra mínimos en anomalías de gravedad de aire libre hacia el NE (~ -40 mGal), y para la misma zona, máximos en anomalías magnéticas de campo

total (~ 70 nT). Pérez-Cruz [1982] en un estudio para Petróleos Mexicanos (PEMEX), describe y analiza los resultados de una campaña de sismica de reflexión multicanal de 6 s de registro. Parte de estos datos serán reinterpretados en este estudio, y serán invocados con el nombre PEMEX-80. Adicionalmente, Pérez-Cruz [1982] define las principales zonas de cuenca en el Norte del Golfo usando anomalías de Bouguer. Estos resultados muestran una franja NW-SE en la parte central del Norte del Golfo, con valores de -25 a $+25$ mGal. Los mínimos son observados cerca de las costas (-35 a -60 mGal). En un estudio reciente de anomalías magnéticas de campo total, Sánchez-Zamora et al. [1991] presentan un perfil de la Cuenca Wagner en dirección SW-NE, con un máximo hacia el sector NE de la Cuenca Wagner (~ 150 nT), decreciendo con leves variaciones hacia el SW (de ~ 50 a ~ 30 nT).

Un estudio adicional de sismica de reflexión multicanal en el Norte del Golfo de California fue realizado por CICESE (Centro de Investigación Científica y de Estudios Superiores de Ensenada), CALTECH (California Institute of Technology) y University of Columbia (Lamont Doherty Earth Observatory). De esta adquisición sísmica Persaud et al. [2002] estudió la actividad tectónica regional reciente de la parte somera del Norte del Golfo con énfasis hacia la margen Este de la península de Baja California. Los datos de esta campaña sísmica son invocados en el presente estudio bajo el nombre de ULLOA-99.

Los estudios de sismicidad tectónica en esta zona del Golfo son pocos y sin detalle, debido a que no ha existido una red de sensores constante alrededor del Golfo, especialmente en el costado Este del Golfo. La adquisición ha sido de monitoreo mas que de investigaciones detalladas. Varias redes de monitoreo sismológico mundial han detectado varios enjambres de sismicidad en el Norte del Golfo (IRIS, <http://www.iris.edu>; HARVARD, <http://www.seismology.harvard.edu/CMTsearch.html>; USGS, <http://www.usgs.gov>) y locales (RESNOM, www.cicese.mx). Ninguno de estos enjambres se relacione con claridad con la Cuenca Wagner; sin embargo, si existe un grupo de sismos importante en el NW-Norte de la cuenca, definiendo una franja de dirección NNE - Norte

Estudios de flujo de calor indican que la parte central del Norte del Golfo es una zona relativamente fría, presentando valores promedio bajos: ~ 114 mW/m² [Sánchez-Zamora et al., 1991]. Henyey y Bischoff [1973] con mediciones muy puntuales calculan valores entre 62 a 92 mW/m² para la Cuenca Wagner, los cuales son bajos con respecto a los medidos por el mismo autor en la Cuenca Delfín (96 a 196 mW/m²). Nagy y Stock [2000] y Persaud et al. [2002] presentan algunas comparaciones entre diversos estudios sobre flujo de calor entre el Norte y Sur del Golfo, donde

coinciden que el flujo de calor aumenta hacia el Sur del Golfo, aunque diversos datos en el Valle Imperial (140 mW/m^2) reflejan flujos de calor mayores que en la Cuenca Wagner.

3. Metodología

Para el estudio tectónico y estratigráfico de la Cuenca Wagner se utilizó una metodología basada en el procesamiento de los datos sísmicos de reflexión multicanal disponibles. Se presenta aquí la metodología empleada en el procesamiento e interpretación de los datos sísmicos ULLOA-99 y la interpretación de los datos sísmicos de PEMEX-80. Posteriormente, se describen los criterios usados para correlacionar e interpretar los datos estructurales y sismoestratigráficos de la cuenca.

3.1. Sísmica de Reflexión

La sísmica de reflexión es un método de la geofísica ampliamente usado en la exploración de hidrocarburos y en estudios tectónicos regionales. Proporciona una “ecografía” del terreno con alta resolución y con un grado de continuidad muy alto, para identificar las estructuras y la estratigrafía a profundidad. El método de reflexión sísmica consiste de tres etapas principales: *adquisición de datos*, su *procesamiento* y su *interpretación*. Las tres etapas 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., 1979; Badley, 1985; Lindseth, 1987; Yilmaz, 1987; Hoskins y Wood, 1996; Sheriff y Geldart, 1991, entre otros].

3.1.1. Adquisición Sísmica

La adquisición sísmica está basada en la generación de una fuente de ondas sísmicas controladas artificialmente y en el registro digital de la señal reflejada por el subsuelo. Para la adquisición de los datos en el mar (Figura 3.1), los hidrófonos deben estar conectados en el interior de un cable de registro (también llamado “*streamer*”). El cable de registro es arrastrado por una embarcación con velocidad constante y a lo largo de rumbos establecidos en línea recta (Figura 3.1).

La energía de la fuente artificial se refleja en las interfases del subsuelo, y luego se registra en el arreglo de hidrófonos del *streamer*. Desde un punto de disparo (llamado comúnmente “*shotpoint*”), la fuente genera un frente de ondas *P* hacia el subsuelo; algunas se reflejan en la superficie del fondo oceánico, y otras se transmiten y se reflejan en interfases someras y profundas del subsuelo. La información que graban los hidrófonos son series de tiempo de los frente ondas reflejadas, desde la fuente hasta el reflector (t_1), y el tiempo de regreso desde el reflector hasta el hidrófono (t_2). Este viaje en dos sentidos se conoce comúnmente como tiempo doble “*TD*” ($TD=t_1+t_2$). Además, cada

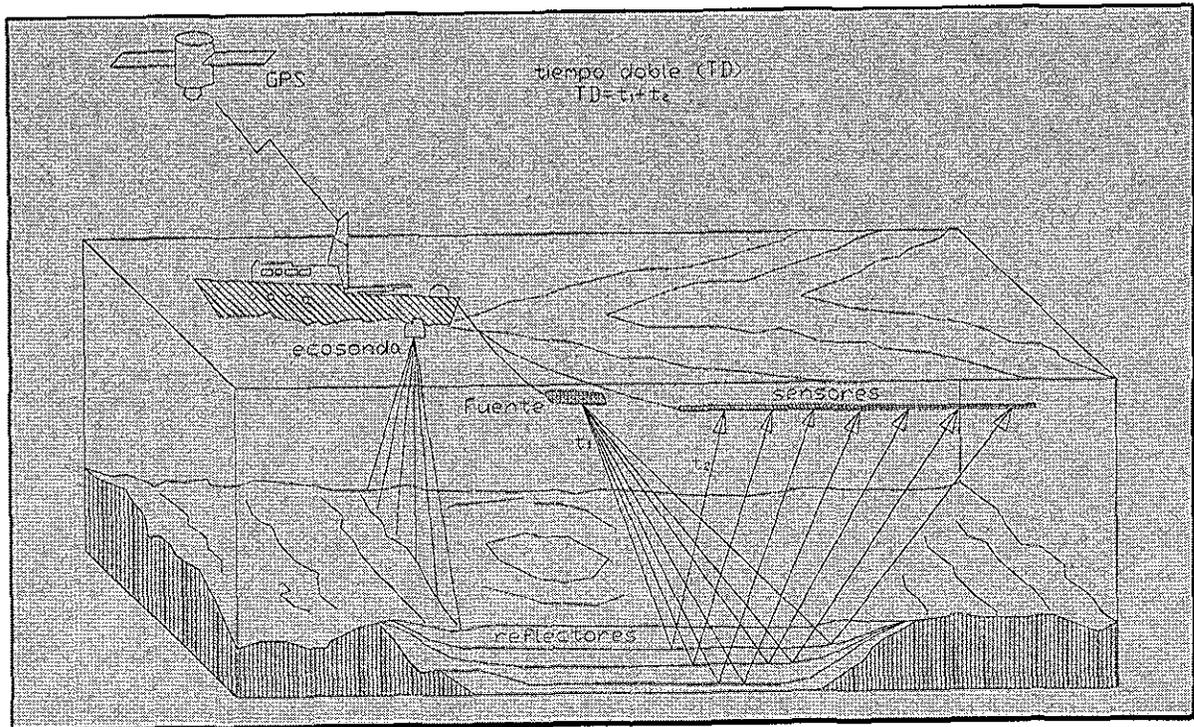


Figura 3.1. Geometría de la adquisición sísmica en áreas marinas. Las ondas acústicas reflejadas en el subsuelo se registran en los hidrófonos del cable de registro (“streamer”). Los registros están asociados a una localización del GPS y a una batimetría estimada con la ecosonda.

registro contiene información de amplitud, frecuencia, fase y formas de onda, referenciada a una posición geográfica estimada por el sistema de posicionamiento global (GPS). Es importante mencionar que los tiempos de viaje dependerán exclusivamente de la reología de las rocas y de la complejidad estructural del subsuelo.

Después de activar la fuente, se espera entonces que el sistema de adquisición capture el mayor número de reflectores, resultado de los contrastes en impedancia acústica debido a cambios litológicos o estructurales en el subsuelo. Mientras más contraste haya en el cambio de la impedancia, más fuerte será el reflector. La impedancia es el producto de la velocidad y la densidad del material por el cual viaja la señal sísmica [Yilmaz, 1987 y Badley, 1985]. El conocimiento de este parámetro es muy útil en el procesamiento sísmico, porque tanto la velocidad como la densidad dan una idea de las características físicas esenciales del material rocoso. Asociado a este término, los coeficientes de reflectividad son la relación entre las amplitudes de la onda incidente y la reflejada, asumiendo una incidencia normal [McQuillin et al, 1979]. El coeficiente de reflexión está relacionado con el tipo y tamaño relativo de los cambios de impedancia acústica [Badley, 1985].

En resumen, la adquisición es la captura de la respuesta sísmica del terreno a una excitación hecha por una fuente artificial (Figura 3.1). Los registros marinos serán una serie de trazas sísmicas que resultan de la convolución del impulso sísmico (fuente), ruido aditivo y la reflectividad del terreno. La serie de tiempo de los datos dependerá del tipo de investigación, el cual se relaciona con la tasa de muestreo, número de muestras, la cantidad y el tipo de fuentes, el número de hidrófonos (también referido como número de canales), la distancia entre sensores y la distancia de la fuente al primer receptor. Los registros se graban bajo un formato estándar llamado SEG-D y se convierten en el laboratorio a un formato de trabajo llamado SEG-Y [Barry et al, 1975]. Bajo este formato, los registros crudos (Figura 3.2a) se pueden procesar en un software especializado y mejorar su resolución (Figura 3.2b)

Adquisición datos sísmicos PEMEX-80. Los datos sísmicos multicanal de PEMEX-80 fueron registrados en los años 1978 a 1980, desde la Isla Tiburón hasta la desembocadura del Río Colorado, bajo una malla de 5x5 km² a 5x15 km². Las líneas están en dirección SW-NE y NW-SE, de azimut 60° y 153° respectivamente (Figura 1.2). La fuente de energía fueron 7 cañones de aire con una presión total de 1341 lb/pg² [Pérez-Cruz, 1982]. En la Tabla 3.1 se detallan los parámetros de adquisición. El procesamiento de las líneas fue realizado por el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP). Las líneas están apiladas y migradas, y están disponibles únicamente en papel. Las líneas en

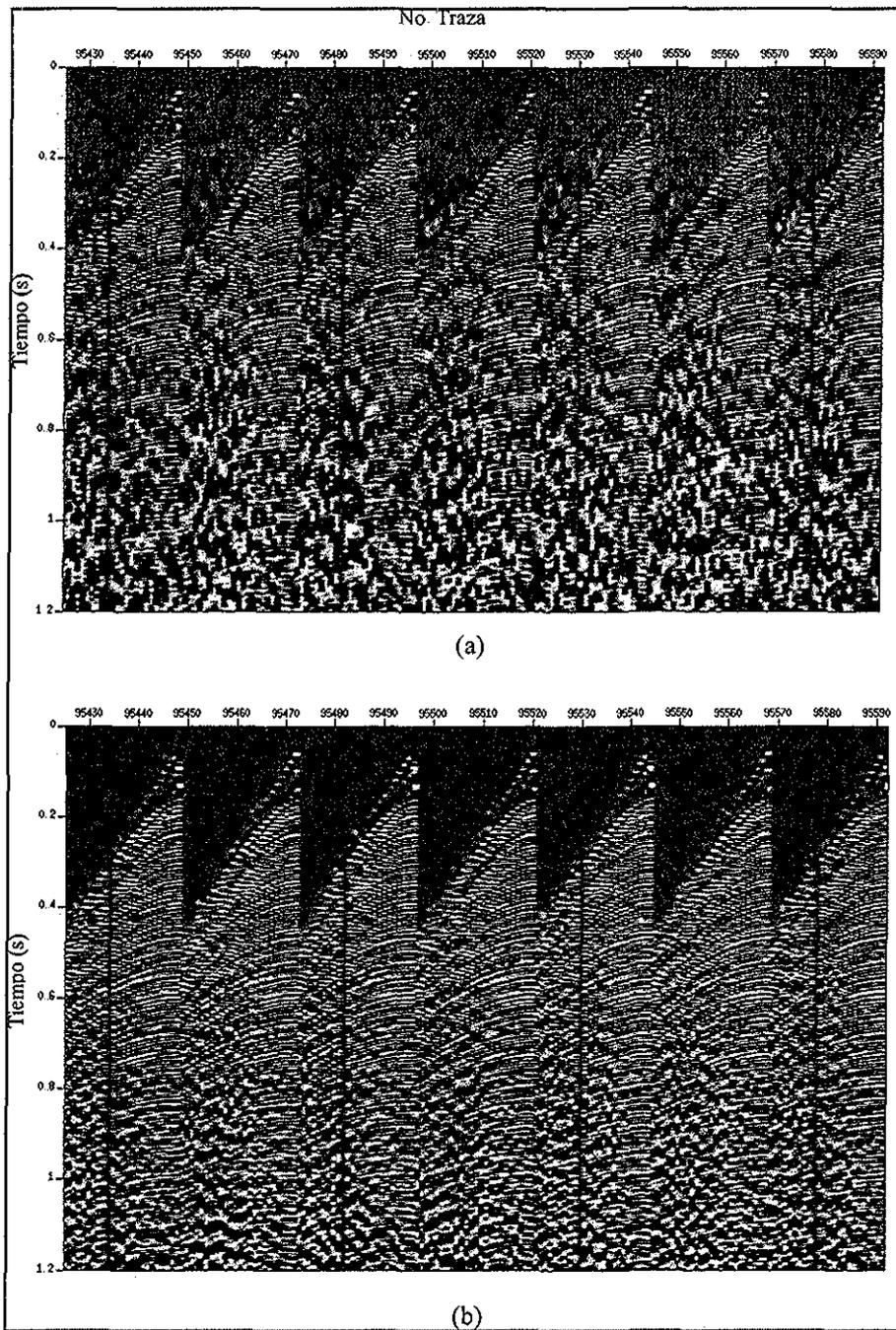


Figura 3.2. Registros sísmicos de áreas marinas de la línea 10 (Figura 1.2). Cada registro representa un disparo diferente (a) Antes y (b) después de asignar la geometría, aplicar la corrección por divergencia esférica y filtrar con un pasabanda (1,15,20,50).

dirección SW-NE son 5027, 5037, 5043 y en dirección NW-SE son las líneas 5500 y 5032 (Figura 1.2). Debido al tipo de desplegado gráfico (en papel de gran longitud), el presente estudio sólo muestra parte de la línea 5037, por su relevancia en el modelo propuesto.

<i>Parámetros</i>	<i>Valores</i>
Cable de Registro	2350 m
No de Canales	48
Tiempo de Grabación:	6144 ms
Intervalo de Muestreo	2 ms
Filtro Bajo:	8 Hz
Filtro Antialias	124 Hz
Fuente de Energía	7 Cañones de aire
Volumen / Presión	1341 pulg ² / 1750 psi
Detectores por Traza	32
Distancia entre Canales	50 m
Distancia entre Punto de Tiro	25 m
<i>Offset</i> Inicial	270m
Numero de Muestras	3072

Tabla 3.1. Principales parámetros de adquisición de los datos sísmicos de PEMEX-80.

Adquisición datos sísmicos ULLOA-99. Los datos sísmicos multicanal de alta resolución de ULLOA-99 se adquirieron en 1999 en el Norte del Golfo de California, desde la cuenca Wagner en el Norte, hasta la Isla Angel de la Guarda en el Sur. La malla de adquisición fue un tanto irregular, tratando de ser adquiridas perpendiculares a las estructuras. Para el área de la Cuenca Wagner, las direcciones fueron NW-SE (líneas 3, 6, 8, 10, 22) y SW-NE (líneas 21_2 y 23), con azimut 119° y 35°, respectivamente (figura 1.2). La adquisición sísmica se realizó con una fuente de energía tipo cañón de aire comprimido GI (Generación-Inyección) con un volumen de aire de 45/45 pulgadas cúbicas (2.75/2.75 cm³) o de 45/105 pulgadas cúbicas (2.75/6.42 cm³) a una presión nominal de 2000 psi (136 Atm). El intervalo de disparo empleado fue de 5 ó 10 s, equivalentes a un disparo cada 10 ó 20 metros.

Para la navegación se utilizó el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). El procesamiento de tres de las ocho líneas interpretadas en este estudio son documentadas en las siguientes secciones de este capítulo. La Tabla 3 2 contiene los principales parámetros de adquisición.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

<i>Parámetros</i>	<i>Valores</i>
Cable de Registro	600 m
No. de Canales	48
Tiempo de Grabación:	2000 ó 3000 ms
Intervalo de Muestreo	1 ms
Fuente de Energía	1 ó 2 Cañones de aire
Volumen / Presión	2 75/2.75 cm ³ /2000 psi
Detectores por Traza	24
Distancia entre Canales	12.5 m
Distancia entre Punto de Tiro	12.5 m
<i>Offset</i> Inicial	12.5 m
Número de Muestras	2024

Tabla 3.2. Principales parámetros de adquisición de los datos sísmicos de ULLOA-99

3.1.2. Procesamiento sísmico

El objetivo de esta etapa es tratar de lograr una sección sísmica “ideal”, que muestre todas las reflexiones claramente y con buena resolución. Sin embargo, las secciones sísmicas siempre tendrán ruido proveniente de diversas fuentes. El procesamiento tratará de minimizar este volumen de ruido aditivo en la sección. El procesado de todas las secciones de ULLOA-99 fue realizado por Persaud et al. (2002). Las líneas reprocesadas en el presente estudio fueron la línea 3, línea 10 y línea 22 de ULLOA-99 (Figura 1.2), para tratar de remover el ruido coherente. En este estudio se utilizaron las siguientes etapas de proceso:

1. Asignación de la geometría
2. Ordenar los registros por CDP y offset
3. Corrección por divergencia esférica
4. Deconvolución
5. Análisis de velocidad
6. Corrección por NMO
7. Apilamiento y Migración

Paralelamente se aplicaron filtros y ganancia en los registros, principalmente al inicio del procesamiento y antes del análisis de velocidad. Los programas de computadora que se usaron para este procesamiento fueron el *Seismic Unix* y *Visual Surt* (Anexo 1). El primero trabaja en ambiente

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

UNIX con el uso de scripts. El Visual-Sunt está diseñado para sistema operativo Windows 95-98, pero trabaja igual que *Seismic Unix*.

Asignación de Geometría y Ordenamiento por CDP y Offset. La grabación digital de los registros marinos carece de algunos datos importantes de la geometría. Estos deben ser asignados en los encabezados de los datos sísmicos como primer paso. Los parámetros más importantes son el número de CDP, el offset (distancia entre la fuente y cada uno de los canales que comprende el arreglo de adquisición), la distancia de la fuente y de los sensores a un punto de referencia, que generalmente es el punto inicial de la línea sísmica. Posteriormente se recomienda ordenar los registros por CDP y Offset, lo cual es un paso importante antes del análisis de velocidad.

Corrección por Divergencia Esférica. La divergencia esférica es un fenómeno físico causado por el aumento paulatino del tamaño de los frentes de onda, a medida que éstos se alejan de la fuente. Esto ocasiona que se registre una amplitud de la señal cada vez más débil hacia los sensores más retirados (a offset mayor). Por lo tanto, los datos deben ser corregidos para recuperar o minimizar radialmente la pérdida de la amplitud. Esto es válido por el hecho de que la amplitud es inversamente proporcional al offset, cuando asumimos una velocidad constante [McQuillin et al., 1979]. Si por el contrario asumimos una velocidad que aumenta con la profundidad, la recuperación de las amplitudes involucra el uso de un modelo de velocidades. A esta altura del proceso aún no se estima un modelo de velocidades, por lo cual debe ser utilizado un modelo conocido del área, o inferir uno a partir de la geología esperada para una primera iteración. Después del primer análisis de velocidad, el modelo estimado puede ser usado para una segunda iteración

Deconvolución. En este proceso se separan las componentes de la traza sísmica (Figura 3.3), luego comprime la ondícula de la fuente para tratar de obtener un pulso único ideal o *spike*, y por último convolucionan los componentes de nuevo. Los métodos usados en este estudio fueron la *deconvolución de pulso único* o *spiking* y deconvolución predictiva. Ambos métodos mantienen una misma filosofía; sin embargo, la deconvolución predictiva considera algunas variantes adicionales [Yilmaz, 1987]. Comprimir la ondícula ocasiona un aumento en la frecuencia de la traza [Yilmaz, 1987; Mcquillin et al., 1979], por lo cual al final de la deconvolución se aplicó un filtro pasabanda (Figura 3.2). La deconvolución es una etapa que no siempre debe ser usada en el proceso, porque no es tan efectiva para algunas correcciones de la traza sísmica (atenuación de algunos ruidos coherentes). Sólo bajo ciertas condiciones es aconsejable para mejorar la resolución temporal de la señal. Puede ser aplicada antes y/o después del apilamiento

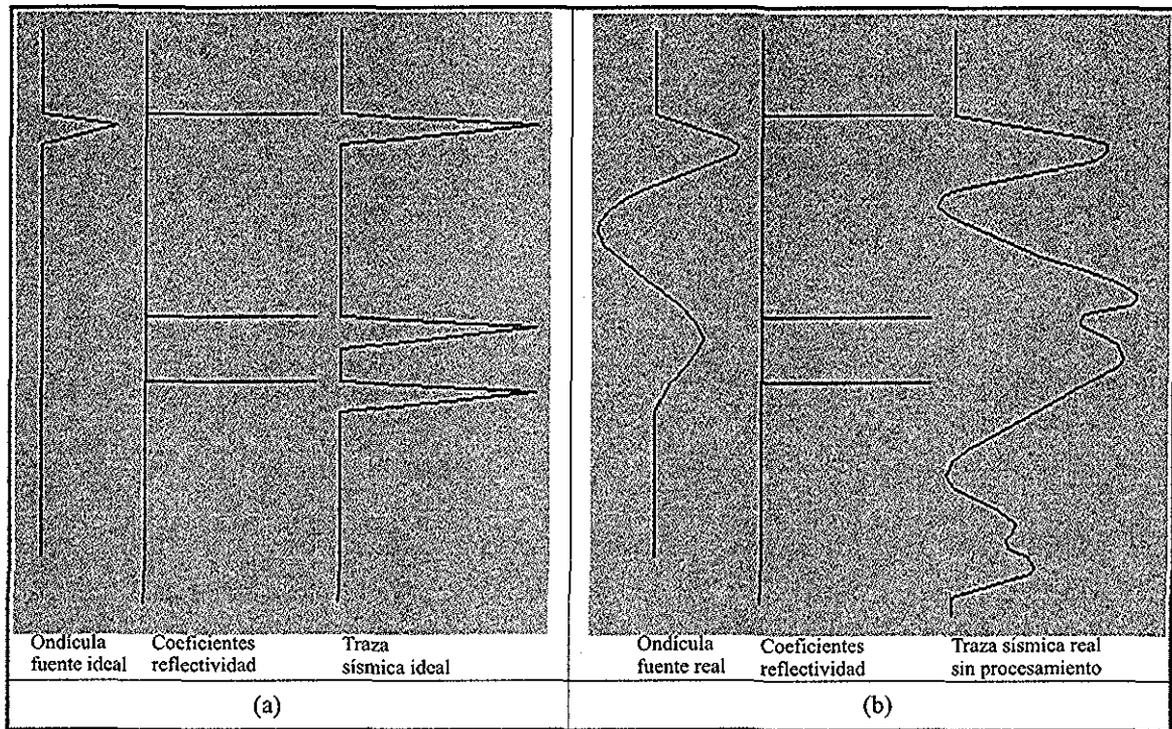


Figura 3.3. Componentes de la traza sísmica ideal y real de la señal sísmica. Los componentes principales son la ondícula fuente (pulso único de la fuente o *spike*) y los coeficientes de reflectividad. La forma de la ondícula fuente influye notablemente la forma de onda de la traza sísmica. (a) Es una ondícula fuente ideal. (b) ondícula registrada frecuentemente en la adquisición de datos marinos. Las trazas sísmicas son muy diferentes en ambos casos. La deconvolución intenta comprimir la ondícula fuente de los datos marinos, a una ideal. Como resultado se espera tener una señal sísmica final con una minimización de eventos complejos.

El ruido coherente como múltiple o reverberación puede ser removido usando la deconvolución como primer método. Los múltiples son uno de los grandes problemas que afectan los datos adquiridos en océano y afectan fuertemente los datos de ULLOA-99 en el sector NW de las secciones NW-SE. Son reflexiones que hacen uno o varios viajes extra en el subsuelo antes de llegar al sensor, y normalmente muestran un aparente contraste alto en impedancia acústica. El múltiple puede ser la reflexión de cualquier reflector a profundidad; sin embargo el más común es la interfase océano-fondo oceánico por su fuerte impedancia. La deconvolución puede atenuar ese ruido repetido que se adicionó a la traza sísmica, utilizando la misma filosofía de compresión presentada. No es siempre efectivo pero puede ayudar atenuarlo. La deconvolución usada en este estudio minimizó muy poco los múltiples y no fue posible removerlos completamente porque este método no responde aceptablemente a la remoción de múltiples de alta frecuencia [Yilmaz, 1987; Hill et al., 1999].

Análisis de Velocidad. Una de las etapas más importantes en el procesamiento de datos sísmicos es el análisis de velocidad. Aquí se relaciona los tiempos registrados de la onda sísmica con el material rocoso de diferentes densidades que atraviesa a profundidad. Las velocidades más bajas representan materiales menos compactos y menos densos y por lo general más superficiales. En contraste, las velocidades altas representan materiales más compactos y de alta densidad. Conociendo las velocidades del medio se puede tener un mayor grado de confiabilidad sobre las características del subsuelo que se está estudiando. En el análisis de velocidad de un CDP se estiman las velocidades que están asociadas a las interfaces de reflectores que tienen un fuerte contraste en impedancia acústica. El resultado de dicho análisis proporciona un modelo de velocidades en función del tiempo doble de registro del reflector. En primera instancia el modelo se usa para corregir de nuevo la divergencia esférica; y luego, se reprocesan los datos para obtener un nuevo modelo más optimizado de los CDP's en la sección. En segunda instancia, el modelo de velocidades optimizado es usado posteriormente en el proceso para corregir por NMO (se describe en la siguiente sección).

Dos métodos se usaron para estimar el modelo de velocidades en ULLOA-99: Velocidad Constante y el Espectro de Semblanza. En el primero se aplica un método gráfico de prueba y error, poco preciso, pero visualmente efectivo (Figura 3.4). En cada registro se aplica una *Velocidad Constante* diferente para corregir por NMO, iniciando con 1505 m/s (para el presente estudio) con un intervalo de aumento de 50 m/s. Los tiempos donde se presenta horizontalidad significa que la velocidad constante utilizada es la velocidad específica de esa zona de reflexiones horizontalizadas. Ninguna velocidad funciona para todo el registro, sólo al intervalo de tiempo específico (Figura 3.4). Las mayores velocidades responden mucho mejor a profundidades alta y viceversa (Figura 3.4), por lo

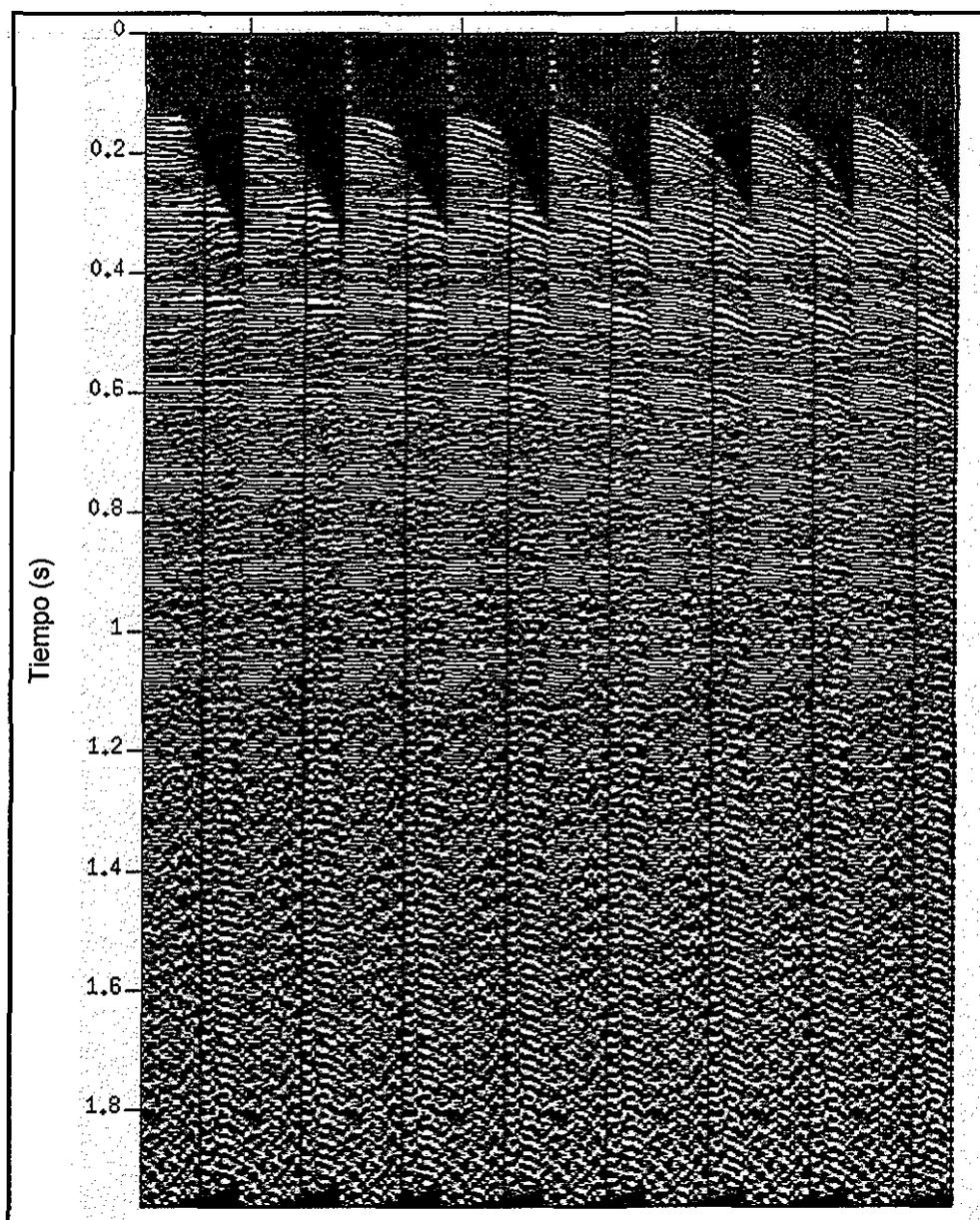


Figura 3.4. Análisis de velocidad bajo el método *Velocidad Constante*. Esta sección muestra el CDP 3646 de la línea 22 repetido 8 veces. En cada registro se aplica una velocidad constante diferente para corregir por NMO: 1500, 1550, 1600, 1650, 1700, 1750, 1800 y 1850 m/s respectivamente. Las reflexiones horizontales indican que la velocidad usada corrige el reflector a esa profundidad. Si el reflector aun mantiene una hipérbola positiva, la velocidad aplicada es todavía baja. Cuando es hipérbola negativa la velocidad aplicada fue demasiado alta.

cual se corroboran los principios, que la velocidad normalmente aumenta con la profundidad y que la velocidad mínima esperada en áreas marinas es ~ 1500 m/s (velocidad en el agua). Este proceso se realiza en varios CDP's de la sección. Con estos diagramas se estima el modelo de velocidades extrayendo el tiempo donde haya horizontalidad en los reflectores y su correspondiente velocidad.

Alternativamente, utilizando el método *Espectro de Semblanza* se puede obtener un modelo mucho más detallado de velocidades, siendo más útil para secciones con múltiples reflexiones [Yilmaz, 1987]. El método está basado en la correlación cruzada de las trazas de un CDP [Yilmaz, 1987]. Los gráficos resultantes son una serie de máximos y mínimos que se disponen como isolíneas de igual semblanza (Figura 3.5). El objetivo con esta gráfica es localizar las zonas de valor máximo, que representarían aquellos reflectores con mayor contraste en impedancia acústica. En esta parte se debe tener especial cuidado de seleccionar la semblanza del reflector primario y descartar la alta semblanza del múltiple (Figura 3.5). Ambos muestran altos en semblanza y una localización similar en tiempo, la diferencia radica en que la velocidad de los múltiples es mucho menor que la del reflector primario.

Este análisis se realizó en varios CDP's de las secciones ULLOA-99, específicamente en aquellos sectores o áreas a lo largo de la línea que tienen características promedio diferentes a los de su entorno o con mayores variaciones laterales en complejidad estructural. Para evaluar previamente este grado de complejidad, se construyó una sección con las trazas de mínimo offset y se obtuvo una vista preliminar de la sección real. Usando esta sección preliminar se definieron las zonas donde debía hacerse mayor y menor número de análisis de velocidad. El número más alto de análisis se realizó en las secciones sísmicas procesadas de la parte Oeste.

Corrección por NMO. La corrección por NMO utiliza el modelo de velocidades estimado en el análisis de velocidad para normalizar los reflectores con una superficie hiperbólica a una horizontal, y corregir los retardos de las reflexiones de los CDP's que están a mayores offset (Figura 3.6). La palabra NMO significa *Normal Moveout* (que se refiere a la desfase con respecto a la incidencia normal de los rayos). Si el modelo de velocidades utilizado es correcto, los registros resultantes tendrían todos reflectores horizontales (asumiendo capas planas). Visualmente se puede constatar la coherencia del resultado, al comparar el obtenido (hipérbola) con el esperado (reflector horizontal). Si el reflector calculado aun mantiene una hipérbola positiva, indica que la velocidad aplicada todavía es baja. Por el contrario cuando es una hipérbola negativa, la velocidad aplicada fue

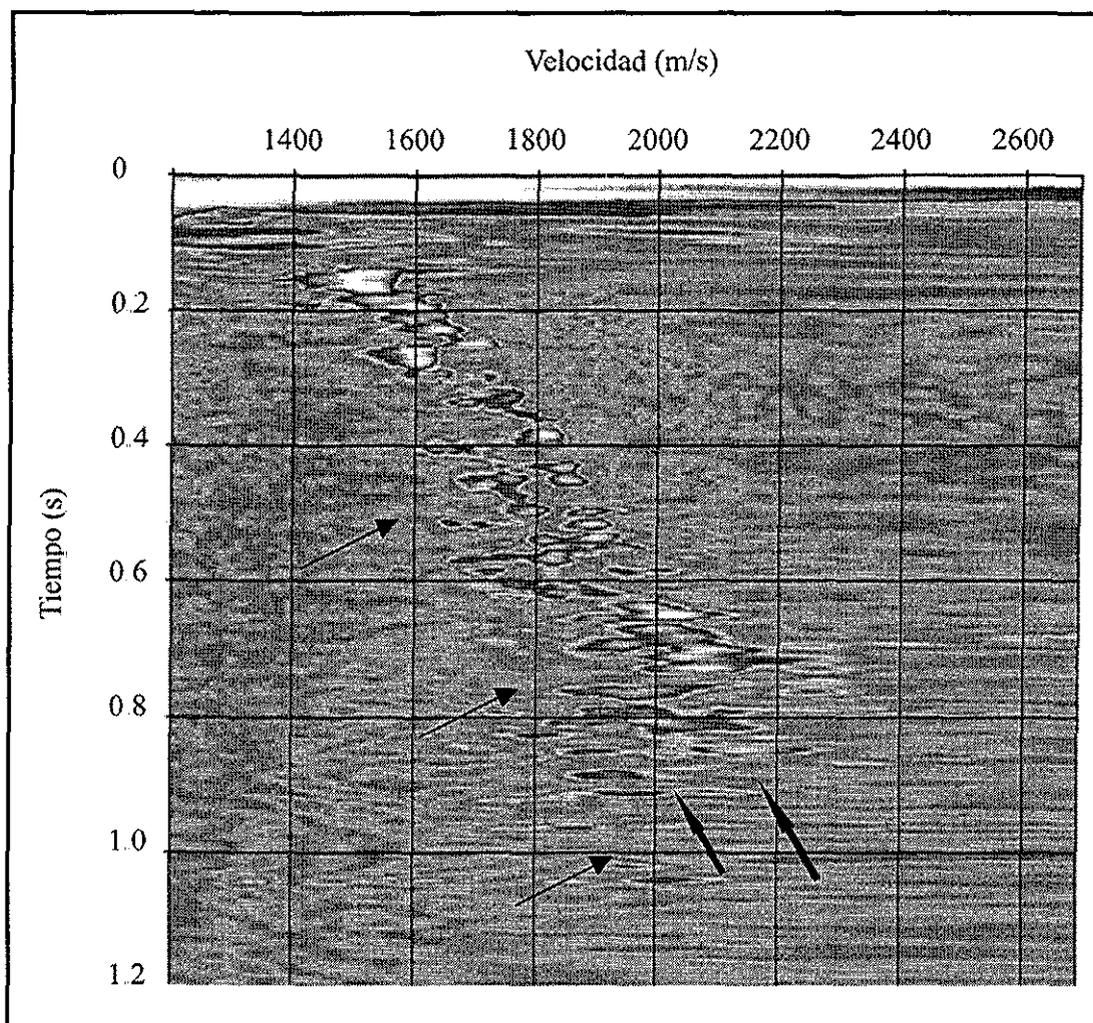


Figura 3.5. Análisis de velocidad bajo el método *Espectro de Semblanza*. La gráfica muestra el espectro de semblanza del CDP 3646 de la línea 10. Este espectro se utiliza para realizar el análisis de velocidad de un CDP. La semblanza alta se presenta en los colores más claros, estas zonas definen los tiempos en los cuales las velocidades correspondientes corrigen el reflector por NMO. Este método estima un modelo de velocidad más detallado que el calculado por el método *Velocidad Constante*. La orientación de las flechas gruesas muestra dos tendencias de semblanza alta. Una define las velocidades los reflectores primarios (derecha) y la segunda, la velocidad de los múltiples (izquierda), cuya tendencia es mostrada con las flechas delgadas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

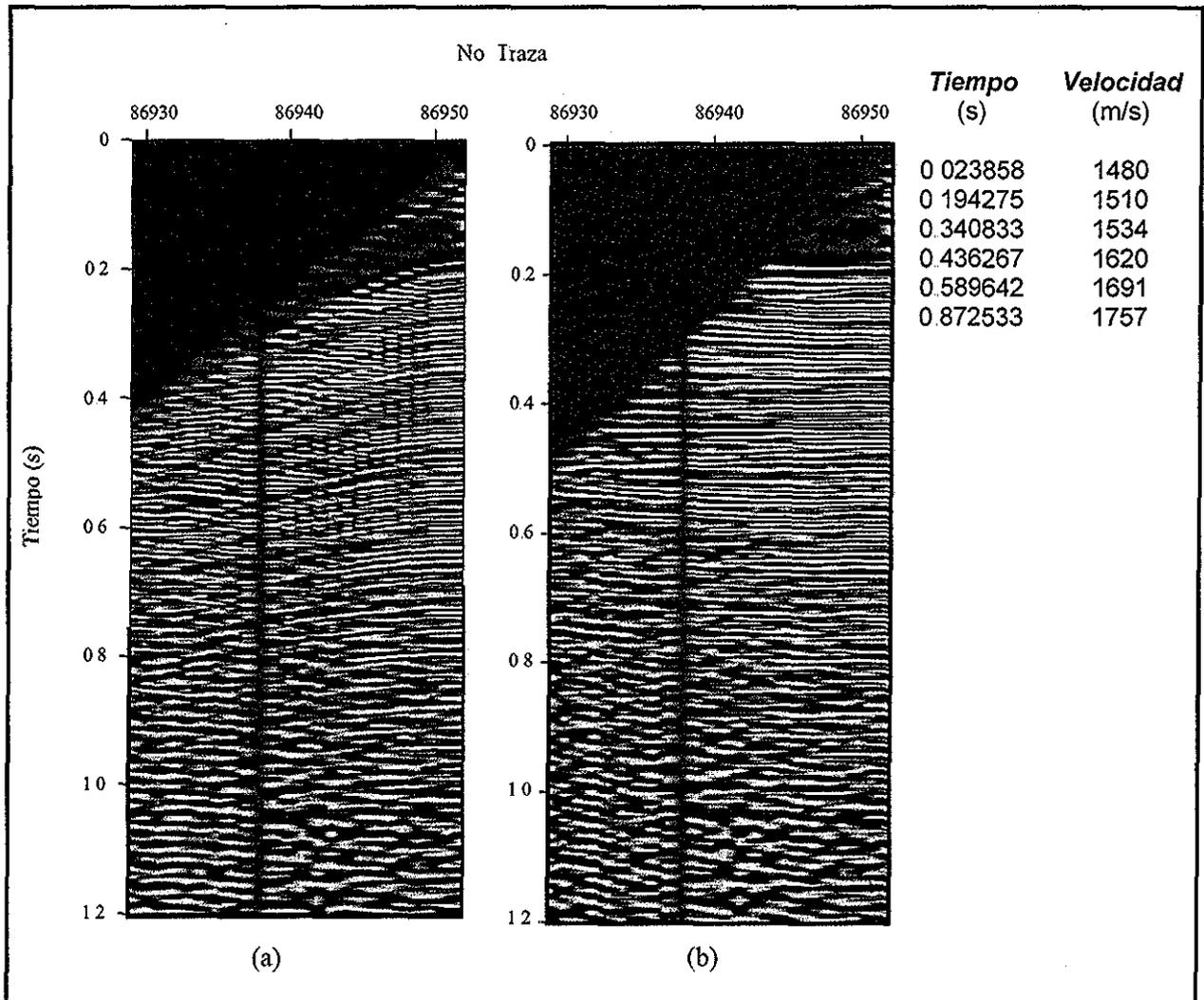


Figura 3.6. Corrección de NMO usando modelo de velocidades. La gráfica muestra el CDP 4000 de la línea 10. (a) Registro con hipérbolas que representan la respuesta al retraso ocasionado por el efecto del *offset* en un CDP (NMO). (b) Corrección por NMO usando el modelo de velocidades adjunto, con lo cual se trata de remover las hipérbolas, y corregir el efecto del *offset*.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

demasiado alta (Figura 3.4). Las velocidades utilizadas en esta etapa son velocidades de procesado, que coinciden aproximadamente con las velocidades del medio si la geometría es de capas planas y horizontales.

Apilamiento y Migración. En este proceso se suman todas las trazas que definen un CDP (corregidos por NMO) a una traza única, la cual representaría el nuevo CDP en una sección apilada. El *apilamiento* es referido comúnmente como “*stack*”. La sección resultante grafica conjuntamente todos estos nuevos CDP’s. La importancia en este proceso es el haber corregido correctamente por NMO todos los CDP’s. Si el modelo de velocidades no corrige adecuadamente el NMO, el apilamiento da como resultado una sección degradada e irreal.

A partir de este paso, un intérprete puede iniciar su trabajo de investigación sobre el subsuelo, si la estratigrafía y las estructuras son reconocibles. De otro modo, los datos requerirían ser migrados. La *migración* es un proceso que mejora la resolución lateral de las secciones, restaura los echados a sus posiciones correctas y remueve las difracciones ocasionadas por reflectores que presentan cambios bruscos en buzamiento, presencia de fallas y fracturas, etc [Revisar Roberts y Cordell, 1980; Badley, 1985; Yilmaz, 1987].

3.1.3. Digitalización Sísmica.

Esta etapa es el inicio de la interpretación sísmica, y está basada en resaltar el fallamiento y los horizontes más importantes que definen contraste en carácter sísmico de la sección (por cambios de facies o de litología). La digitalización del fallamiento se inicia con la sección apilada y/o migrada; luego se digitaliza los horizontes, comenzando en la sección con menos fallamiento. Esto asegura iniciar la digitalización en la línea de mayor continuidad lateral de los horizontes. Así se facilita la correlación con las secciones que cruzan, posiblemente de menor continuidad. Para seguir la continuidad del reflector correctamente, la digitalización toma en cuenta la amplitud y los cambios de fase (que relacionan las variaciones en los coeficientes de reflectividad de los horizontes) [Badley, 1985]. Como resultado habrá un grupo de secciones en dos dimensiones (2D), que al conjuntarlas con las secciones ortogonales se genera un arreglo en tres dimensiones (3D).

La digitalización puede ser hecha manualmente en papel, o mucho más fácil a través de un software especializado como LandMark-SeisWork (Anexo 2), el cual fue utilizado en este estudio.

Adicionalmente la digitalización puede ser realizada en Hampson & Russell (<http://www.hampson&russell.com/>), Geographix (<http://www.lgc.com/>), SeisWide, (<http://www.phys.ocean.dal.ca/~deping/>), etc.

3.2. Análisis Estructural y Secuencias Estratigráficas

En esta parte se describen los puntos de referencia más relevantes de la correlación de los eventos sismoestratigráficos y estructurales de las secciones que cruzan la Cuenca Wagner. La correlación sismoestratigráfica y estructural fue la actividad base para construir un esquema geológico y tectónico de la cuenca, y su relación con las áreas alrededor de la misma en el Norte del Golfo. En los siguientes párrafos se explican brevemente los parámetros de referencia que se consideraron para correlacionar los horizontes y el fallamiento observado en las líneas sísmicas ULLOA-99 y PEMEX-80

3.2.1. Correlación Sismoestratigráfica

La correlación sismoestratigráfica en la región de la Cuenca Wagner está basada en los datos sísmicos de ULLOA-99 y PEMEX-80. Ambos estudios tienen diferentes tiempos de registro, 1 s para ULLOA-99 y 6 s para PEMEX-80. Los dos tipos de secciones se usaron conjuntamente para complementar la interpretación de la parte somera con la profunda hasta los 5.5 s de TD. Sin embargo, la correlación más detallada de los horizontes fue realizada con los datos de ULLOA-99, por su mejor resolución en las secciones. Los datos de PEMEX-80 ayudaron en la correlación regional de la sismoestratigrafía, pero este análisis tiene poco detalle. La correlación entre las líneas sísmicas se inició con los horizontes mejor definidos y con mayor continuidad en las secciones sísmicas, comenzando en las secciones con menos deformación hasta correlacionarlas con las secciones ortogonales con efectos mayores de deformación

3.2.2. Correlación Estructural

La digitalización del fallamiento fue hecha como la primera tarea, pero la correlación estructural fue la tarea final. La mayor dificultad que se presenta para realizar la correlación estructural es reconocer una misma falla en varias secciones muy separadas entre sí. Las dudas inician con estimar la orientación, la longitud esperada, la relación con las fallas vecinas y con la estratigrafía que afecta o que la cubre. Existen muchas incertidumbres alrededor de una correlación de un marco estructural

complejo basado en una baja densidad de datos. Por este hecho se realizó la correlación de las fallas al final, al contar con un mayor número de argumentos posibles que apoyen la interpretación entre varias líneas sísmicas.

Se marcó en un mapa temático la localización de las estructuras más importantes vistas en las secciones con una pequeña línea perpendicular (LP) a la dirección de la sección sísmica. Esta actividad se realizó exclusivamente para las líneas de PEMEX-80. Las marcas LP predicen el rumbo y el sentido del buzamiento aparente observado en la sección. No se marcaron las secciones de ULLOA-99 con líneas LP, debido a que el fallamiento principal se correlacionó en su totalidad, incluso con algunas estructuras a profundidad de PEMEX-80. El objetivo de la marcación LP en la región que encierra los datos de PEMEX-80 es dejar una cartografía del fallamiento general para estudios posteriores y para mostrar en primera instancia, una tendencia general de las estructuras a profundidad en la zona del Norte del Golfo.

El proceso de correlación en ULLOA-99 inicia con las fallas principales, agrupando los trazos de falla de la misma sección sísmica, que se presentan ramificados en la zona somera de la línea (~1 s de TD), pero a profundidad pueden pertenecer a un mismo sistema. Después de definir los grupos de fallas, la correlación se realiza entre las líneas sísmicas, realizando una primera iteración de conexión de fallamiento entre las secciones (esto dependerá del ambiente tectónico esperado). La batimetría puede ser una herramienta importante en esta tarea. Adicionalmente, habrá correlaciones más evidentes que ayudarán a definir los trazos de aquellas correlaciones que demanden más análisis. El desplazamiento vertical observado en las fallas también ayudó a inferir la longitud de la estructura (se describe el método más adelante), para saber cuánto podría aportar esa falla específica en el trazo de la falla principal hasta la siguiente sección sísmica. Los desplazamientos normales del fondo marino también sirvieron de base para definir el fallamiento activo que afecta los sedimentos más recientes.

La identificación de fallamiento con *estructura en flor negativa* fue importante en el agrupamiento de los trazos de fallas someros de una misma sección sísmica. Se utilizaron algunas características sismológicas establecidas por Harding [1990] y Busby e Ingersoll [1995], para reconocer estas estructuras de régimen transcurrente en una sección sísmica. Estas se relacionan con una configuración particular de las reflexiones, a causa de la ocurrencia de una falla con movimiento lateral u oblicuo. Las reflexiones se distribuyen con una geometría sinforme en la parte somera, y se

convierten en un sólo trazo de falla a mayor profundidad. Morfológicamente se observa una pequeña subsidencia que define los límites de las fallas últimas de la *estructura en flor negativa*.

En resumen, la correlación de los grupos de fallas entre varias secciones sísmicas tuvo como base varios parámetros de referencia:

- Magnitud del desplazamiento de la falla o grupo de fallas
- Edad relativa de la falla. Es decir si el fallamiento *afecta* o *no afecta* los sedimentos más recientes; o en otras palabras si la falla desplaza normalmente el fondo oceánico.
- Magnitud y características particulares de la *estructura en flor negativa* observada en una sección. El tamaño o cobertura de la estructura sirve para elegir la estructura correlacionable de la siguiente sección. El cambio en el carácter sísmico de la sección al cruzar estas estructuras, es una característica particular para inferir la correlación entre las secciones.
- Cercanía y/o posible asociación del trazo de falla a los sistemas de fallamiento ya correlacionados
- Sentido del buzamiento aparente de la falla, para diferenciar dominios.
- Estratigrafía diferenciada por el carácter sísmico de las secciones. Aquí ayudaría en gran medida la información de núcleos de pozo para calibrar la sección. Desafortunadamente no hubo disponibilidad de estos datos
- Uso de modelos teóricos analógicos y de resultados de campo en otras regiones, afines con el tipo de ambiente de la Cuenca Wagner

El desplazamiento observado fue el primer filtro de la información para identificar las fallas principales que podrían estar controlando el sistema. Se hizo énfasis en las fallas con *estructura en flor negativa* y en las fallas que afectan los sedimentos recientes y desplazan normalmente el fondo oceánico. Posteriormente, se evaluó qué fallas de éstas podrían ser correlacionables entre secciones con apoyo de la batimetría. Varias fallas se identificaron usando estos argumentos morfológicos, que a su vez sirvieron para dar una idea de la orientación que podrían tener las demás fallas en la zona (se asume condiciones tectónicas similares que controlan el sistema). Esta tarea es afectada en alguna manera por la distancia entre las líneas (~10 km) y la poca profundidad alcanzada por los registros (~1 km). Hasta esta etapa de la interpretación se tienen las fallas principales; lo siguiente es definir o correlacionar las fallas menores asociadas a estos sistemas principales.

Las fallas menores se correlacionaron teniendo en cuenta la longitud de la falla, por lo cual se definía si la falla era de suficiente distancia para alcanzar la siguiente sección, o por el contrario sería una falla corta que sólo se observaría en una sola línea sísmica. La distancia entre líneas sísmicas es mucho mayor que la profundidad disponible de las secciones (~10:1). Es una profundidad baja para caracterizar y diferenciar qué fallamiento menor puede correlacionarse entre dos líneas sísmicas separadas 10 veces más. Por lo cual se necesita estimar la longitud probable de la falla, para definir si el trazo de la estructura es suficiente para observarse en la próxima línea sísmica. Surgen entonces las siguientes preguntas: 1) ¿Qué longitud mínima o máxima debería tener la falla, para observarse en dos secciones sísmicas distantes? 2) ¿Cómo se relaciona la longitud de la falla con el tamaño o desplazamiento de la falla? Los modelos que documentan Dawers et al. [1993], Dawers y Anders [1995], Schlische et al. [1996], Willemse et al. [1996] y más reciente Cowie y Roberts [2001] predicen que el desplazamiento es proporcional a la longitud, ¿pero en qué relación estarían? Estos modelos numéricos sugieren que la longitud de la falla puede estimarse utilizando la relación lineal entre el máximo desplazamiento normal y la longitud de la falla: $D = \mu L^n$. Donde, L es la longitud de la falla (km), D es el desplazamiento vertical (m), μ es una constante que representa las propiedades físicas de la roca y n es una constante que fluctúa entre 1 y 2 [Cowie y Roberts, 2001]. Para el presente estudio se utilizó $n=2$ con el argumento de calcular la máxima longitud de la falla. Esta expresión garantiza de manera conservadora con un criterio teórico, la estimación de la longitud máxima de una falla con base en un desplazamiento observado. De esta forma se calcularon las longitudes de la mayoría de las fallas asociadas a las estructuras principales en la Cuenca Wagner. El 91 % de las longitudes estimadas fueron menores a 10 km, en estos casos se dibujaron las trazas con la longitud calculada para cada una, con centro la línea sísmica.

En resumen, la correlación de los datos de ULLOA-99 contempló un grupo de fallas principales y un grupo de fallas menores asociadas. El primero se relaciona con el agrupamiento de una familia fallas de una misma sección, que se espera sea un único sistema a profundidad. Luego se correlaciona con las equivalentes en las otras secciones, para ello se proponen diversos parámetros de referencia. Y por último, las trazas de las fallas menores asociadas a estos sistemas principales se grafican con una longitud, que se estima de acuerdo a la relación lineal con el desplazamiento normal máximo de la falla.

4. Resultados

El tratamiento de los datos sísmicos trajo una serie de resultados que abarcan desde secciones sísmicas procesadas, hasta la digitalización de eventos estratigráficos y estructurales (discordancias, cambios litológicos y presencia de fallas). El detalle estructural y estratigráfico del área de Wagner resulta de la alta resolución en los datos de las líneas ULLOA-99. Aunque los datos disponibles de PEMEX-80 tienen baja resolución con respecto a ULLOA-99, las secciones de PEMEX-80 sirvieron para conocer no sólo la cuenca a profundidad, también las áreas cercanas a la cuenca. Conjugando los resultados de ambas campañas de adquisición, se presentan los resultados del presente estudio iniciando con la descripción de las secciones sísmicas de PEMEX-80 en tres grupos (Líneas SW-NE, SSW-NNE y NNW - SSE) y luego ULLOA-99 en dos grupos (líneas NW-SE y líneas SW-NE). Posteriormente se describe el fallamiento asociado a la Cuenca Wagner y zonas cercanas y finalizando con las descripciones de los horizontes sismoestratigráficos interpretados de la Cuenca Wagner con los datos ULLOA-99.

4.1. Secciones Sísmicas

La alta resolución de los datos ULLOA-99 dio como resultado secciones sísmicas con excelente definición para el primer segundo de tiempo doble (TD), con mejor calidad hacia las unidades más someras. La resolución de ULLOA-99 tiene un espesor de reflectores desde ~5.5 ms (áreas de estratos más delgados: ~4.4m), hasta ~11 ms (estratos de mayor espesor: ~9.3m). Por ello, tanto la estratigrafía como los sistemas estructurales de la cuenca pudieron ser digitalizados y analizados en detalle. Por su parte, los datos de PEMEX-80 tienen una calidad aceptable a lo largo de todo el tiempo de registro de 6 s de TD, con mejor definición entre 1 y 5 s de TD. Sin embargo, las secciones de PEMEX-80 son de resolución menor que la ULLOA-99, mostrando los espesores de reflector desde ~33 ms (~25 m) hasta ~120 ms (~250 m).

El tiempo total de registro de los datos sísmicos de ULLOA-99 son 2 s de TD; sin embargo, sólo se puede estudiar el primer segundo debido a la gran concentración de ruido coherente y no-coherente que tienen las secciones en la parte más profunda. Los múltiples son parte importante del ruido coherente que no pudo removerse. Con respecto a esto, las secciones dispuestas en dirección NW-SE (Anexo 3) muestran un comportamiento peculiar, con la presencia de un fuerte paquete de múltiples sólo en el sector NW de las secciones. Esta característica sumada con la baja profundidad del agua es esta zona hacen que los múltiples aparezcan muy cerca del fondo oceánico y hasta la

región profunda de la sección, enmascarando la mayor parte de la columna estratigráfica. En contraste, este tipo de ruido no ocurre en el sector SE, donde el efecto de los múltiples es mínimo. Una de las razones que pudo haber ocasionado este ruido, es la presencia de un material en el fondo oceánico con una alta coherencia, que funcionó como un espejo de la señal sísmica, sin dejar que una cantidad importante de energía fuera transmitida al subsuelo. Este efecto es evidente en las secciones 6 y 10, pero sólo en la línea 6 fue posible identificar un tipo de material superficial con estas condiciones (Anexo 3).

En las secciones de PEMEX-80 no existe esa particularidad de múltiples en el sector NW. Una de las causas que puede estar provocando esta diferencia son las fuentes sísmicas aplicadas, ya que para ULLOA-99 se utilizó un solo cañón de aire para todas las líneas. Esto hace que se genere una sola banda de frecuencias, en este caso altas, resultado de utilizar cañones pequeños. Las frecuencias altas por su naturaleza tienden a quedarse atrapadas en las regiones someras y en capas delgadas. Es probable que esto sea parte de la causa de tener sólo registros de las zonas más superficiales de la sección. En contraste para PEMEX-80, la fuente de energía fueron 7 cañones de aire de mayor tamaño, los cuales generaron una banda más amplia que incluía frecuencias altas y bajas. Esto provocó muy probablemente que las ondas pudieran atravesar la barrera estratigráfica somera y transmitirse a zonas más profundas.

Durante el procesamiento de los datos de ULLOA-99 no fue posible atenuar significativamente los múltiples del sector NW de la cuenca, a pesar de haber probado diversas técnicas (deconvolución predictiva, transformada radón, tau-p y filtros Fk). Esto ocasionó que el enmascaramiento de la mayor parte de los reflectores no pudiera ser removido en la parte profunda de la sección, y que el análisis estratigráfico y estructural fuera mínimo. Sólo aquellas estructuras que afectan el fondo marino fueron cartografiadas. Afortunadamente en la parte central y SE de las secciones NW-SE (Anexo 3), este efecto de los múltiples no fue tan marcado. Esta característica de ausencia de fuertes múltiples también fue observada en las secciones 21_2 y 23 que están orientadas en dirección SW-NE. Finalmente, es importante mencionar que la presentación visual de las secciones en el Anexo 3 y Anexo 4 se hicieron con una fuerte exageración vertical, dando la impresión que los planos de falla interpretados presentan más inclinación de la que tienen, mostrando una apariencia de verticalidad.

La densidad de fallamiento calculado en las secciones es un promedio del número de fallas que afectan la sección. Se estimó haciendo un conteo de todo el fallamiento a lo largo de la línea sísmica y se normalizó con la longitud de la misma. Los resultados arrojados clasificaron la cuenca en zonas

de alta densidad (NW-SE) y baja densidad promedio (SW-NE). Los valores se mencionan en las descripciones de cada grupo de secciones.

4.1.1. Datos Sísmicos PEMEX-80

El análisis de las secciones sísmicas en las áreas circundantes a la Cuenca Wagner se llevó a cabo con base en cinco líneas sísmicas procesadas por el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP): 5027, 5032, 5037, 5043, 5500 (Figura 1.2). Las líneas 5027, 5037 y 5043 tienen dirección SW-NE, la línea 5500 tiene dirección SSW-NNE y la línea 5032 está orientada NW-SE. Todas estas líneas están migradas por diferencias finitas, y con la característica sísmica de estar afectada muy poco por ruido coherente en forma de múltiples.

La única disponibilidad de las secciones de PEMEX-80 son impresiones en papel. En el presente estudio se mostrará solamente la sección sin migrar 5037, para resaltar las estructuras que controlan la cuenca en los 6 s de TD de la sección. El formato de presentación en papel de las secciones de PEMEX-80 es la ondícula sísmica. Este tipo de formato tiene menos resolución que el mostrado por ULLOA-99 (densidad variable), por este hecho algunos rasgos estructurales y estratigráficos no pudieron ser observados con un mejor detalle en las secciones de PEMEX-80. Pero aún así, muchos datos estructurales y estratigráficos se cartografiaron con énfasis al fallamiento.

Las secciones de PEMEX-80 muestran mejor resolución hacia la parte media-profunda, donde los reflectores y las zonas de fallamiento son observados con más detalle. En contraste, hacia regiones someras los reflectores muestran un carácter sísmico difuso. Esto se explica por el filtrado aplicado a las secciones sísmicas durante el procesamiento (Tabla 4.1), con el cual se están removiendo las altas frecuencias que resaltarían mucho mejor las regiones superficiales.

<i>Tiempo (s) TD</i>	<i>Filtro pasabanda (Hz)</i>
0.05 – 0.40	15 – 45
0.40 – 2.90	12 – 35
2.90 – 6.00	5 – 20

Tabla 4.1. Filtrado usado por el IMP en el procesamiento de los datos de PEMEX-80.

Líneas Sísmicas SW – NE y SSW – NNE. Las líneas sísmicas en esta dirección atraviesan la cuenca por su parte Norte, central y Sur (líneas 5027, 5037, 5043 y 5500 en la Figura 1.2). Las longitudes y su espaciamiento entre ellas varían. Al Norte las líneas tienen una longitud de 50 km, pero al centro y sur cada una tiene una longitud de 120 km. Los espaciamientos son de 25 km (Norte – centro) y 15 km (centro – Sur) (Figura 1.2). Sólo con este grupo de líneas se tiene una serie de vistas transversales de la Cuenca Wagner, principalmente con la sección apilada 5037 (Figura 1.2).

Línea Sísmicas NNW – SSE. La línea disponible en la dirección NNW-SSE es un perfil externo de la Cuenca Wagner, en el sector Este (línea 5032 en la Figura 1.2). Los rasgos estructurales y estratigráficos son un poco diferentes a los que se pueden ver directamente en la cuenca, con reflectores horizontales de buena continuidad lateral, donde no se observa ningún tipo de depocentro. El fallamiento no es muy denso y se observa con buzamiento casi vertical en la mayoría de los casos (sección 5032. Figura 1.2).

4.1.2. Datos Sísmicos ULLOA-99

Líneas Sísmicas NW- SE. Se interpretaron en esta dirección tres líneas largas de ~70 km (6, 8 y 10 en el Anexo 3) y dos líneas cortas de ~ 11 km (3 y 22 en el Anexo 3). El procesado de todas las secciones de ULLOA-99 fue realizado por GPS-CALTECH. En esta dirección se reprocesó la línea 10. Estas líneas muestran secciones transversales de la Cuenca Wagner, con excepción de la línea 8, que está localizada en la parte terminal de la cuenca hacia el SW, justo antes de la división batimétrica con la Cuenca Consag. La separación entre las secciones de mayor longitud es ~10 km y la separación entre la línea 10 y cada una de las cortas ~4 km (Figura 1.2).

Estas secciones muestran la estratigrafía somera de la cuenca, hasta 1 s de TD; sin embargo disminuye la resolución de los datos por debajo de 0.4 s de TD, y desaparece por debajo del segundo de TD (Secciones 6, 8, 10 en el Anexo 3). A partir de esta profundidad el ruido coherente en la señal sísmica es alto, causando que se oculten todos los reflectores primarios de la columna, excepto para la sección 3 (Anexo 3), en la cual la resolución de cualquier reflector se pierde por debajo de 0.1 s de TD. Esta línea y la parte NW de las líneas 6 y 10 son las secciones afectadas por dicho ruido coherente (múltiples). Las líneas sísmicas 6, 8 y 10 (Anexo 3 y Figura 4.1) en esta dirección NW-SE tienen alta densidad de fallamiento afectando transversalmente la cuenca (~6 fallas/km).

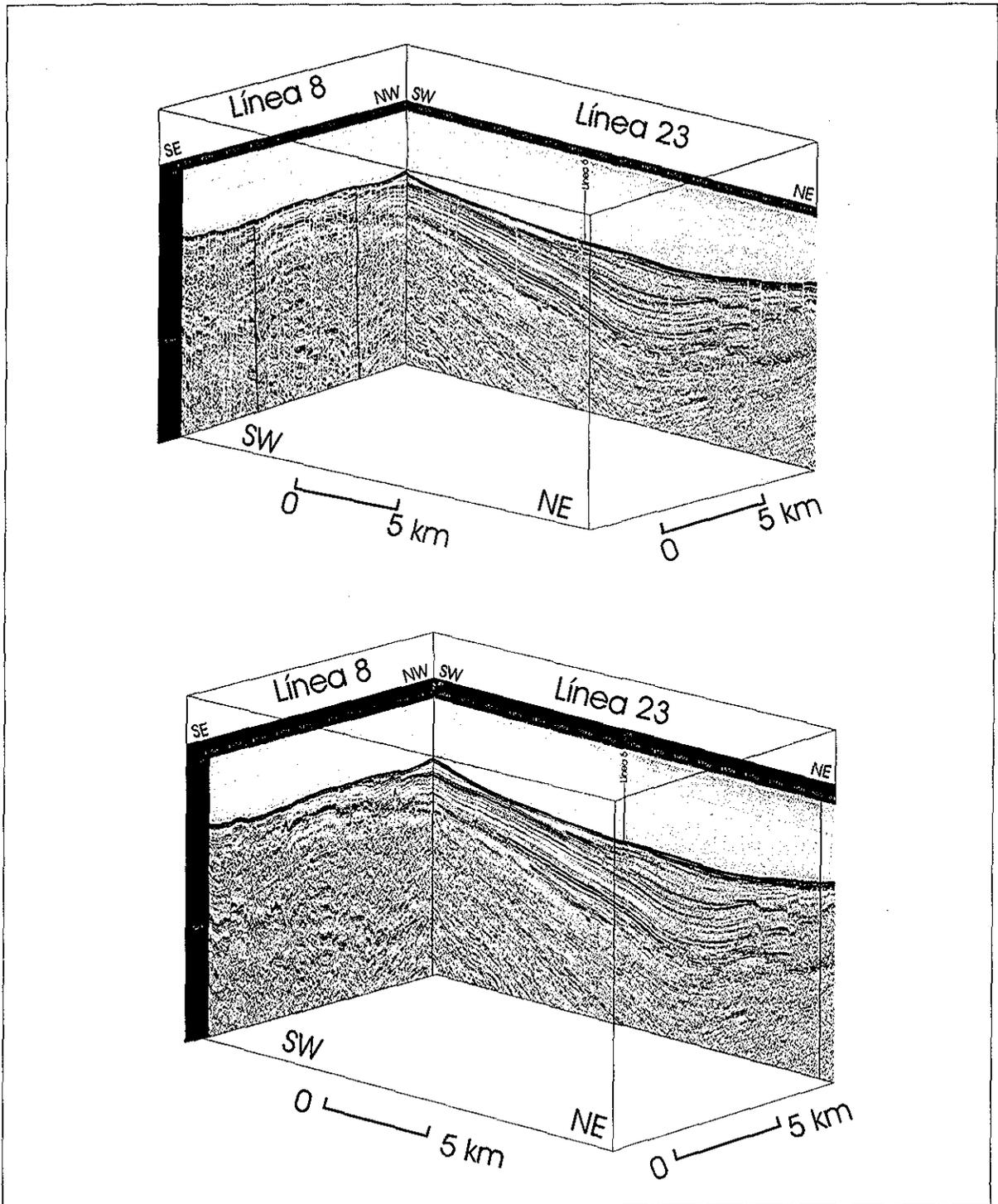


Figura 4.1. Diagrama panel mostrando la variación en densidad de fallamiento entre las secciones orientadas SW-NE y NW-SE. La sección 8 de ULLOA'99 tiene un promedio de ~6 fallas por km. En contraste la sección 23 tiene un promedio mucho más bajo, ~1 falla por km.

Líneas Sísmicas SW-NE. Las líneas SW-NE son ortogonales a las líneas NW-SE. En esta dirección SW-NE se interpretan las secciones 2, 21_2 y 23 (Figura 1.2 y Anexo 4) En esta dirección se reprocesó la línea 3 y 22. Las líneas SW-NE cruzan la Cuenca Wagner por su parte central (Línea 23) y ligeramente hacia el Este (Línea 21_2) y Oeste (Línea 2). La longitud estudiada de estas líneas fue ~42 km (Norte de la Cuenca Wagner hasta el sector Norte de la Cuenca Consag. La separación entre las Líneas 21_2 y 23 es ~11 km y entre las Líneas 23 y 2 es ~25 km (Figura 1.2). La orientación SW-NE define una vista longitudinal de la estratigrafía y estructura de la Cuenca Wagner. Para el sector Oeste de la cuenca no hay una sección cercana que apoye de forma clara la interpretación en la dirección SW-NE; sólo pudo utilizarse la línea 2 (Anexo 4), la cual brinda únicamente información de la parte somera de las estructuras y estratigrafía (es una sección del grupo que cubre el NW de la cuenca). La parte profunda es afectada con una alta concentración de ruido coherente que enmascara la visualización de fallas y estratos. Sin embargo, el ruido coherente afecta poco la calidad de las dos secciones 21_2 y 23 de este grupo de secciones SW-NE. La mejor resolución de los reflectores alcanza hasta los 0.6 s de TD en la zona del depocentro de la cuenca. Por debajo del múltiple la continuidad lateral de las secciones se afecta un poco.

La dirección SW-NE es un perfil longitudinal de la cuenca y en esta orientación la parte central tiene una baja densidad de estructuras (~1 falla/km Línea 23 en el Anexo3). Esto contrasta con la densidad observada en las líneas con dirección NW-SE (~6 fallas/km). Por otra parte, la línea 21_2 (Anexo3) difiere un poco de la línea 23, ya que tiene una densidad de fallas un poco mayor (~3 fallas/km). Esta característica de baja densidad de fallamiento en la cuenca y mayor densidad de fallas en sus alrededores (especialmente hacia el Este) es similar al escenario observado en las líneas NW-SE de ULLOA-99. A partir de estas diferencias en los sentidos NW-SE y SW-NE, puede ya notarse una influencia de la dirección en el grado de actividad tectónica relativa de la Cuenca Wagner. Esto será tratado en la discusión de los resultados.

4.2 Fallamiento

Inicialmente, se tomaron las líneas disponibles de PEMEX-80 para definir un marco regional y luego las secciones de ULLOA-99 para estimar el modelo local de la cuenca. Los datos de PEMEX-80 ayudaron a conocer *a-priori* un posible escenario estructural en el cual estuviera la Cuenca Wagner. La alta resolución de los datos de ULLOA-99 fue de gran apoyo en la identificación de las estructuras someras, varias de las cuales pudo correlacionarse con las estructuras profundas observadas en los datos de PEMEX-80 (Figura 4.2). En las siguientes secciones se describen los

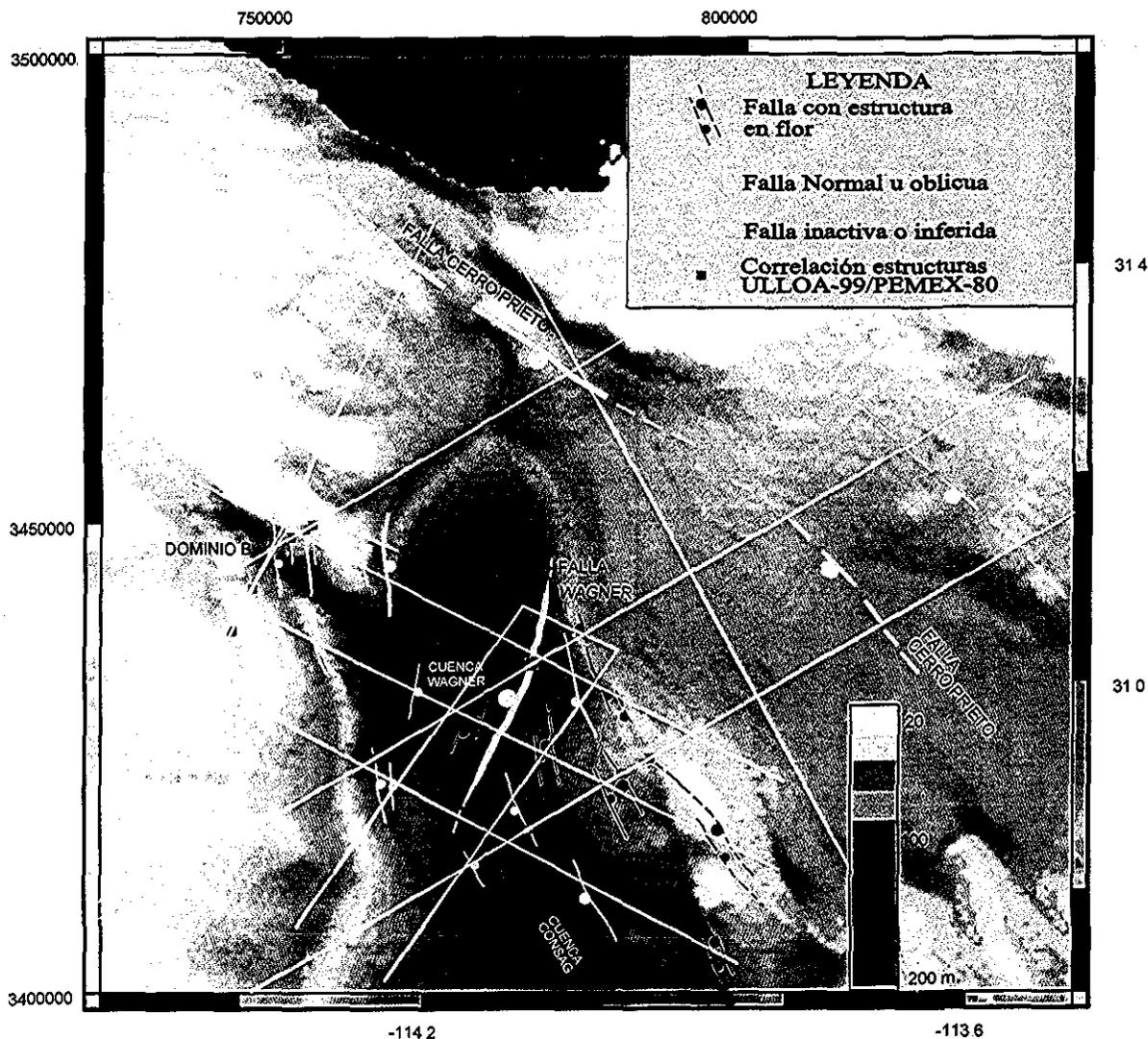


Figura 4.2. Mapa estructural de la Cuenca Wagner utilizando los datos sísmicos ULLOA-99 y PEMEX-80. La Falla Wagner se localiza en el borde Este de la cuenca (línea gruesa amarilla). Las fallas con estructura en flor negativa (color rojo) se encuentran afectando, principalmente, el sector Este de la Falla Wagner. Las estructuras mayores están diferenciadas por líneas más gruesas. La línea cortada en los extremos de la Falla Wagner indica terminación inferida de la traza y en el sector NE indican trazas de falla inactiva. Los cuadrados rellenos definen los sitios de correlación PEMEX-80 y ULLOA-99. Las coordenadas UTM pertenecen a la zona 11.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

dominios estructurales que se correlacionaron con los datos de PEMEX-80 y posteriormente se describen con los datos de ULLOA-99. Los dominios A y C de ambas campañas sísmicas describen las mismas zonas estructurales, sólo que PEMEX-80 refiere la parte profunda y ULLOA-99 la parte somera

4 2.1 Secciones PEMEX-80

El fallamiento obtenido a partir de las secciones de PEMEX-80 no fue correlacionable en muchos casos, debido a la alta separación entre las líneas sísmicas disponibles (>15km), y a la baja resolución que presentan las secciones por el tipo de formato de impresión (ondícula o *wiggle*). La resolución también se afecta por el filtrado de las altas frecuencias que aplicó a los datos el IMP, que influyen directamente en la visualización de la parte somera

Las secciones de PEMEX-80 se tomaron como base para la interpretación regional alrededor de la Cuenca Wagner. En el sector NW de la cuenca, dos líneas que se cruzan (secciones 5500 y 5027 Figura 4.3) arrojaron varias correlaciones de falla. En el sector NE, se observan fuertes desplazamientos en el basamento, característica que apoyó la correlación del fallamiento entre las líneas. Localmente en el costado Este de la Cuenca, estructuras de la línea 5037 se correlacionan con estructuras de las secciones ULLOA-99. Para el resto de las líneas sísmicas las estructuras no fueron correlacionadas, su ubicación se muestra con marcas LP sobre las líneas sísmicas en el mapa (Figura 4.3). Las líneas LP indican las direcciones de rumbo y buzamiento aparentes del fallamiento extraídos de la sección. La densidad de fallamiento fue muy variable en las secciones de PEMEX-80 teniendo en cuenta las marcas LP, pero en general la densidad más estrecha fue de ~1 falla cada 2 km (Figura 4.3).

El fallamiento cartografiado con las secciones sísmicas de PEMEX-80 se clasificó en tres dominios (Figura 4.4): El Dominio A, en la zona central de la Cuenca Wagner; el Dominio B representa el fallamiento en el NW de la cuenca con las estructuras correlacionadas entre las líneas 5500 y 5027. El Dominio C-Pemex se relaciona con las estructuras al NE y Norte de la cuenca. En este último dominio también se incluye el resto del fallamiento que no se definió en los dominios A y B.

DOMINIO A de PEMEX-80. El Dominio A está representado por una falla lítrica y su fallamiento asociado (Figura 4.4 y Figura 4.5). La falla lítrica limita el borde Este de la cuenca con dirección ~N23E, a lo largo de ~30 km. La falla afecta las reflexiones de la sección apilada 5037 de PEMEX-

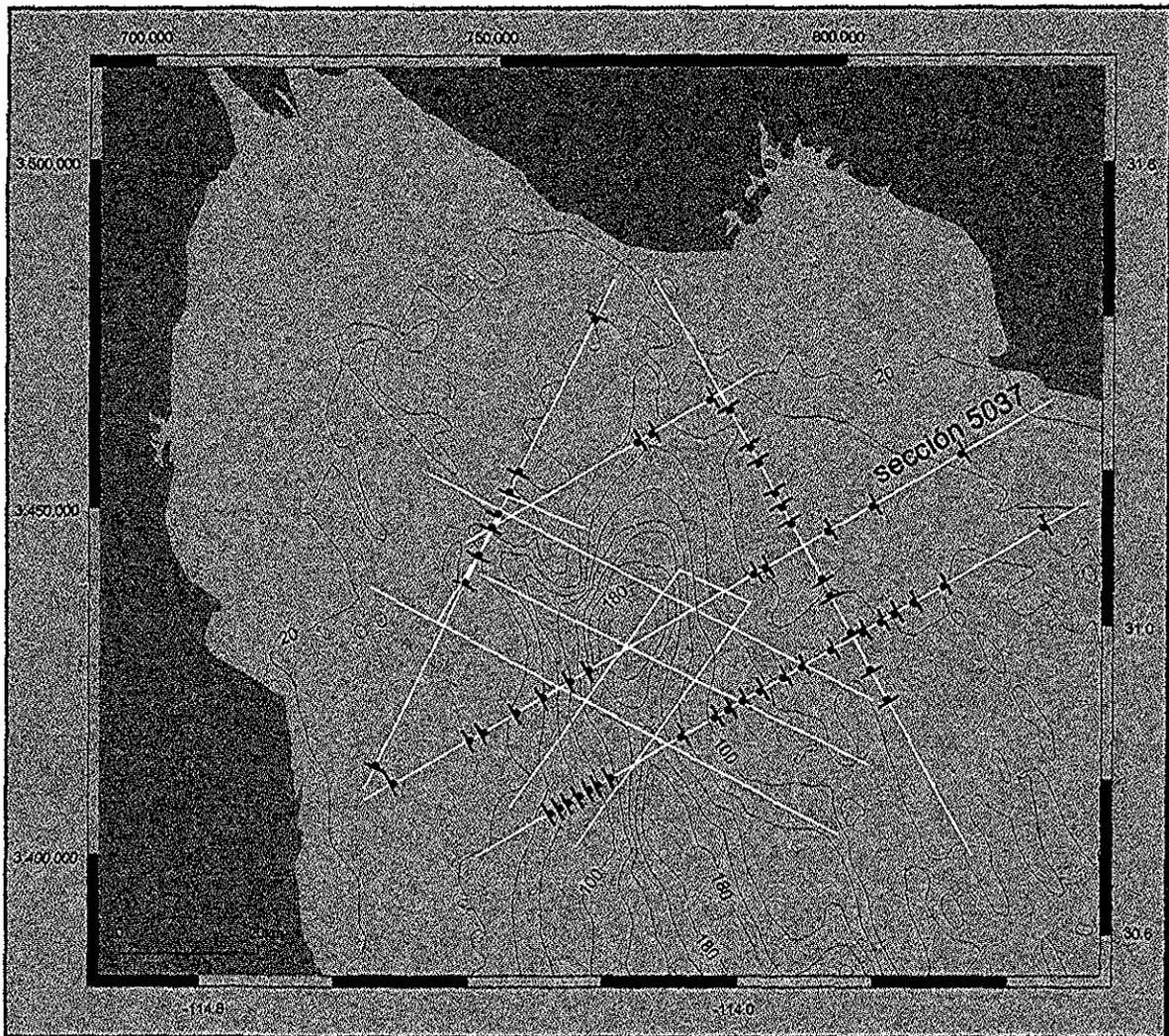


Figura 4.3. Cartografía del fallamiento regional alrededor de la Cuenca Wagner utilizando los datos sísmicos PEMEX-80. El mapa muestra las líneas sísmicas y la ubicación del fallamiento principal en las secciones sísmicas de PEMEX-80. Se marcó sobre las líneas sísmicas la dirección del rumbo y del buzamiento aparente.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

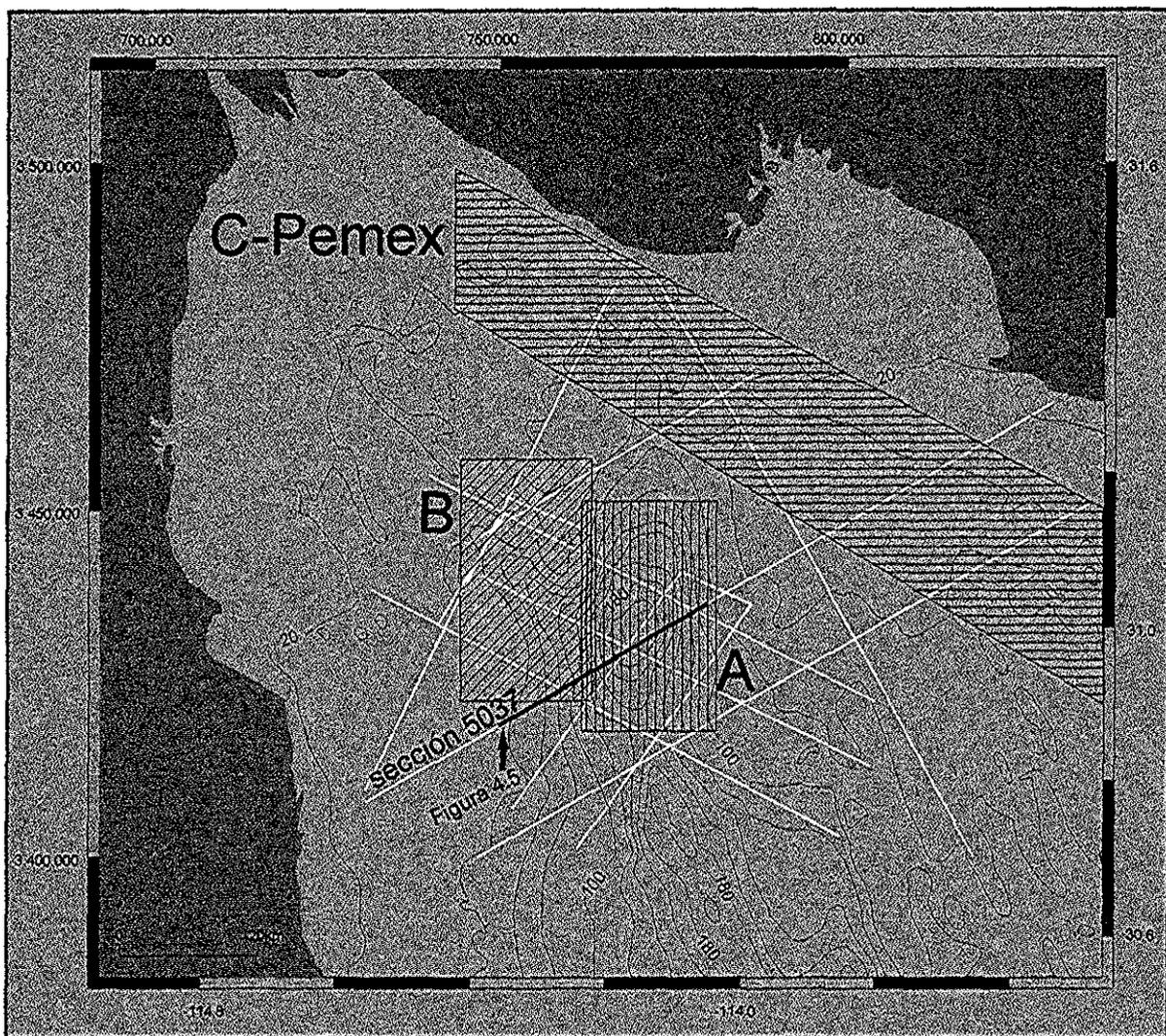


Figura 4.4. Dominios estructurales diferenciados con las secciones de PEMEX-80. Estas zonas definen las áreas donde fue posible correlacionar el fallamiento cartografiado de las secciones de PEMEX-80. Uno de los criterios que ayudó en esta correlación fueron los valores de desplazamiento vertical. Los valores altos (mayores a 1 s de TD) ocurren en el Dominio A (rayado vertical) y en el Dominio C-Pemex (rayado horizontal). Las correlaciones con desplazamientos bajos (que predominan entre 0.05 y 0.1 s TD) ocurren en el fallamiento del Dominio B (rayado oblicuo).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

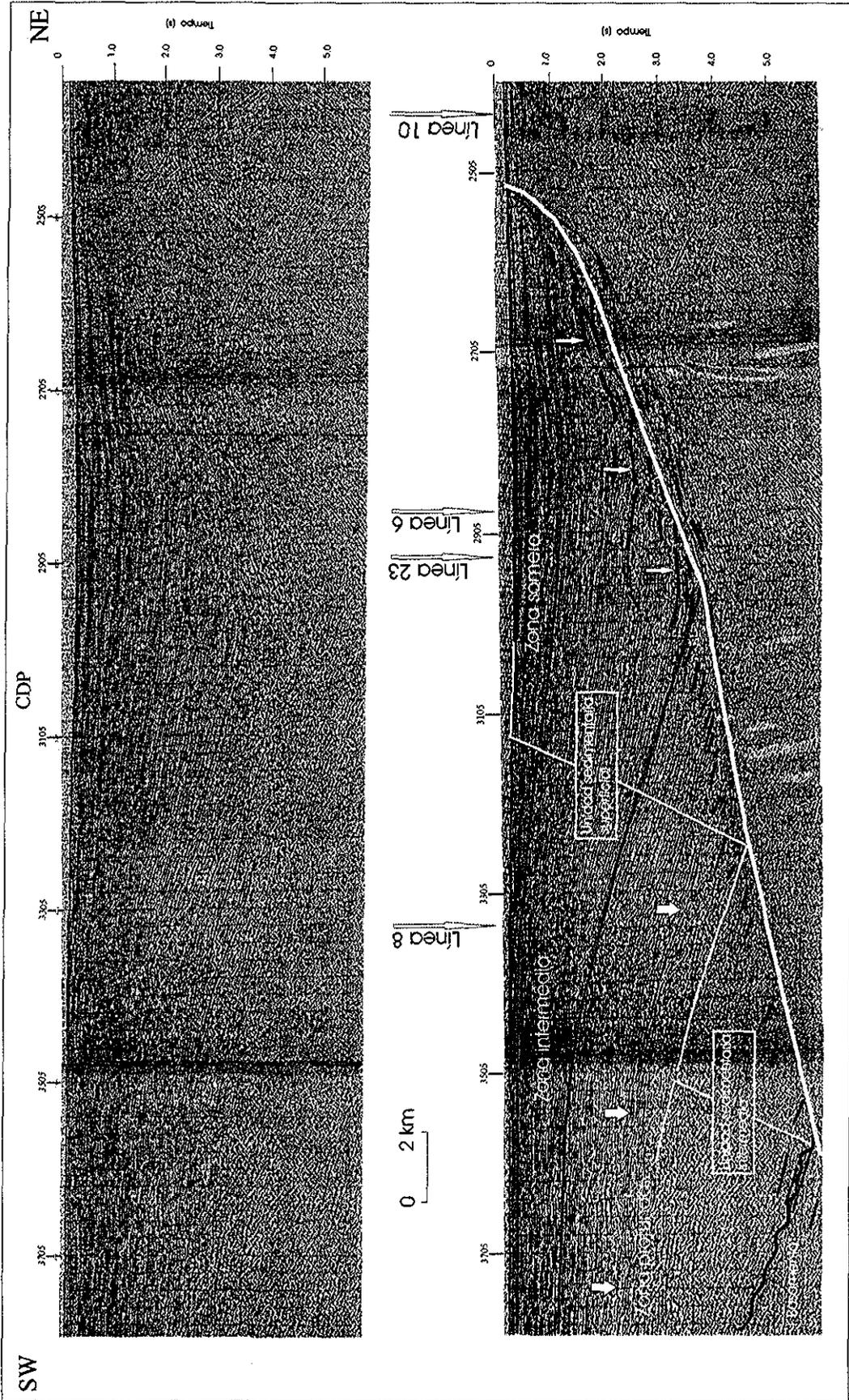


Figura 4.5. Falla Wagner, pliegues rollover y las unidades sismoestratigráficas en el bloque de techo de la Falla Wagner, en la sección 5037 de PEMEX-80. El azimut de la sección es 60°, en esta dirección la falla tiene un buzamiento aparente. El buzamiento real es ~79° al NE entre 0 y 0.9 s, ~58° entre 0.9 y 3.8 s, y ~28° por debajo de 3.8 s. Los pliegues rollover se diferenciaron en tres zonas: Somera, Intermedia y Profunda. Estos pliegues se asocian a cambios en la inclinación del plano de la Falla Wagner. Las flechas delgadas muestran los pliegues rollover de la zona intermedia. Las flechas gruesas muestran la forma del pliegue de la zona profunda. Estratigráficamente, se reconocieron tres unidades principales: El basamento y dos unidades sedimentarias (intermedia y superficial). La Figura 4.4 detalla la localización de este segmento de la sección 5037.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

80 (Figura 4.5) y las secciones 6, 8, 10 y 22 de ULLOA-99 (Anexo 3). La sección apilada 5037 muestra con mejor detalle la estructura a profundidad y con una expresión difusa la parte somera. El seguimiento de la traza de falla a nivel somero se hizo con los datos de ULLOA-99 y la batimetría. En las líneas 10 y 22 se observa una fuerte depresión o valle profundo en los CDP's 6750 (línea 10) y 1200 (línea 22) (Anexo 3), que infieren la presencia de la falla en la cuenca. Algunas características adicionales se presentan más adelante con los datos de ULLOA-99. Por la importancia de esta falla en el contexto estructural de la cuenca, se propone el nombre informal de “*Falla Wagner*” para esta falla lítrica en las descripciones posteriores.

En la sección 5037, la Falla Wagner presenta tres zonas diferenciadas por su buzamiento a profundidad. El buzamiento aparente en la parte profunda de esta sección ($> 2500\text{m}$) es $\sim 18^\circ$ al SW, y por conversión estereográfica se obtuvo un buzamiento real de $\sim 28^\circ$ al NW. En contraste, la parte somera (0 - $\sim 800\text{m}$) el buzamiento aparente inicia muy pronunciado con un valor $\sim 73^\circ$ al SW (real, 79° al NW), y disminuye en la parte intermedia $\sim 44^\circ$ al SW (real, 58° al NW) (Figura 4.5).

Con respecto a la parte profunda, la superficie de la falla no es completamente uniforme, por lo que el buzamiento no es constante (los 28° NW son un promedio) y existen cambios locales en la geometría del plano. Estas variaciones son importantes tenerlas presentes para dar respuesta a los diversos pliegues que aparecen en el bloque de techo, muy cerca del plano de la falla (Figura 4.5). Según Xiao y Suppe [1992] estos pliegues definen los *pliegues rollover*, los cuales son el resultado de los cambios relativos de buzamiento en el plano. Para estimar esta geometría de la falla se utilizó un modelo inverso, en el cual se usa la forma de las capas o los pliegues mismos del bloque de techo, para calcular la geometría del plano [Withjack y Peterson, 1993]. Los rasgos o formas de los pliegues ocurren generalmente en el bloque de techo porque son más fáciles de identificar que en el bloque de piso [Withjack y Peterson, 1993]. Desde la parte más profunda hacia la superficial, se observan tres zonas en el bloque de techo, diferenciadas por el tipo de pliegue rollover presente (Figura 4.5): 1) Entre 5.6 - 3.8 s TD; 2) Entre 3.8 - 0.9 s TD y 3) Entre 0.9s TD - fondo oceánico.

La zona profunda (5.6 - 3.8 s de TD) muestra los *pliegues rollover* más antiguos generados en una superficie cóncava del plano de falla. Los reflectores se cortan bruscamente por el plano de falla en esta profundidad, pero a medida que se alejan del plano las reflexiones se presentan con cierta curvatura convexa hacia arriba (entre 2 - 3.5 s ID, en los CDP 3445 a 3585. Figura 4.5). Esta geometría antiformal de largo período que define el *pliegue rollover* se documenta con detalle en la

literatura [Dula, 1991; Xiao y Suppe, 1992; Withjack y Peterson 1993 y Schlische, 1995], los cuales relacionan este pliegue a un plano de falla con una superficie cóncava.

La zona intermedia (3.8 - 0.9 s de TD) muestra otro tipo de *pliegue rollover* que se relaciona con superficies convexas del plano de la Falla Wagner (Figura 4.5). Se presentan como aparentes pliegues de arrastre, pero son otro tipo de estructuras tipo “*rollover*” que se documenta en Xiao y Suppe (1992) y Schlische (1995).

Por último en la parte más somera (0.9s TD – superficie del fondo marino) no se observa *pliegues rollover* con morfología similar a las zonas profunda e intermedia. Para la resolución de la sección 5037, los reflectores sismoestratigráficos muestran una geometría que tiende a ser horizontal en el bloque de techo y no es clara para el bloque de piso. Los reflectores están cortados por la Falla Wagner y se desconoce el desplazamiento sufrido debido a la carencia de reflectores guía que predigan el movimiento relativo.

Con el objeto de confirmar la naturaleza de la Falla Wagner y estimar la extensión que acomoda esta estructura, se convirtieron las velocidades RMS de la sección 5037 a velocidades intervalo (Figura 4.6), para tratar de correlacionar zonas de reflexiones con velocidades semejantes en los 6 s de registro de la sección. Estas nuevas velocidades se calcularon para identificar al menos un horizonte común en ambos costados del plano de falla, y estimar qué tanto desplazamiento acomoda la Falla Wagner. Los resultados sugieren un leve contraste en las velocidades intervalo a una misma profundidad en ambos costados de la Falla Wagner (Figura 4.6). La correlación resultante es difusa por la similitud y el leve contraste de los valores, y la baja densidad de análisis de velocidad en la sección. Esto ocasionó una ausencia de horizontes claros que se identificaran a ambos lados del plano de falla. Por estas causas, para estimar la extensión que acomoda la Falla Wagner se tomaron las reflexiones del basamento en el bloque de techo y se hizo un balanceo simple de la sección, llevando estas reflexiones (CDP 3585 en la Figura 4.5) a través del plano de falla hasta la superficie actual del fondo oceánico (CDP 2531 en la Figura 4.5). La distancia recorrida por el basamento de esta manera es ~28 km que equivale a ~26 km en distancia horizontal. Este valor representa el desplazamiento normal mínimo estimado para la Falla Wagner. Se asume para este cálculo que: 1) El fondo marino es el punto original del basamento, 2) La actividad de la Falla Wagner inicia con el rompimiento del basamento 3) El bloque de piso es estático. Este resultado no tiene en cuenta las implicaciones por compactación de sedimentos, posibles rotaciones, o desplazamientos normales y laterales de tipo constructivo o no-constructivo de las fallas sintéticas y antitéticas.

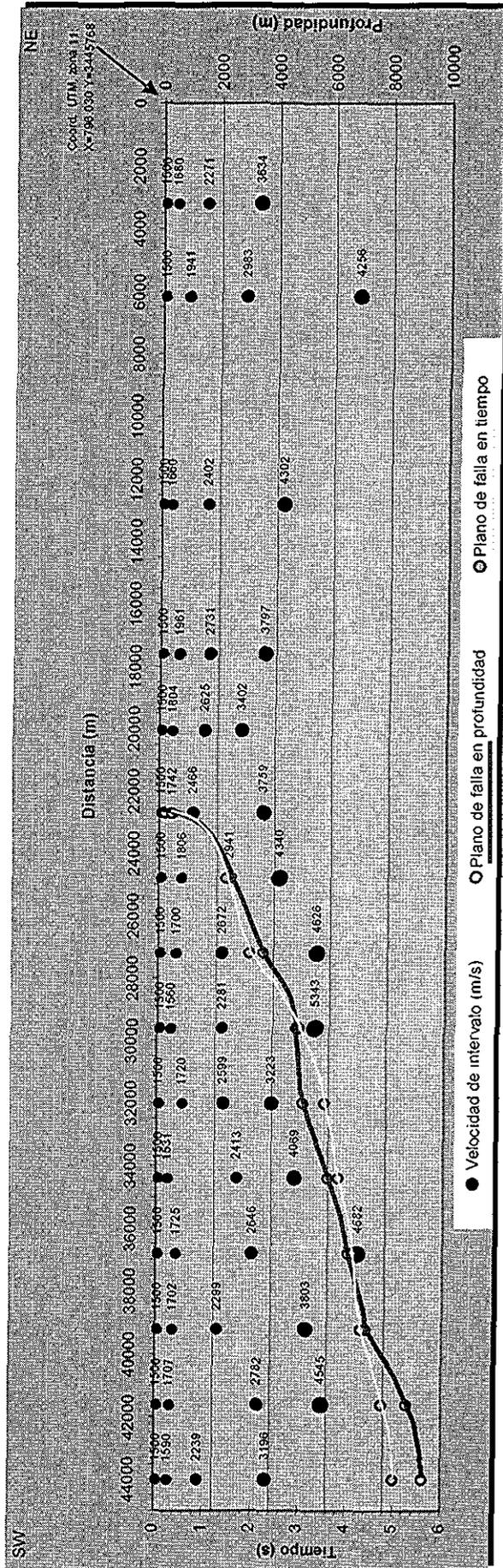
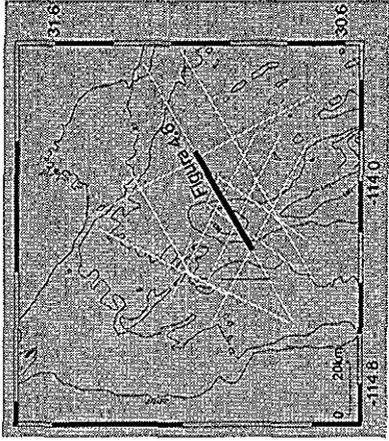


Figura 4.6. Velocidades intervalo a ambos costados de la Falla Wagner. El plano de la Falla Wagner se graficó en tiempo y en profundidad. El contraste en velocidades a una misma profundidad define, de manera aproximada, la zona que encierra el plano de la falla. Entre 2 y 4.5 s se observa el contraste de velocidad más pronunciado entre ambos lados de la falla a una misma profundidad.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

DOMINIO B de PEMEX-80. Se incluye en este dominio de fallamiento a un grupo local de fallas ubicado en el NW de la Cuenca Wagner, justo en el extremo Oeste de la depresión principal de la cuenca, en el cruce de las secciones 5500 y 5027 (Figura 4.3 y Figura 4.4). Las direcciones principales fluctúan entre N05E, Norte-Sur y N25W con buzamientos entre 50 y 60° al Este, y desplazamientos máximos de 0.25 s de TD (predominando 0.05-0.1 s TD). Su longitud no se pudo definir por la ausencia de líneas que correlacionaran las trazas de las fallas hacia el Norte. Sin embargo, aplicando la ecuación que relaciona la longitud y el desplazamiento, las fallas tendrían entre 7 a 10 km de longitud, con máximos en el orden de los 15 km. El Dominio B define el límite Oeste de la Cuenca Wagner, en el costado opuesto de la zona donde aflora la Falla Wagner. La orientación promedio de las trazas de falla difiere en ~30° con respecto a la dirección de la traza de la Falla Wagner.

DOMINIO C-Pemex de PEMEX-80. Se incluye en este dominio las fallas localizadas en la región NE y Norte de la Cuenca Wagner (Figura 4.2 y 4.3) y localmente en el SE (sección 5043 y cruce con líneas 8 y 21_2 Figura 4.2); adicionalmente, en este dominio estructural se incluyó informalmente el resto de fallas en el área, que no se correlacionaron (Figura 4.3). Los desplazamientos verticales de las fallas fluctúan entre 0.05 y 1.0 s de TD, con valores típicos para toda la zona entre 0.1 – 0.15 s TD (~85–130 m). Estos desplazamientos verticales son valores relativamente bajos en comparación a la longitud de la falla observada a profundidad (~2500 – 3000m). Por este motivo, es probable que el resto del desplazamiento total esperado para estas fallas ocurra por movimiento lateral o normal oblicuo. Para confirmar esta hipótesis a partir de los datos disponibles de sísmica 2D, se propuso usar el patrón de fallamiento de las *estructuras en flor negativas* [Harding, 1990; Busby e Ingersoll, 1995], para identificar las estructuras con movimiento lateral en las secciones sísmicas de PEMEX-80 y ULLOA-99. Se usó el tipo negativo por ser la zona de Wagner un ambiente típico de estilo transtensional. Se identificaron *estructuras en flor negativas* en la mayoría de las secciones de PEMEX-80, principalmente en las secciones al Este de Wagner.

Uno de los mayores desplazamientos verticales se observó al NE y ENE de la Cuenca Wagner, donde el basamento es afectado por dos fallas de rumbo NW cronológicamente distintas (probable oblicuas), que buzán hacia el WSW (Figura 4.7). Ambas fallas están separadas por una cuenca inactiva de poca profundidad (~800 m) de ~15 km de longitud (Figura 4.7). Las dos fallas y la cuenca están cubiertas por un grueso paquete de sedimentos. La falla más al ENE está sobreyacida por ~480 m de sedimentos y la falla más al WSW está sobreyacida por ~320 m de sedimentos. La correlación de estas fallas se observa entre las secciones 5043 en el SE hasta la sección 5500 en el

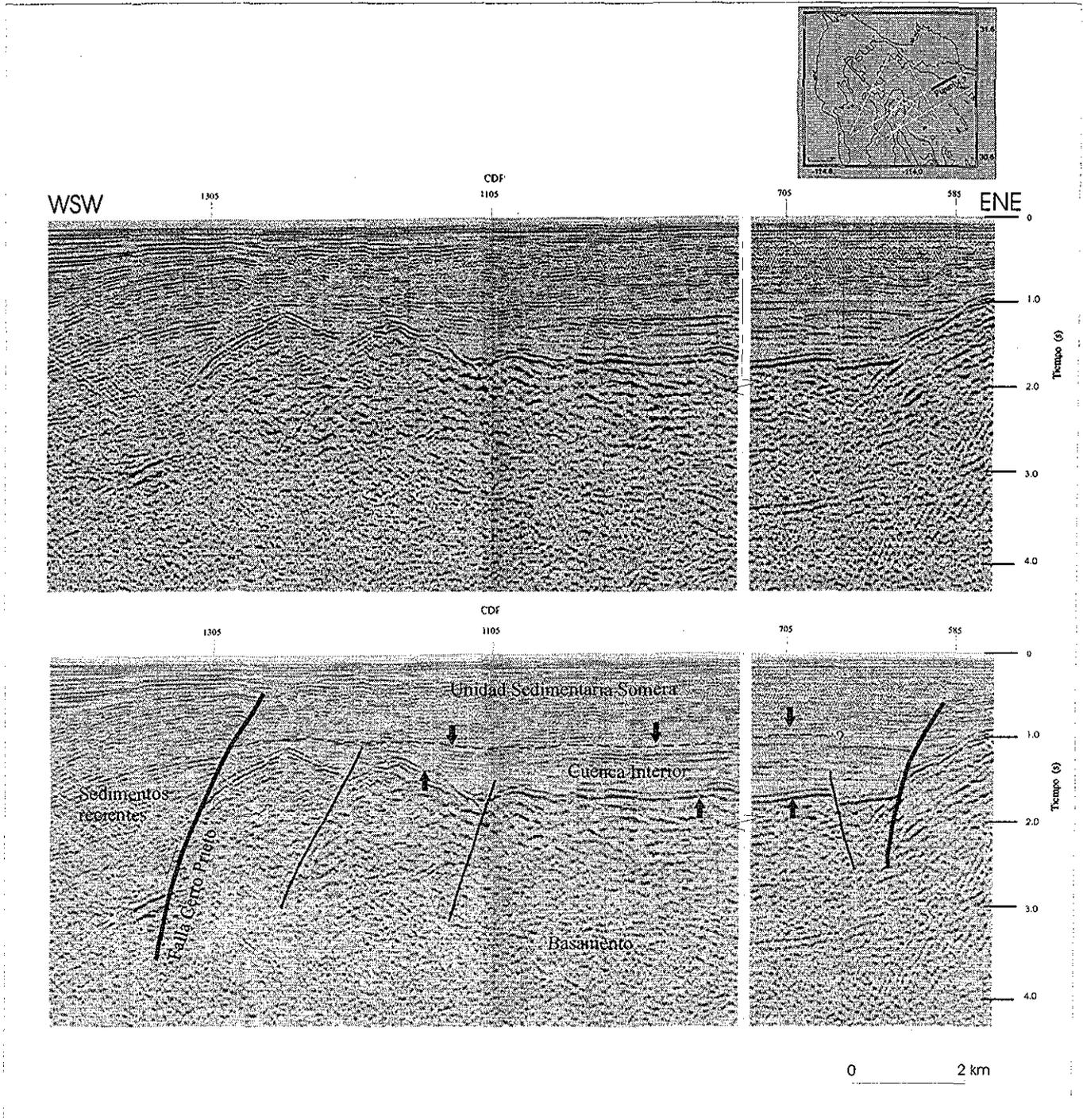


Figura 4.7. Plano de la Falla Cerro Prieto en la sección 5037 de PEMEX-80. Sector SE del Dominio C-Pemex. El plano de la Falla Cerro Prieto está localizado al WSW de la sección. Un segundo plano de falla se localiza al ENE (Figura 4.2). Las dos estructuras están separadas por una cuenca sedimentaria local (entre flechas rojas). La Falla Cerro Prieto muestra un desplazamiento de ~1280m. Ambos sistemas de falla y la cuenca interior están cubiertos por un fuerte paquete sedimentario reciente (Unidad Sedimentaria Somera), que para el caso de la Falla Cerro Prieto alcanza los ~320 m.

Norte, pasando por las secciones 5032, 5027 y 5037 (Figura 4.2 y 4.3). La falla en el sector ENE de esta área, muy cerca del estado de Sonora, tiene una dirección N54W con un buzamiento de 45° al WSW (correlacionados entre las secciones 5037 y 5043, Figura 4.3). El segundo sistema de falla hacia el WSW tiene una dirección de N50W con un buzamiento de 75° al WSW. El desplazamiento vertical que han desarrollado estos dos sistemas se reconocen por un fuerte salto vertical del basamento, con valores promedio de ~0.9 s TD (~900 m) y ~1.0 s TD (~1280 m) respectivamente. Esta característica fue un factor clave para identificar y correlacionar estas estructuras en este dominio. El resto del fallamiento de este dominio no pudo diferenciarse ya que los valores de desplazamiento vertical son muy similares en la mayoría del fallamiento, siendo los más frecuentes 0.1 – 0.15 s de TD (~85–130 m).

4.2.2. Secciones ULLOA-99

Las líneas de ULLOA-99 están localizadas en un área más estrecha de la cuenca y con menos penetración sísmica; sin embargo la alta resolución ayudó a reconocer la actividad más somera en las fallas de la cuenca. Las fallas mayores se encuentran localizadas hacia el sector NE y localmente al SSE.

El fallamiento interpretado con las secciones de ULLOA-99 fue correlacionable en gran parte del área. Sin embargo, para llegar a esta interpretación, fue necesario realizar una clasificación y filtrado de la abundante población de fallas observadas en las secciones. Existen tres características por resaltar con los datos de ULLOA-99: 1) Hay una alta densidad de fallas por kilómetro, 2) Una separación apreciable entre secciones (~10 km) y 3) Sólo ~1 km de registro en profundidad de las mismas. Bajo estas condiciones los resultados tendrían incertidumbre, si se realiza la correlación sin tener presente parámetros adicionales, que ayuden a definir si un conjunto de lineamientos de falla son parte de una misma estructura a profundidad, o están ligados a uno diferente.

La alta densidad de fallamiento en las líneas de ULLOA-99 dificulta interpretar cual es el fallamiento principal que controla el sistema. El marco estructural para la Cuenca Wagner se ha construido con base inicial en aquellas fallas activas que cortan el fondo oceánico y que presentan los mayores desplazamientos verticales en los reflectores. Adicionalmente, la presencia de fallas con *estructuras en flor* fue otro criterio de evaluación del movimiento lateral [Busby, 1995; Harding, 1990] y la batimetría apoyó el seguimiento de la traza de falla en la cuenca.

El marco estructural de la cuenca basado en los datos ULLOA-99 se clasificó en tres dominios de fallamiento, diferenciados por el grado de actividad y control sobre la cuenca Wagner (Figura 4.8). El dominio A se refiere al fallamiento de cuenca, con énfasis a la Falla Wagner y sus fallas asociadas organizadas con un arreglo en *en-echelón*. El Dominio B representa el fallamiento hacia el sector NW de la cuenca, donde existe un fallamiento que desplaza los sedimentos de la superficie del fondo marino, pero con menor efecto que las estructuras del Dominio A. El Dominio C-Ulloa se ubica al Este y SSE de la Cuenca Wagner con orientación principal NW-NNW y con frecuencia regido por fallas de movimiento lateral u oblicuo

DOMINIO A de ULLOA-99 El Dominio A representa la actividad tectónica del sector NE - Este y central de la cuenca, con un grupo de fallas resultantes de la correlación entre las líneas 6, 10 y 22 principalmente (Figura 4.2 y 4.8). La morfología ocasionada por el fallamiento y la cercanía de las líneas relativa al tamaño de estas fallas son dos características que brindan confiabilidad a la interpretación. La traza principal de falla viaja a lo largo de un valle profundo orientado NNE-SSW, en el costado NE de la Cuenca Wagner (CDP 6750 en la línea 10 y CDP 1200 en la línea 22 en el Anexo 3). La traza de falla (que marca el valle profundo) extrapolado a profundidad separa bruscamente dos ambientes distintos que se diferencian por el carácter sísmico de la señal. Al Oeste de la traza de falla, los reflectores de las líneas 6 y 10 son muy difusos y están completamente enmascarados por el ruido coherente (múltiples). Esto ocasiona que el fallamiento y los horizontes no puedan ser observados y digitalizados. En contraste, en el sector Este de la traza de falla se pueden ver los reflectores y el fallamiento asociado, con zonas difusas locales en la resolución de la señal. Aunque hay presencia de múltiples, estos no impiden la visualización de los horizontes sismoestratigráficos. La zona que delimita esta diferencia en el carácter sísmico define el plano aproximado de la Falla Wagner a profundidad con la secciones de ULLOA-99. La expresión en superficie de la Falla Wagner con los datos de PEMEX-80 coincide geográficamente con el contraste del carácter sísmico y valle profundo observado en los datos de ULLOA-99 (Anexo 3 y Figura 4.5). El valle profundo y el contraste en carácter sísmico se pueden cartografiar claramente en las líneas 6, 10 y 22, exceptuando la ausencia del valle profundo en la línea 6 (Anexo 3). Pero en la línea 8, el contraste de carácter sísmico no se observa claramente (CDP 5000. Anexo 3); sin embargo, los horizontes de la parte superficial del CDP 5000 son cortados bruscamente. Más a profundidad el contraste en el carácter sísmico sugiere un leve desplazamiento vertical de 0.05 s de TD. Este valor de desplazamiento es mucho más bajo que el observado en las secciones hacia al NE, líneas 6, 10 y 22.

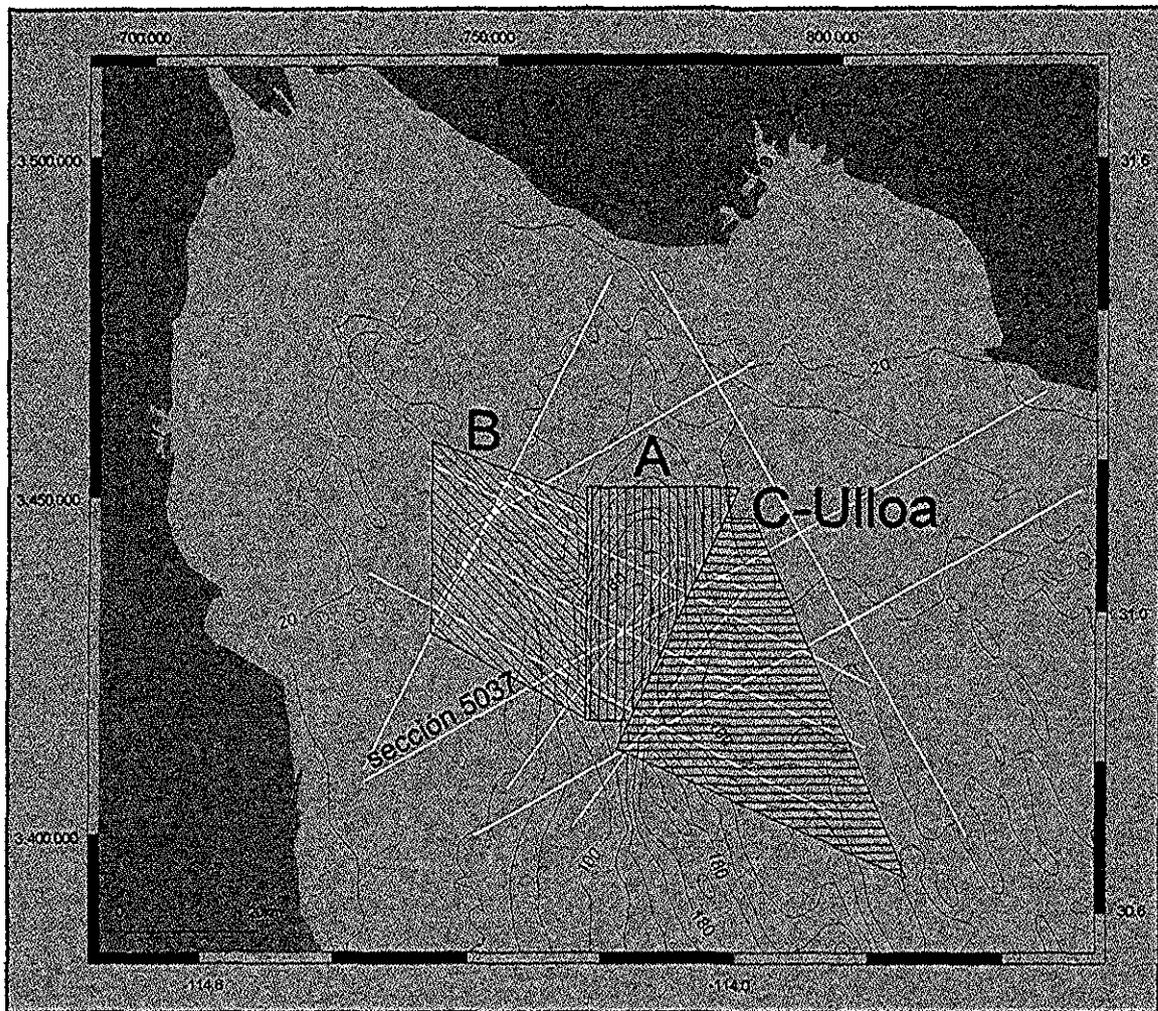


Figura 4.8. Dominios estructurales diferenciados con las secciones ULLOA-99. El Dominio A (rayado vertical) representa el grupo de fallas asociadas a la Falla Wagner. El Dominio B (rayado oblicuo), representa el fallamiento al NW de la Cuenca Wagner. El Dominio C-Ulloa (rayado horizontal) representa el fallamiento de dirección NW-SE con probable movimiento lateral.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Otro grupo de fallas que se incluyen en este dominio se localizan en el centro de la cuenca en la línea 6 y 10. El fallamiento tiene *estructura en flor negativa* principalmente, y se espera que desplace oblicuamente la superficie del fondo marino (CDP 5200-5600 y 6200-6450 de la línea 10, Anexo 3). Las longitudes mínimas de traza de falla son ~5-7 km (estimadas con la ecuación de escalamiento entre el desplazamiento y la longitud).

DOMINIO B de ULLOA-99. El Dominio B incluye el grupo de fallas localizadas en el sector NW de la Cuenca Wagner (Figura 4.8). Es un área que batimétricamente muestra rasgos abruptos y no uniformes. Presenta fuertes escarpes y un valle profundo en dirección NNW en el extremo WSW de la cuenca. Esta morfología está controlada por un fallamiento de orientación N25W a N05E, con un buzamiento al Este entre 50° y 60°. La longitud estimada de las trazas de falla está entre 4 - 12 km, obtenidas por correlación entre las líneas sísmicas y por el desplazamiento estimado (ecuación de escalamiento). En este dominio se reafirmó la importancia de conjugar los datos de PEMEX-80 y ULLOA-99, para reconocer el fallamiento en profundidad y superficie. A causa del fuerte ruido coherente en la parte NW de las líneas 2, 3, 10 y 6 de ULLOA-99 (Anexo 3), que representa el Dominio B, las secciones sirvieron sólo para reconocer las fallas que desplazan la superficie del fondo oceánico. Las secciones de PEMEX-80 apoyaron en profundidad la cartografía de las fallas digitalizadas con las secciones de ULLOA-99 en el Dominio B.

La interacción de dos subgrupos de fallamiento en el Dominio B da lugar a una rampa de relevo que se presenta como un valle profundo en dirección NNW, en el sector WSW de la Cuenca Wagner. El primer subgrupo de fallas localizado al NW de la cuenca tiene una dirección entre N06W y N05E con las mayores longitudes, cercanas a 12 km. El segundo subgrupo al Sur del primer subgrupo se orienta N25W – N15W con longitudes menores (~6 - 9 km). Ambos subgrupos definen un valle profundo de ~10 km de largo que llega a la cuenca en dirección NNW - SSE, sirviendo como una puerta de material sedimentario hacia la Cuenca Wagner (Figura 4.2).

Otro conjunto de fallas locales se encuentran en el cruce de la línea 23 con la línea 8. La dirección es N25W con buzamiento al Este y hace parte del flanco SSW de la Cuenca Wagner. Su dirección coincide con los sistemas asociados al segundo subgrupo de fallas que conforman la rampa de relevo, y muy cerca al sistema de fallas proveniente de la Cuenca Consag.

DOMINIO C-Ulloa de ULLOA-99. Los sistemas de falla del Dominio C-Ulloa están localizados al Este y SSE de la Falla Wagner (Figura 4.8). Al Este de la cuenca, la mayoría del fallamiento

desplaza la superficie del fondo marino, siendo mucho mayor en los sistemas de la línea 6, en los cuales predomina la *estructura en flor*. Las fallas de este dominio tienen un rango de direcciones entre \sim N22W y N6E, con una tendencia de buzamientos al Oeste con valores altos, entre 65° y 70° (Figura 4.2). Las longitudes estimadas varían entre 4 y 20 km. Estas condiciones predicen un cambio importante en el comportamiento relativo del fallamiento hacia el Este de la Falla Wagner, ya que contrasta en gran medida con la geometría, la dirección y el tamaño de las otras estructuras presentes en la cuenca. Este grupo de fallas del Dominio C-Ulloa muestran una similitud importante con el régimen que controla el sistema estructural de la Cuenca Consag al Sur, en la tendencia de su dirección, tipos de fallas y longitud del fallamiento (Figura 4.8).

El grupo de fallas al SSE de la Cuenca Wagner tiene una dirección similar al fallamiento al Este de la Falla Wagner y coincide con la orientación de la Cuenca Consag al Sur. Aunque es posible que este sistema esté controlado por la dinámica de la Cuenca Consag, es importante mencionarlo porque estas estructuras son la ruta de transferencia de la deformación de la Cuenca Consag hacia la Cuenca Wagner. No se observó una alta densidad de fallamiento principal que pudiera correlacionarse entre las líneas al SSE de la cuenca Wagner; sin embargo las pocas fallas interpretadas (algunas con *estructura en flor*) muestran efectos importantes en la deformación de los reflectores. El carácter sísmico que muestran estos reflectores sugiere la ocurrencia de fuertes efectos de cizalla simple, ocasionando acuñamientos y distorsiones internas de los horizontes (CDP 3800-4800 de la sección 8 y CDP 13200-14200 de la sección 21_2). La dirección principal de las fallas es \sim N20W, con longitudes mínimas de traza de falla entre 8 – 12 km y afectando el flanco Este de la Cuenca Wagner (Figura 4.2). Los buzamientos son variables, entre 45° – 70° , con tendencia hacia el SW.

4.3 Horizontes sismoestratigráficos

El análisis de los horizontes sismoestratigráficos consideró el área central de la Cuenca Wagner, el Este y SW de las secciones; mientras que al Oeste de las secciones, el reconocimiento de los horizontes se dificultó por la presencia del ruido coherente (múltiples). Los datos fuente para la digitalización de los horizontes fueron el primer segundo de TD de las secciones de ULLOA-99, por presentar una mejor resolución de las reflexiones y la posibilidad de diferenciar más claramente las variaciones y contrastes en el carácter sísmico de la señal sísmica. Los datos de PEMEX-80 no se digitalizaron por estar las secciones en papel. Sin embargo, se harán algunos comentarios generales de una diferenciación de horizontes que se observó en las secciones de PEMEX-80. Los horizontes

sismoestratigráficos se describen teniendo en cuenta su continuidad lateral, los patrones estratigráficos, el tipo de contacto, el espesor y su relación con el fallamiento asociado. Los términos usados para describir la sismoestratigrafía son sugeridos por Mitchum et al. [1977], Badley [1985] y Walker y James [1992].

El primer segundo de TD en las secciones de ULLOA-99 comprende tres unidades sismoestratigráficas, principalmente separadas por contactos concordantes o paraconformidades, y localmente contactos fallados o discordancias angulares. El contacto con mejor resolución es de tipo paraconformidad y divide la unidad más reciente (Unidad A) y la intermedia (Unidad B) entre 0.55 s de TD (Línea 6 en el Anexo 3) y 0.65 s de TD (Línea 23 en el Anexo 4), en el centro de la cuenca. El contacto es muy difuso entre la Unidad B y la unidad más profunda (Unidad C), el cual es aparentemente una paraconformidad. Los contactos fallados se localizan principalmente en los extremos Este y Oeste de la Cuenca, mientras que las discordancias angulares se ubican predominantemente hacia el sector Oeste de la cuenca.

La mejor resolución de las reflexiones se observa en la Unidad A y decrece en las unidades más profundas B y C. La señal sísmica es muy nítida por encima del múltiple, pero la resolución decrece por debajo del múltiple. La Unidad A es somera y se localiza por encima de los múltiples su mayor parte. Las unidades B y C se encuentran principalmente por debajo del ruido coherente afectando la calidad y resolución del carácter sísmico de estas reflexiones. Estas características son comunes en el centro de la cuenca y zonas externas hacia el Oeste. Al Este de la cuenca, la identificación de las Unidades B y C es clara, aún por debajo del primer múltiple. Las Unidades B y C contienen reflexiones con un carácter sísmico semejante, pero difieren con la Unidad A.

4.3 1. UNIDAD A

La Unidad A es la más somera de la Cuenca Wagner, y por consiguiente la más reciente y con menos efectos de deformación en los reflectores. Los límites de la Unidad A están definidos por los bordes de la cuenca misma. La calidad y la resolución de las reflexiones de esta unidad muestran espesores de reflector desde ~5.5 ms en las áreas de estratos más delgados (~4 m), hasta ~11 ms en los estratos de mayor espesor (~8.8m).

Se distinguieron siete facies sísmicas (sub-unidades) internas en la Unidad A de acuerdo a las relaciones estratigráficas (Figura 4.9). Los horizontes que definen estas facies se identifican

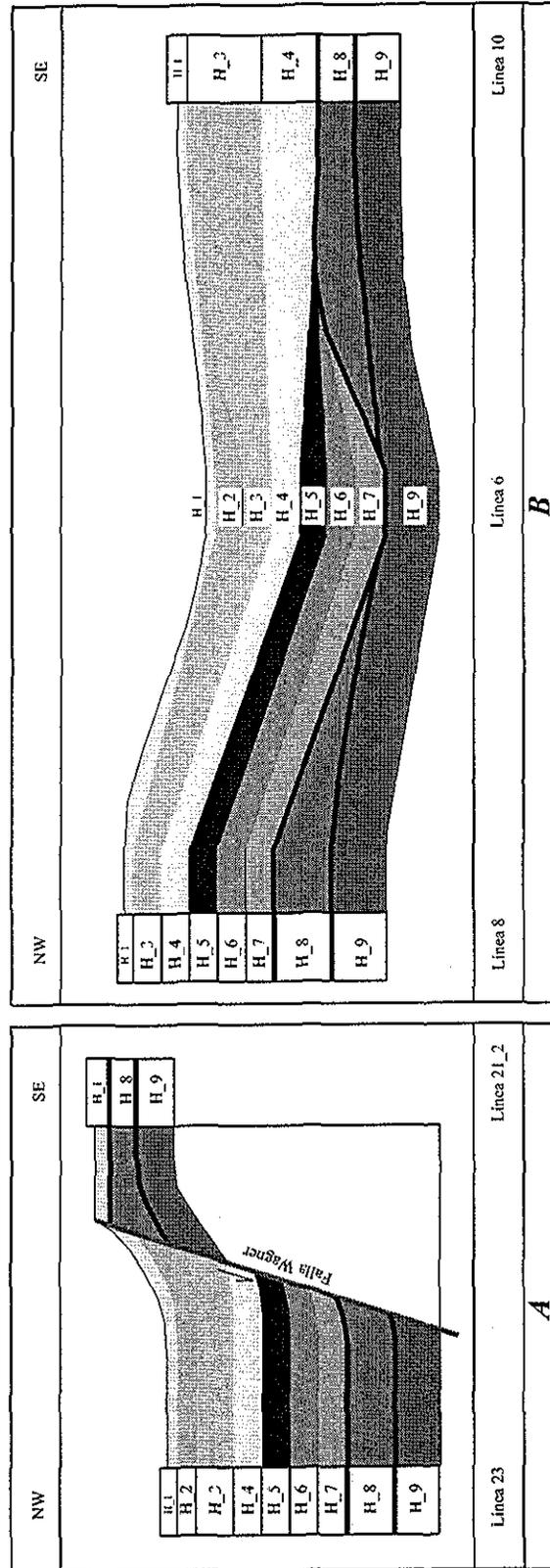
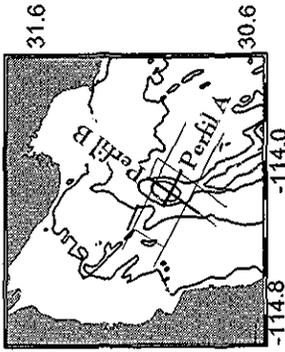


Figura 4.9. Correlación de las discordancias vistas en las secciones sísmicas ULLOA-99, para el 1 s de tiempo doble. Ambas direcciones de los perfiles cruzan la Cuenca Wagner sin escala. La Falla Wagner es la estructura que más afecta la estructura que más afecta los horizontes sísmostratigráficos. Se diferenciaron tres unidades estratigráficas principales. La Unidad A es la más somera y se registra con más frecuencia en el centro de la cuenca, con 7 eventos (H_1 a H_7), los cuates se han depositado desde hace ~80 ka. Las Unidades B y C son las más profundas y se presentan con límites difusos por efecto de ruido coherente en la señal sísmica (Anexo 3 y 4). Las letras A y B muestran la localización en el mapa adjunto.

informalmente con los nombres *H1* hasta *H7*. Estas facies se reconocen con claridad en la línea 23 (Anexo 4). La visualización de las características particulares de esta unidad es clara en esta dirección SW-NE, debido que el rumbo del fallamiento es semiparalelo a la sección. Esto hace que la línea 23 muestre un corte longitudinal con buena resolución y continuidad lateral de los horizontes en la cuenca (Anexo 4). Un corte transversal se observa con las secciones 6 y 10 (Anexo 3), en las cuales se resalta una geometría comprimida de los horizontes, donde el efecto del fallamiento es mayor. Pero aún así, es posible seguir las reflexiones al cruzar las fallas debido al bajo desplazamiento que afecta los horizontes en el interior de la cuenca y hacia el SW, con valores promedio menores a 0.1 s de TD.

Los principales contactos interiores de la Unidad A fueron de tipo concordante o paraconformidad, y secundariamente contactos fallados y contactos con discordancia angular. Los contactos fallados y discordantes angulares se identifican principalmente en los extremos Este y Oeste de la cuenca, coincidiendo en general con los bordes batimétricos. Estos contactos observados en los extremos como discordantes angulares o fallados, al interpolarse hacia el interior de la cuenca, se presentan como contactos concordantes entre las facies sísmicas o paraconformidad.

Las paraconformidades se localizan principalmente en el centro de la cuenca donde se presentan con una geometría sinforme, típica de los depocentros. No se observan reflectores horizontales en el llenado de la cuenca, que definan un patrón estratigráfico tipo *onlap*, en lugar de esto, el llenado que se observa es de tipo *divergente* y *progradante* (Entre CDP 4100-4800 y CDP 5600-6600 de las secciones 6 y 10, respectivamente, en el Anexo 3). Esta configuración de reflexiones en una geometría sinforme tiende a perderse hacia los costados de la cuenca, donde se observa con más frecuencia los acuñamientos y los contactos fallados. Los acuñamientos de sedimentos se utilizan aquí como un término geométrico para representar aquellas zonas finales de depositación, en las cuales existe un patrón estratigráfico tipo *onlap* y/o de *truncamiento*. Un ejemplo de las reflexiones con patrón tipo *onlap* se observa en la sección 23 entre el CDP 2400 y 2900 y en la sección 6 alrededor del CDP 3600 (Anexo 3).

Los patrones estratigráficos tipo *onlap* y *truncamientos* se extienden hacia el Oeste y SW de la cuenca, donde se observan las reflexiones con una geometría más flexurada y con menos estructuras, que afecten la actitud original de los sedimentos. En contraste, hacia la parte opuesta de la cuenca (Este y NE), las reflexiones son inclinadas y las zonas tienen mayores consecuencias por la actividad tectónica cerca de la Falla Wagner, afectando la disposición original de las capas delgadas de los

sedimentos y evitando el desarrollo de patrones estratigráficos tipo *onlap*. El *truncamiento* es otro patrón común en la Cuenca Wagner, que ocurre con los reflectores expuestos en el fondo marino en el costado Oeste de la cuenca y en la parte exterior de la cuenca hacia el Este. Un ejemplo son los horizontes H-2 y H-8 (Figura 4.9), que se observan en la sección 6 entre el CDP 3000 y 3300 y el CDP 6200 (Anexo 3). Otro ejemplo es el horizonte H-3 en la sección 10 entre el CDP 4800 y 6900 (Anexo 3), y localmente con el horizonte H-8 en el sector SW de la sección 21-2, entre el CDP 12100 y 13200 (Anexo 4).

Los contactos fallados más importantes predominan al Este y NE de la cuenca, y localmente hacia el borde SW (línea 22 y 10 en el Anexo 3). El contacto fallado más importante ocurre al Este y NE con la Falla Wagner. En el costado Oeste de la falla (bloque de techo) se observa la columna completa de horizontes de la unidad A (H1-H7) y los horizontes subyacentes de las unidades B y C (H8 y H9 respectivamente). Pero al costado Este de la falla (bloque de piso), la columna no está completa, sólo se presenta el horizonte H-1 en la parte superficial, y subyaciendo están los horizontes H8 y H9 en contacto discordante (líneas 6 y 10 en el Anexo 3). La continuidad lateral de las reflexiones en el centro de la cuenca de la Unidad A, desaparecen al cruzar el sistema de Falla Wagner. Algunas estructuras con un arreglo en dominó o escalonadas, asociadas al sistema de la Falla Wagner (justo al costado Oeste), afectan los horizontes H-2 a H-6 con desplazamientos cortos, con los valores típicos de $\sim 0.05 - 0.1$ s de TD. Estos desplazamientos se observan en la sección 6 con los horizontes H-2 a H-6 cercano a los CDP 5300 (Anexo 3), y en la sección 8 con los horizontes H-5 a H-8, cerca del CDP 4900 (Anexo 3).

En el extremo NW de la línea 6 existe un material superficial expuesto en el fondo oceánico con un fuerte contraste en impedancia acústica. Es un horizonte de poca extensión que no se correlacionó con otros estratos de la cuenca. Las relaciones sismoestratigráficas son un poco confusas, sin embargo parece que estas reflexiones están interdigitadas con los extremos de las reflexiones de los horizontes H-3 y H-4. La naturaleza de este material será relacionado con la presencia de una rampa de relevo en el sector NW de la cuenca.

El espesor total de las reflexiones (estratos) en la Unidad A y los estudios de tasas de sedimentación sirvieron de base para estimar una edad de la columna total de sedimentos, y una edad promedio de cada evento. Para este cálculo se asume una promedio de sedimentación continua y constante entre 3.3 m/ka [Pérez-Cruz, 1982] y 3.16 m/ka [Van Andel, 1964] para el Norte del Golfo. El espesor de

la Unidad A en la línea 6 es ~ 0.31 s de TD (~ 263.5 m), lo cual predice una edad ~ 80 ka en la parte central de la cuenca, donde se registra el mayor espesor de la columna en la Unidad A

En sumario, las reflexiones de la unidad A presentan buena resolución y continuidad lateral, mostrando espesores a partir de ~ 5.5 ms (~ 4.4 m) hasta ~ 11 ms (~ 8.8 m). Los horizontes tienen menor continuidad lateral cerca de la falla, pero es mayor en zonas alejadas de la falla (Oeste y SW), donde es común observar las terminaciones de las reflexiones de tipo *onlap* o *truncamiento*, y localmente *interdigitado*.

4.3.2. UNIDAD B

La Unidad B está definida entre los horizontes H-7 y H-8 y corresponde a un paquete único de facies sísmica de poco espesor, pero de gran distribución en el centro y en las partes externas de la cuenca (Línea 6 en el Anexo 3, y 23 en el Anexo 4). En contraste con la Unidad A que comprende varias facies sísmicas, la Unidad B es un paquete único con un carácter sísmico menos nítido que la Unidad A. En muchos lugares es afectado por el ruido coherente de los múltiples, pero en general son reflexiones discontinuas o “intermitentes”, como lo muestra el horizonte H-9 en las secciones 8 y 21_2 (Anexo 3 y Anexo 4). Los límites de esta unidad son difusos en la parte central y Oeste de la cuenca, al parecer por el efecto de los múltiples. Pero hacia el Este de la cuenca y de la Falla Wagner, la resolución y los límites con la unidad suprayacente y subyacente mejoran considerablemente. Los contactos no son claros, pero en general parece ser discordantes angulares, principalmente hacia el Este de la Falla Wagner. En el centro de la cuenca y hacia el Este, los contactos parecen ser de tipo paraconformidad. La mejor vista de la Unidad B es a lo largo de la sección 21_2 (Anexo 4), pero su extensión es menor en las secciones NW-SE. El máximo espesor que se observa en esta unidad es un poco menos de ~ 0.2 ms, con un promedio de ~ 0.05 s de TD y acunándose con frecuencia hacia el sector Este de la cuenca, a ~ 10 km de la cuenca en la línea 6 (Anexo 3).

La base de la Unidad B (horizonte H-8) es clara en el sector Este de la Falla Wagner, pero es difuso al Oeste de la Falla, en el interior de la cuenca. Por este hecho, la estimación del desplazamiento de la falla tomando como base este horizonte no se conoce con exactitud. La identificación del horizonte H-8 en el bloque de techo fue difícil, por la presencia del ruido coherente que afecta la calidad de los datos. Sin embargo haciendo una extrapolación de la línea del horizonte hasta el plano

de falla en el bloque de techo de la línea 23, y comparándolo con el mismo en el bloque de piso de la línea 10, se estima un salto o desplazamiento de ~ 0.3 s de TD para el horizonte H-8.

4.3.3. UNIDAD C

La Unidad C es la más profunda y se localiza por debajo del horizonte H-8, lo que caracteriza también un sólo paquete sismoestratigráfico (Línea 6 en el Anexo 3, y 23 en el Anexo 4). En esta Unidad las reflexiones son mucho más continuas que en la Unidad B, mostrando espesores un poco más gruesos que las demás unidades. Los efectos de las fallas son más evidentes, lo cual ha afectado notablemente la continuidad de las reflexiones al estar interrumpidas por la alta densidad de fallas en las secciones. La configuración sísmica es subparalela, a veces ondiculada o con reflexiones interrumpidas, con la presencia de pliegues de arrastre, estructuras sinformas y antiformas.

4.3.4. Unidades profundas en PEMEX-80

En las líneas sísmicas de PEMEX-80 se identificaron tres unidades sismoestratigráficas principales en los 6 s de registro (Figura 4.5). La más profunda se presenta como una unidad muy compacta sin la presencia de reflexiones internas importantes, y se ha inferido como el basamento regional. Con respecto a esta unidad geológica, las secciones de PEMEX-80 muestran un basamento a ambos lados de la Cuenca Wagner. En la parte Oeste, las reflexiones del basamento se presentan con flexión de bajo buzamiento hacia el Este ($\sim 32^\circ$), hacia el interior de la cuenca (Figura 4.10). En la parte Este y NE de la cuenca, los reflectores del basamento no son claros cerca de la Falla Wagner; sin embargo, se presenta como un fuerte reflector ~ 40 km al ENE de la Cuenca Wagner (Figura 4.2 y Figura 4.7), y a una profundidad más somera que el reflector flexurado al Oeste de la Cuenca (entre 1 y 1.3 s de TD). A partir de este sitio las reflexiones del basamento aparecen en el resto de la sección hacia el ENE. En este intervalo de distancia, el basamento es afectado por dos grandes fallas con desplazamientos de varias centenas de metros, como es observado en el Dominio B-Pemex (Figura 4.7).

La unidad intermedia muestra un carácter sísmico difuso que contrasta con el basamento y mucho más con la unidad superficial (Figura 4.10). Al parecer es un material homogéneo, ya que no se observan reflexiones internas claras, que infieran contraste en impedancia acústica. En cambio, ese contraste existe en el contacto con la unidad más superficial, en el cual una paraconformidad divide las dos unidades sismoestratigráficas. Las pocas reflexiones han ocasionado que el fallamiento no se

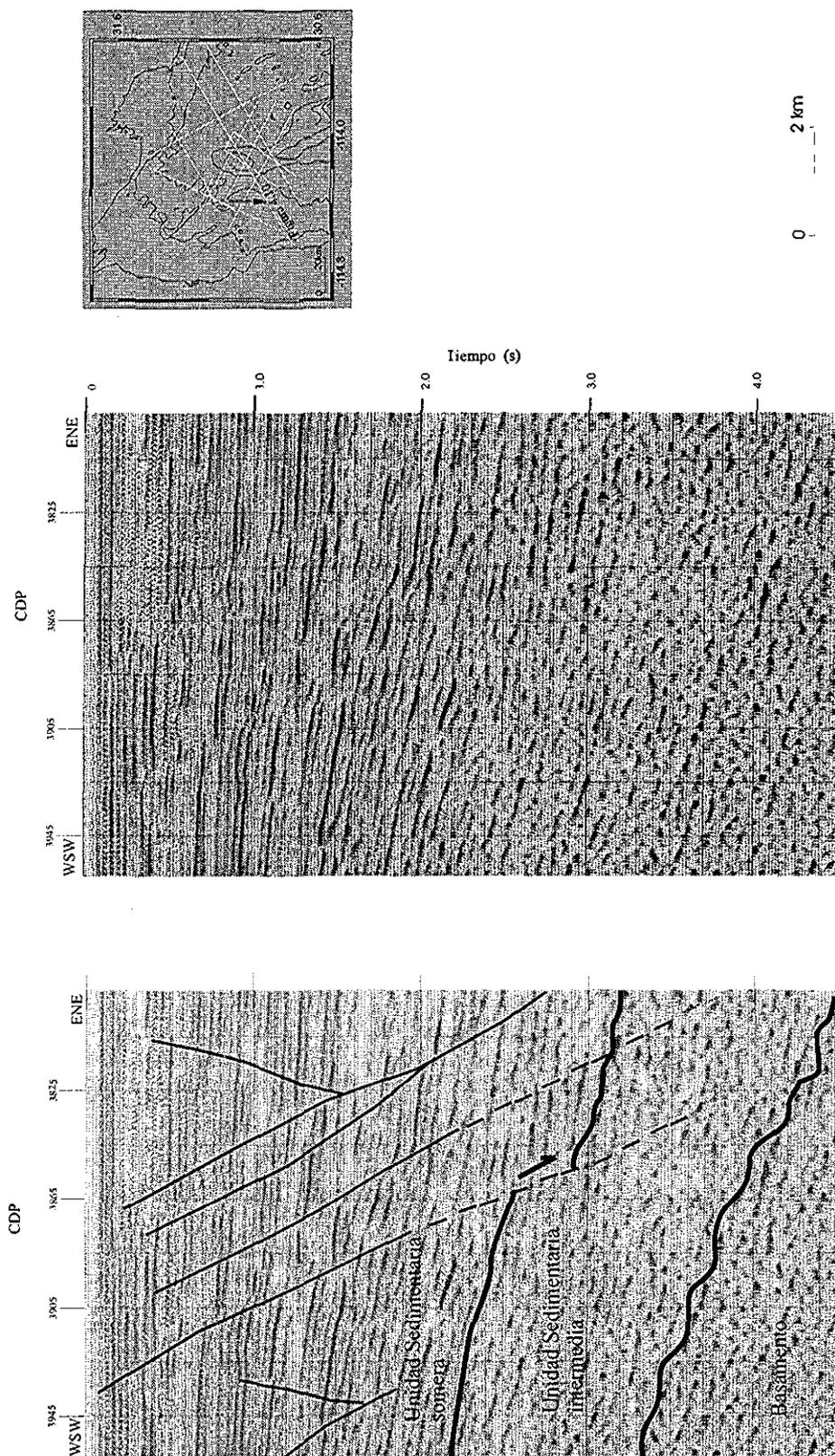


Figura 4.10. Unidades sismostratigráficas en el costado Oeste de la Cuenca Wagner y de la sección sísmica 5037. Los buzamientos son bajos (~35° al Este). El contraste en carácter sísmico es fuerte entre la unidad sedimentaria intermedia y la unidad sedimentaria somera, el cual puede ser ocasionado por diferencias en compactación del material. Las estructuras asociadas son de bajo desplazamiento (~ 0.05 - 0.1 s de TD) con buzamientos hacia el Este.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

pueda identificar con claridad. Por otro lado, la cobertura o extensión de esta unidad intermedia es baja, principalmente hacia el costado Oeste de la cuenca con un espesor promedio de $\sim 1 - 1.2$ s. Si se asume que esta unidad intermedia es de tipo sedimentario, tal vez muy compacta, y atendiendo los valores de sedimentación de Van Andel [1964] o Pérez-Cruz [1982], habría una columna con un espesor máximo de 4 km en la sección 5037 (Figura 1.2 y Figura 4.5) que equivale a una edad ~ 1.21 Ma, asumiendo sedimentación continua y constante.

La unidad más superficial, comprende un fuerte paquete de sedimentos con buena continuidad lateral. A diferencia de las unidades más profundas, aquí se puede observar claramente el efecto del fallamiento, debido a la presencia de una sedimentación muy fina en esta secuencia. En esta unidad estarían incluidas las tres unidades que se describieron de ULLOA-99. Atendiendo a Van Andel (1964) o Pérez-Cruz (1982), la unidad superficial tendría una columna de sedimentos de ~ 7 km en la sección 5037 (Figura 1.2, Figura 4.3 y Figura 4.4) que corresponde a una edad ~ 2.12 Ma, asumiendo sedimentación continua y constante.

Por último, los resultados muestran que a partir de la geometría que presenta esta secuencia, la distribución de reflexiones que convergen hacia el centro de la cuenca es asimétrica, con buzamientos bajos hacia el Oeste y tendencia a aumentar hacia el Este, cerca de la Falla Wagner, por lo que el llenado sedimentario se observa de tipo divergente.

5. Estructura y Estratigrafía

En este capítulo se discuten los aspectos estructurales y estratigráficos más relevantes de la Cuenca Wagner y sus alrededores. Inicialmente, se discute el fallamiento que controla la Cuenca Wagner y las estructuras asociadas a este sistema. Luego, se analiza varios escenarios estructurales asociados con el fallamiento localizado al Norte de la Cuenca Wagner (definida como una zona de acomodamiento) y el fallamiento del NW de la Cuenca Wagner (Dominio B). También se discute la estratigrafía reciente de la cuenca, entre 0 y 1s de TD. Por último, se complementa el modelo tectónico con un aporte sobre la naturaleza actual de los sistemas estructurales ubicados en la parte externa de la Cuenca Wagner, tanto al ENE, NE como al NW (Figura 5.1)

5.1. Estructura de la Cuenca Wagner

Se identificaron tres dominios estructurales que definen las características del fallamiento en la Cuenca Wagner y en el marco regional a la cuenca (Figura 4.8); entre ellos, el Dominio A (ULLOA-99 y PEMEX-80) describe las características estructurales más relevantes. El estudio tuvo como base las líneas sísmicas de ULLOA-99 para investigar la parte somera de la cuenca (0 - 1 s de TD) y las líneas sísmicas de PEMEX-80 para analizar la parte profunda (1 - 5.5 s de TD). Los Dominios A y B representan zonas estructurales diferentes. Ambos dominios fueron observados en la parte somera y profunda del subsuelo con base en las interpretaciones de los datos ULLOA-99 (Figura 4.8) y PEMEX-80 (Figura 4.4), respectivamente. En el Dominio A se encuentra la Falla Wagner y su fallamiento asociado (Figura 4.8 y Figura 5.1). Este conjunto de estructuras controlan la dinámica actual de la cuenca y son los responsables de la generación de una morfología que caracteriza un valle de ~30 km de largo en dirección NNE, por ~20 km de ancho (Figura 1.2). Los extremos de la traza de la Falla Wagner son los límites NE y SW de la depresión de la cuenca (Figura 5.1). El Dominio C-Ulloa (Figura 4.8) no se relaciona directamente con la cuenca, al parecer su actividad se relaciona con las estructuras que controlan la Cuenca Consag (Figuras 5.1), ya que su tipo de fallamiento (movimiento lateral u oblicuo) y su dirección coinciden en gran medida con las características de las estructuras de la Cuenca Consag. El Dominio C-Pemex (Figura 4.4) representa el sistema de fallamiento asociado al sistema de la Falla Cerro Prieto (*SFCP*)

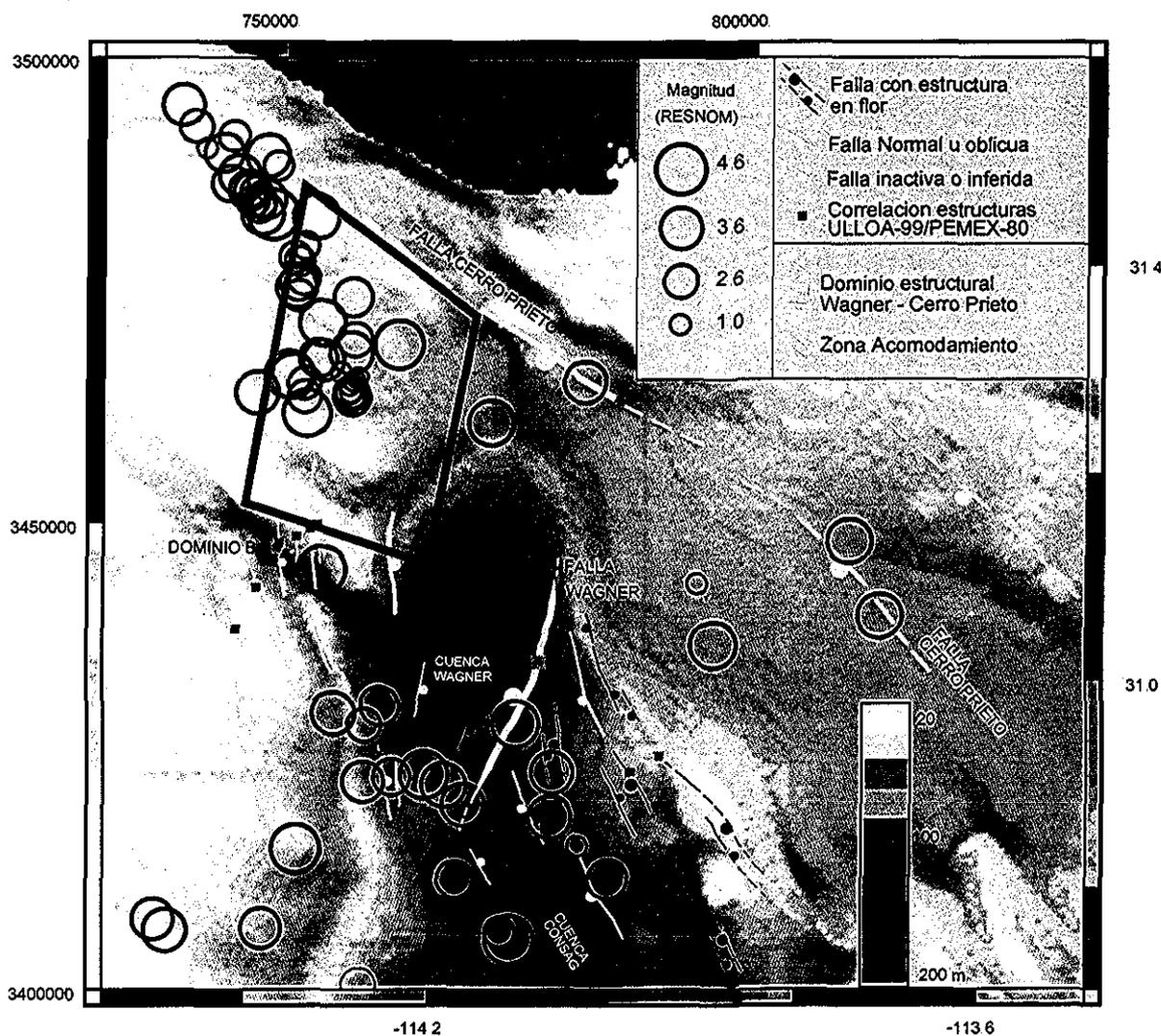


Figura 5.1. Mapa estructural de la Cuenca Wagner, zona de acomodación y Dominio estructural Wagner Cerro Prieto. El mapa muestra la cartografía de fallas de la Cuenca Wagner y los dos modelos propuestos que transfieren la deformación de la Falla Wagner hacia Falla Cerro Prieto (FCP). La conexión entre la Falla Wagner y el fallamiento del Dominio B, al parecer ocurre a través de una zona de acomodamiento representada por un grupo de fallas con arreglo en-echelón en un rango de direcciones hacia el NE-NNE. El fallamiento del Dominio B también es probable que haga parte del sector Sur de una zona de fallamiento que transfiere la deformación hacia el sistema FCP, la cual se llamó Dominio Estructural Wagner Cerro-Prieto (DWCP). La sismicidad reportada por RESNOM (Red Sísmica del Noroeste de México), entre 1987 y 2001, sugiere una franja de actividad para DWCP en dirección SSW-NNE. Las coordenadas UTM pertenecen a la zona 11.

5.1.1. Falla Wagner

La deformación actual de la Cuenca Wagner está controlada por la falla lítrica de nombre Falla Wagner, con una expresión en superficie de ~30 km de longitud, localizada en el costado Este de la cuenca (Figura 5.1). La traza de la Falla Wagner inicia en el SSE de la cuenca, en los límites con la Cuenca Consag, y termina en el NNE de la Cuenca Wagner. No hay evidencia de que esta estructura alcance a interactuar directamente con la Falla Cerro Prieto al NE (Figura 2.1 y Figura 5.1), debido a que la batimetría y la estratigrafía sísmica de las líneas disponibles de PEMEX-80 no apoyan esta idea. La Falla Wagner define un semigraben con su flanco pronunciado en el Este de la cuenca, donde está ubicado el plano de falla y una mayor actividad tectónica. La parte flexurada de las unidades está en el Oeste de la cuenca, definida por un buzamiento suave del basamento y de la unidad intermedia de sedimentos, en dirección hacia la cuenca (Figura 4.5 y Figura 4.10).

La falla tiene un rumbo ~N23E y un buzamiento variable con la profundidad hacia el NW. Esta dirección de fallamiento principal en la cuenca corrobora los resultados obtenidos por Henyey y Bischoff [1973]; Lonsdale, 1989 y Nagy y Stock [2000]. El plano de falla inicia con un buzamiento verdadero de ~79°, disminuyendo a ~58° a la profundidad de ~0.6 s de TD y luego a ~28°, permaneciendo con este último desde ~1.8 s de TD, hasta perderse por debajo de los 6 s de TD. Esta geometría del plano de falla se estimó con base en un método inverso, en el cual a partir de la forma de los pliegues se define la geometría del plano de falla [Withjack y Peterson, 1993]. Los fallamientos sintéticos y antitéticos asociados a la Falla Wagner son los responsables en los cambios del buzamiento y en la forma de los *pliegues rollover* (Figura 4.5).

El plano de la Falla Wagner también se infiere por el contraste de velocidades de intervalo que se calcularon a ambos lados del plano (Figura 4.6). Los datos base para este cálculo fueron las velocidades de apilamiento estimadas para el procesamiento de las secciones de PEMEX-80. Las velocidades de intervalo son diferentes al compararlas a la misma profundidad, esto se evidencia en velocidades mayores en el bloque de piso y disminuyen 700 a 1000 m/s en su contraparte en el bloque de techo. Esta característica es más clara entre 2.0 y 4.5 s, en la zona profunda de *pliegues rollover* (Figura 4.5 y Figura 4.6).

Fallamiento Antitético. El fallamiento antitético asociado a la Falla Wagner se identifica en el Dominio A, en la parte más profunda y más somera de la cuenca en la sección 5037 (Figura 4.5). Las fallas de este tipo se relacionan con superficies cóncavas hacia arriba del plano de falla, los

cuales hacen que los pliegues luzcan inclinados hacia abajo y cortados bruscamente por la falla (Figura 4.5). Esta característica se observa en las zonas profunda y somera del plano de falla. Los resultados del método inverso que se aplicó a la forma de los *pliegues rollover* infiere que la Cuenca Wagner presenta fallamiento antitético en una zona alejada de la traza de la falla (entre 10 y 25 km de distancia horizontal) y en áreas muy cercanas (entre 2 y 5 km). No se observan con claridad las variaciones mencionadas del buzamiento del plano de falla en la sección 5037; sin embargo éstos cambios se infieren por la aplicación del método inverso sobre este tipo de *pliegues rollover*.

Fallamiento Sintético. Este fallamiento se identifica en el Dominio A de la sección 5037 afectando la zona sedimentaria intermedia en el bloque de techo de la Falla Wagner (Figura 4.5). El fallamiento sintético se relaciona con superficies convexas hacia arriba del plano de falla ocasionando que los *pliegues rollover* parezcan pliegues de arrastre [Xiao y Suppe, 1992]. Este tipo de pliegues ocurre en la zona intermedia (0.9 y 3.8 s TD) del plano de la falla lítrica de la Falla Wagner (Figura 4.5). Esto implica que el plano de falla de la Falla Wagner tiene una superficie convexa por efectos de fallamiento sintético entre 0.9 y 3.8 s de TD, pero es un plano de superficie cóncava a profundidades someras y más profundas. La presencia de las fallas sintéticas no se observa con claridad en la sección 5037; se infieren por la ocurrencia de los *pliegues rollover*.

5.1.2. Deformación asociada a la Falla Wagner

La deformación en la Cuenca Wagner se trasmite a través de la Falla Wagner y por un tren de fallamiento activo que cruza la cuenca con dirección NNE y NE (Figura 5.1). La orientación de las estructuras NNE y NE se corroboran con las observaciones en la sección 5037 (Figura 4.5) y la sección 23 (Anexo 4). En estas secciones se resalta una baja densidad de fallas en la dirección SW-NE, ~1 falla/km para 1s de TD (Anexo 4 y Figura 4.1) y alta densidad de fallas en dirección NW-SE, ~6 fallas/km para 1s de TD (Anexo 3 y Figura 4.1). La Falla Wagner al parecer sólo incluye una componente de movimiento normal. No se observan evidencias claras de deformación en la traza que permitan inferir estructuras de comportamiento oblicuo o lateral (i.e. fallas de estructuras en flor). Sin embargo, hay varias fallas dispuestas con un arreglo en *en-echelón* en el interior de la cuenca, al parecer antitéticas y pertenecientes a la zona somera de *pliegues rollover*, que se estiman con componente lateral u oblicua derecha (Figura 5.1). Esto significa que la componente de movimiento lateral ocurre en el bloque de techo de la Falla Wagner, por efecto del fallamiento antitético y sintético asociado. Parte de este movimiento puede ser inferido por la migración de los depocentros observados en las líneas ULLOA-99 (líneas 6, 10 y 23. Anexo 3 y Anexo 4). La

trayectoria de esta migración y la tendencia de unión de fallamiento (de acuerdo al modelo expuesto por Dawers et al., [1993]) tiende principalmente hacia el NE, lo cual sugiere que el sistema estructural en la Cuenca Wagner tiene una componente de evolución importante en esta dirección. Este comportamiento es evidente en el centro de la cuenca, pero no es clara su relación con el fallamiento externo a la cuenca, como el observado en el Domino B. La naturaleza tectónica de la Cuenca Wagner basado en estas condiciones expuestas sugiere que la Cuenca Wagner representa posiblemente una *cuenca polihistórica* de acuerdo a la clasificación de Busby e Ingersoll [1995], debido a que refleja un sistema resultante de episodios de extensión pura que alterna o se conjuga paralelamente con movimientos laterales de las estructuras asociadas.

No se conoce con exactitud qué tanto ha sido el aporte de la Falla Wagner y el fallamiento asociado en la extensión del Golfo; sin embargo un cálculo simple con las reflexiones del basamento sugiere que la Falla Wagner acomoda horizontalmente como mínimo ~26 km (Figura 4.5). La extensión horizontal del Golfo en esta zona se estima en ~300 km desde hace ~5.5 Ma [Gastil et al., 1973], por lo cual el desplazamiento estimado de la Falla Wagner es de tan solo ~8.7% del total. Es probable que el desplazamiento adicional se estime balanceando la sección por compactación, rotaciones o desplazamientos laterales o normales de tipo constructivo o destructivo de las fallas sintéticas y antitéticas, bajo componentes muy probables de tipo lateral y/o oblicua. Estos desplazamientos adicionales son muy probables que ocurran en la cuenca, ya que las fallas lítricas se generan en un ambiente de corteza adelgazada, lo cual sugiere espesores sismogénicos bajos que conllevan a la acumulación de grandes desplazamientos [Lavier y Buck, 2000].

5.2. Fallamiento al Norte y NW de la Falla Wagner

Este fallamiento se refiere al grupo de fallas que transfiere la deformación de la Falla Wagner a los sistemas estructurales al Norte y NW de la Cuenca Wagner. La traza de la Falla Wagner culmina ~8 km al Norte de la línea 22 (Figura 1.2 y 4.2), por lo cual esta estructura no alcanzaría a interactuar con la Falla Cerro Prieto al NE. Estas condiciones sugieren que otros sistemas estructurales transfieren la deformación de la Falla Wagner hacia el Norte. Por este hecho, se proponen dos sistemas que responden a las características estructurales de la zona, tanto al NW como al Norte de la Falla Wagner (Figura 5.1): 1) El sistema de fallas al NW de Cuenca Wagner, representado por el Dominio B de fallamiento en los datos PEMEX-80 y ULLOA-99, y 2) una *zona de acomodamiento* (de acuerdo al concepto de Faulds y Varga [1998]) justo al Norte de la Cuenca Wagner.

Adicionalmente, se discute la presencia de una rampa de relevo por la interacción entre dos grupos de fallas al Sur del Dominio B.

El fallamiento al NW de la Cuenca Wagner se identifica como el Dominio B. Su relación directa con la Falla Wagner es incierta; es probable que el Dominio B sea parte de su fallamiento antitético, atendiendo su disposición estructural y sus buzamientos hacia el Este. Otra teoría contemplaría asumir este sistema de fallas como un fallamiento alterno por el cual se transmitiera la deformación hacia el Norte del Golfo. Esto obliga a que haya una estructura o zona de estructuras que conectaran la Falla Wagner y el fallamiento del Dominio B. Dicha estructura o zona de conexión debería pasar por la cuenca o muy cerca de ella. En este aspecto, no se reconoce ningún tipo de estructura transforme que cruce la cuenca en sentido NW y que haga la conexión. Esto se evidencia en la sección longitudinal SW-NE de la cuenca (Línea 23 en el Anexo 4). Por otro lado, es probable que este sistema estructural de conexión esté más hacia el Norte de la cuenca, en áreas donde finalice la traza de la Falla Wagner. No hay datos que soporten esta característica en el área; sin embargo, es plausible que la deformación se transfiera entre la Falla Wagner y la parte Norte del Dominio B a través de una *zona de acomodamiento* (Figura 5.1). Esta zona estaría representada por un grupo de fallas con un arreglo en *en-echelón* en un rango de direcciones hacia el NE-NNE, que sea consistente con la orientación de las estructuras en la cuenca. Esta podría ser la alternativa más probable para dar respuesta a la posible interacción tectónica entre la Falla Wagner y el fallamiento del Dominio B (Figura 5.1). Las fallas con estructuras en flor localizadas en el interior de la cuenca, justo al Oeste de la Falla Wagner, podrían formar parte de esta zona de acomodamiento.

Adicionalmente, para explicar la interacción de dos grupos de fallas al Sur del Dominio B, se propone la presencia de una rampa de relevo que ha servido de entrada de material sedimentario a la cuenca (Figura 5.1 y Figura 5.2). Hacia el Sur del Dominio B cambia un poco la dirección de las estructuras de N06W - N05E a N25W - N15W, entre estos grupos se infiere la existencia de una rampa de relevo. Este fallamiento define un valle profundo que puede ser la entrada principal de sedimentos hacia la cuenca. La parte NW de la sección 6 (Anexo 3 y Figura 4.2) se encuentra muy cerca de la entrada a la rampa, esta condición favoreció el ingreso del material que se encuentra a nivel del fondo oceánico en la línea sísmica 6 usando la ruta que provee la rampa hacia la cuenca. Esta característica no se observa en el NW de las secciones 10 y 8, localizadas relativamente cerca de la sección 6 (Figura 4.2).

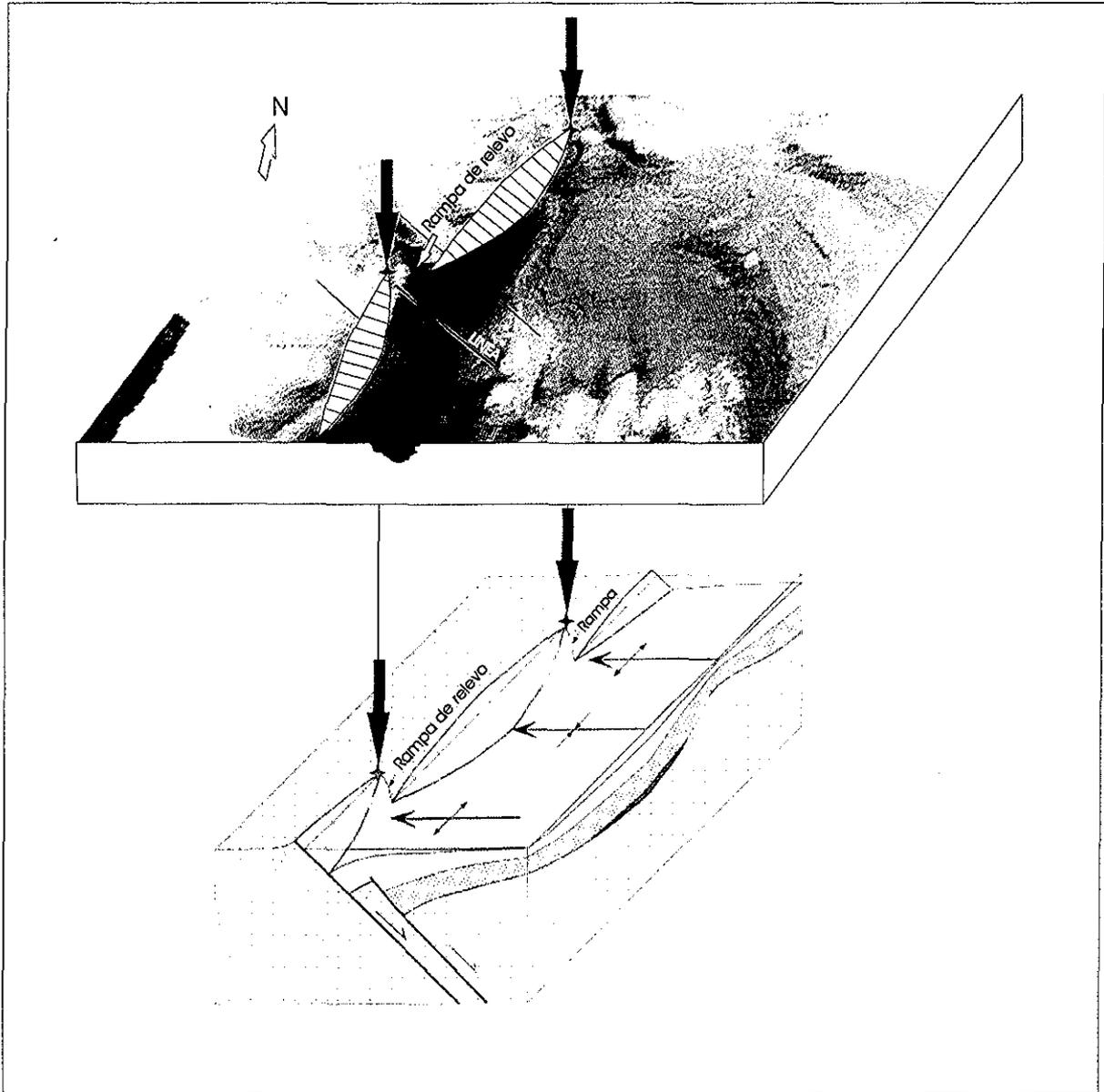


Figura 5.2. Rampa de relevo al Oeste de la Cuenca Wagner. La rampa se localiza en el costado Oeste de la cuenca. La configuración del fallamiento que define la rampa está definido por dos grupos de fallas del Dominio B de los datos de ULLOA-99. El grupo de fallas al Norte se orientan N06W - N05E. El grupo de fallas al Sur tiene dirección N25W - N15W. La parte NW de la sección 6 se localiza muy cerca de la boca de la rampa de relevo. Es muy probable que esta rampa haya sido la vía de ingreso del material somero con alto contraste en impedancia acústica en la parte NW de la sección 6a (Anexo 3). El modelo gráfico de la rampa está modificado de Schlische [1995].

5.3. Sismoestratigrafía Cuenca Wagner

La parte central de la cuenca hasta los 5.5 s está comprendida por dos paquetes principales de material sedimentario diferenciados por su contraste en carácter sísmico, posiblemente por las variaciones en su grado de consolidación. La historia geológica de la cuenca se estimó teniendo en cuenta las tasas de sedimentación regional en el Norte del Golfo (3.16 m/ka según Van Andel [1964] y 3.3 m/ka según Pérez-Cruz [1982]). Esta historia sugiere que la edad de los sedimentos en la parte central de la cuenca a 5.5 s de ID en la sección 5037 de PEMEX-80 (Figura 4.5) viene desde el Terciario Superior (mínimo desde hace ~3.3 Ma). Las 7 unidades más recientes de ULLOA-99 observadas hasta 0.6 s de ID (Figura 4.9) se separan discordantemente entre ellas por paraconformidades, definiendo una historia estratigráfica joven que caracteriza la Unidad A en el lapso de tiempo ~80 ka antes del presente. Esto ubica a la Unidad A con un origen en el Pleistoceno, en períodos reconocidos de clima glacial [Adams et al., 1999]. Si se divide esta edad entre el número de reflectores registrados en la Unidad A, se tendría un evento diferente cada ~1.6 ka. De acuerdo a Adams et al. [1999], entre 70 - 10 ka han sucedido ~37 eventos de calentamiento y de extremo enfriamiento, en cortos lapsos de tiempo, intermitentes con los eventos normales del período glacial de esta época. Tomando presente esto y usando un cálculo simple lineal sin ningún tipo de correcciones, los datos de Adams et al. [1999] sugieren un nuevo evento de cambio climático cada ~1.62 ka. Esta edad es claramente correlacionable con los resultados obtenidos en el presente estudio. Esto sugiere que los datos registrados por ULLOA-99 representan la historia estratigráfica más detallada del Norte del Golfo, y demuestra también la excelente preservación que ha existido de los sedimentos, por la fuerte y continua sedimentación que ha ocurrido en el Norte del Golfo. Adicionalmente, esto significa que la recopilación hecha por Adams et al. [1999] sobre el pasado climático, puede ser aplicado de alguna manera en la refinación de la historia estratigráfica del Norte del Golfo de California.

La geometría de la estratificación sugiere un relleno de la cuenca (en los primeros 5.5 s de ID) de forma divergente y localmente progradante (usando el modelo propuesto por Mitchum [1977]), entre los CDP's 3545-2800 de la sección 5037 (Figura 4.5). Este tipo de relleno infiere una tasa de sedimentación muy constante y continua, en el cual no se observan discordancias angulares ocasionadas por cambios bruscos en la sedimentación, posiblemente por levantamientos o períodos erosivos. Este mismo fenómeno se observa a mayor escala en la cuenca; específicamente en las 3 unidades observadas en las secciones de ULLOA-99, que representan 1s de los 5.5 s de ID de información de la cuenca (por ejemplo CDP's 2800 a 4400 de la línea 6. Anexo 3). El relleno visto

a esta escala mayor es también de tipo divergente y progradante, lo que significa que muchas de las condiciones sedimentológicas se han mantenido en la cuenca desde el Terciario Superior hasta el Pleistoceno, que es la edad que se infiere para estas unidades más recientes.

La morfología asimétrica de la cuenca define un semigraben de la Cuenca Wagner orientado con un eje mayor hacia el NNE – NE, con estratos más inclinados en el costado Este y suavemente inclinados en el costado Oeste. Es común observar patrones de estratificación tipo *onlap*, hacia el Oeste y truncamientos justo al Oeste y al Este de la Falla Wagner (Unidad estratigráfica A en la secciones 6 y 10 del Anexo 3). El tipo de estratificación *onlap* define las zonas con condiciones relativamente más estables en actividad y el truncamiento aquellas zonas con mayor actividad de fallamiento [Walker y James, 1992]. Esto se aplica con algunos reflectores sismoestratigráficos de la sección 5037 (Figura 4.5) y de las secciones 6 y 10 (Anexo 3) expuestos con buzamientos pronunciados en el costado Este y con flexión hacia el costado Oeste de la Cuenca Wagner. Estas características corroboran el principio de que las estructuras principales que controlan el sistema se encuentran hacia el costado Este de la Cuenca Wagner, y las estructuras menores se localizan en el costado Oeste del semigraben que define la Cuenca Wagner.

La sismoestratigrafía del Este de la cuenca es diferente a la observada en el Oeste, este contraste influye en una mayor densidad de múltiples en el sector Oeste que en el Este de las secciones sísmicas. La generación de múltiples en las secciones de ULLOA-99 de dirección NW-SE (líneas 6, 8 y 10), se relacionada con el tipo de sedimento superficial que existe en ambos costados de la Cuenca Wagner. Los materiales que llegan a la cuenca desde el Oeste son de grano más fino que aquellos provenientes del Este. Esto implica que hay mayor coherencia de las superficies del material hacia el Oeste que hacia el Este. Así mismo, hacia el sector Oeste existe un mayor número de eventos estratigráficos a nivel de la superficie en comparación con el sector Este. Esto seguramente ocurre porque es mayor el aporte sedimentario desde el Oeste, proveniente del Río Colorado. Carriquiry [2001] reporta material más fino hacia el NW y más grueso hacia el Este de la Cuenca Wagner. Por este hecho, es posible que el número mayor de múltiples hacia el NW de las secciones 6 y 10 (Anexo 3) esté relacionado con los fenómenos sedimentarios que gobiernan este sector, y que ocasionan que la textura que caracteriza el material fino genere numerosos múltiples constructivos. En contraste, hacia el sector Este la textura que caracteriza el material de tamaño de grano más grueso produce una dispersión de las ondas reflejadas por lo que se produce una generación no constructiva de múltiples, y por lo tanto una presencia reducida de ellos en el sector Este. En resumen, la diferencia de tamaño de grano en el depósito sedimentario es al parecer la

principal causa en el contraste de ocurrencia de múltiples entre el NW y el SE de las líneas 6 y 10. La presencia de material fino en fondo marino al parecer ocasiona múltiples constructivos; en contraste, la rugosidad que presenta la superficie del fondo marino con grano más grueso (sector Este), genera dispersión y múltiples no-constructivos, permitiendo observar mejor el reflejo de las señales a profundidad.

5.4. Estructura Regional alrededor de la Cuenca Wagner

El régimen de extensión del Norte del Golfo de California ha causado un adelgazamiento importante de la corteza continental, lo cual se evidencia por la existencia de cuencas abandonadas y cuencas activas como la Cuenca Wagner, sistemas de fallas pobremente organizadas y una deformación distribuida; pero aún así, no hay evidencia de generación de piso oceánico, como sí sucede en la boca del Golfo [Larson et al., 1972; Klitgord et al., 1974; Lonsdale, 1989 y DeMets, 1995]. Tomando en cuenta estas características se discutirán a continuación algunos rasgos tectónicos importantes en la zona externa a la Cuenca Wagner, como una propuesta para detallar la historia tectónica del Norte del Golfo, específicamente en el área que Nagy y Stock [2000] definen como *Zona de Transición Wagner*: 1) La Falla Cerro Prieto (FCP) en áreas marinas, 2) Dominio estructural que transfiere la deformación de la Falla Wagner hasta la Falla Cerro Prieto: *Dominio Estructural Wagner Cerro-Prieto*, DWCP), y 3) El Norte de la Cuenca Consag.

5.4.1 Falla Cerro Prieto

Con las secciones sísmicas de PEMEX-80 se identificaron dos lineamientos de falla con rumbos casi paralelos y separados ~34 km, los cuales son correlacionables con la localización de la Falla Cerro Prieto (FCP) propuesta por Fenby y Gastil [1991]. La FCP es la principal estructura que transfiere la deformación entre los sistemas de la parte Norte del Golfo de California y los sistemas del Valle Imperial y San Andrés [Fenby y Gastil, 1991] (Figura 2.1). La falla con mayor actividad reciente está en el Oeste del Dominio C-Pemex (Figura 4.4 y Figura 4.7), con una dirección de ~N50W/75SW (Figura 5.1). La cartografía de esta falla muestra una traza que se dirige hacia el delta del Río Colorado, proveniente del SE del Golfo Norte, como una estructura muy continua, y la que se infiere como la traza de FCP. La estructura más al NE del Dominio C-Pemex (Figura 4.4 y Figura 4.7) se desconoce en la literatura geológica del Norte del Golfo de California. Los desplazamientos verticales promedio de FCP son ~1.1 km, afectando incluso los sedimentos más superficiales. Este efecto estructural ocurre en la traza de la FCP a partir de la latitud ~31.25N hacia

el NW (Figura 5.1). En latitudes inferiores la FCP aparentemente es inactiva, esto se infiere debido a que la última actividad de esta falla está cubierta con un paquete sedimentario de ~300 km (Dominio C-Pemex de PEMEX-80).

La FCP representa el fallamiento activo más al NE y Este del Norte del Golfo en áreas marinas (Figura 2.1 y Figura 5.1). Hacia el Oeste de este dominio y hasta la Cuenca Wagner, la naturaleza de los horizontes y el fallamiento no se conoce con certeza debido a que el carácter sísmico de la sección 5037 de PEMEX-80 no es claro en esta zona y los horizontes son difusos. En contraste, hacia el sector Oeste de la cuenca, el paquete de horizontes se observa con mayor claridad. Los horizontes de estratificación y el fallamiento (que predomina con bajos desplazamientos verticales) tienen un buzamiento suave hacia el Este, (Figuras 4.5 y Figura 4.10). La estratificación tiene valores por debajo de los 30° hacia el Este y el fallamiento menores a 55° hacia el Este. De igual forma, no se observa en este sector Oeste de la Cuenca Wagner, ninguna estructura mayor que controle la dinámica de la cuenca por este costado. Es decir, la parte Norte del Golfo es un semigraben en el cual el fallamiento maestro está en el costado ENE y el flanco con flexión de los horizontes en el costado Oeste. Esta misma característica ocurre a escala más local en la Cuenca Wagner, en el cual la Falla Wagner es el fallamiento maestro y el flanco con flexión de los horizontes se localiza en sector Oeste de la cuenca (Figuras 4.5 y Figura 5.1).

5.4.2. Dominio Estructural Wagner Cerro-Prieto

El Dominio Estructural Wagner Cerro-Prieto (DWCP) es una propuesta de una zona tectónicamente activa que al parecer transfiere la deformación de la Falla Wagner hacia FCP (Figura 5.1). La traza de FCP muestra una aparente inactividad hacia el SE a partir de la latitud 31.25° N. En contraste, hacia el sector NW de FCP existe importante actividad tectónica. Esto sugiere que el Norte del Golfo y específicamente la FCP muestra una componente de evolución hacia el NW y un abandono de estructuras hacia el SE de la traza FCP (Figura 4.7 y Figura 5.1). Adicionalmente, algunas observaciones de sismicidad en el NW de la Cuenca Wagner, el fallamiento activo del Dominio B, y la ausencia clara de actividad tectónica y sismológica al NE de la Falla Wagner (Figura 5.1) son otros argumentos que también sugieren una evolución del sistema regional hacia el NW. Si la Falla Wagner interactuara directamente con la FCP, por extrapolación lineal de la traza hasta cortar la FCP, esto ocurriría en la zona inactiva de FCP (en latitudes inferiores a ~31.25° N), lo cual no sería coherente para transferir la deformación hacia el Norte. Estas condiciones corroboran que el sistema

regional a través de la Falla Wagner no evoluciona directamente hacia el NE y por el contrario, al parecer la tendencia de evolución es hacia el NW.

Una de las grandes incertidumbres es dilucidar el papel de la Falla Wagner y de las estructuras asociadas a la Cuenca Wagner, con respecto a su interacción con la Falla Cerro Prieto. Desafortunadamente, esta relación no se conoce aún con certeza usando sólo los datos del presente estudio. Sin embargo, al parecer la Falla Wagner no es la estructura que transfiere directamente la deformación al sistema continental de Cerro Prieto. En lugar de esto, la deformación se transfiere probablemente a través de estructuras que podrían estar localizadas al NNW-Norte de la Falla Wagner (Figura 5.1), siguiendo el criterio del arreglo en *en-echelón* del Golfo [Lonsdale, 1989]. La sismicidad reportada por RESNOM (Red Sísmica del Noroeste de México) entre 1987 y 2001 sugiere una localización más específica de esta zona de deformación (Figura 5.1). La zona propuesta se ha llamado informalmente en el presente trabajo *Dominio Estructural Wagner Cerro-Prieto* (DWCP). Corresponde a una franja de actividad SSW-NNE, que está en contacto con una zona tectónicamente activa de FCP, cerca de la latitud $\sim 31^{\circ} 4' N$, y hacia el Sur, con el fallamiento activo del Dominio B (Figura 5.1).

El DWCP propuesto al NW-Norte de la Falla Wagner puede explicar la presencia del sistema estructural del Dominio B, como la proyección de DWCP hacia el SW (Figura 4.2 y Figura 5.1). El Dominio B formaría parte del sector SW de este sistema estructural propuesto, y ambos estarían controlados por un mismo campo de esfuerzos. Si se acepta esta idea, el Dominio B permitiría inferir el rango de direcciones del sistema estructural DWCP y el tamaño relativo del mismo. Extrapolando las condiciones del Dominio B, la dirección del sistema DWCP podría estar fluctuando entre Norte-Sur a N10E, con buzamientos hacia el ESE principalmente, y en una franja de fallas de ~ 20 km de ancho (Figura 5.1).

5.4.3. Cuenca Consag

Hacia el Sur de la Cuenca Wagner, el sistema interactúa con estructuras de la Cuenca Consag. Se ha identificado fallamiento en el SSE y probablemente al Este de la Cuenca Wagner (Dominio C-Ulloa en la Figura 5.7) asociados a la Cuenca Consag, los cuales están controlados aparentemente por una componente lateral u oblicua derecha (Figura 4.2 y Figura 5.1). El fallamiento al Este de la Falla Wagner (Dominio C-Ulloa) parece estar asociado al dominio de fallamiento de la Cuenca Consag, por presentar direcciones al SSE y tipo de fallas muy similares. Por lo cual se propone que el

dominio estructural de la Cuenca Consag controla o controló las estructuras localizadas al Este de la Falla Wagner (Dominio C-Ulloa). Todas estas características y conociendo que las estructuras provenientes de la Cuenca Consag acomodan principalmente una componente lateral y oblicua del fallamiento, en una orientación aproximadamente paralela a la dirección de extensión en esta parte del Golfo, la Cuenca Consag sería un sistema transforme desarrollado a lo largo de una zona de transferencia [de acuerdo al modelo propuesto por Faulds y Varga, 1998], entre la Cuenca Delfin superior y la Cuenca Wagner.

CONCLUSIONES

La Cuenca Wagner es un semigraben de dirección NNE, que define una actitud pronunciada de los estratos hacia el costado Este y suave hacia el SW y Oeste. La morfología del semigraben es evidente a profundidad con la disposición asimétrica de los estratos observados en los datos de PEMEX-80. Los cambios batimétricos no reflejan el semigraben en superficie, en lugar de esto son evidentes las fuertes pendientes a ambos costados de la cuenca. La naturaleza del semigraben también se observa en la densidad de fallamiento en la cuenca, la cual es alta en dirección NW-SE (6 fallas/km para 1s de TD), y disminuye localmente para el centro de la cuenca en dirección NE-SW (1 falla/km para 1s de TD).

El fallamiento de la Cuenca Wagner y de las zonas cercanas se clasificó en cuatro dominios estructurales, de los cuales el más relevante para la cuenca es el Dominio A y secundariamente el Dominio B. Los Dominios A y B representan zonas estructurales diferentes. Ambos dominios fueron observados en la parte somera y profunda del subsuelo con base en las interpretaciones de los datos ULLOA-99 y PEMEX-80, respectivamente. El Dominio A representa la zona de la Falla Wagner y su fallamiento asociado en la cuenca. El Dominio B refleja la importancia de las estructuras al Oeste de la Cuenca Wagner, que transfieren la deformación hacia el Norte de la cuenca. El Dominio C-Ulloa y Dominio C-Pemex corresponden al grupo de fallas que describen el sector Este y NNE-NE a la Falla Wagner, respectivamente. El primero al parecer se relaciona con la dinámica de la Cuenca Consag y el segundo se relaciona con el sistema estructural activo de la Falla Cerro Prieto a partir de ~31.25N hacia el NW, e inactivo en dirección opuesta hacia el SE.

La Falla Wagner forma parte del Dominio A de fallamiento y es la principal estructura que controla la subsidencia actual del semigraben que define la Cuenca Wagner. Es una falla lítrica con dirección promedio ~N23E, que aflora a lo largo del costado Este de la cuenca, con una longitud de ~30 km. La falla se inclina hacia el NW, iniciando con un buzamiento pronunciado de ~79°, disminuyendo a ~58° (a ~0.6 s de TD) y ~28° a partir de ~1.8 s de TD, hasta perderse por debajo de los 6 s de TD. Por encima del plano de falla se desarrolla una serie de pliegues tipo “*rollover*”, que resultan del colapso del bloque de techo sobre el plano de falla durante la extensión y, paralelamente, por el efecto de fallas antitéticas y sintéticas.

La extensión que acomoda la Falla Wagner no se conoce claramente; sin embargo, una estimación del desplazamiento horizontal mínimo de la falla es ~26 km, que representa ~8.7 % de los ~300 km de la extensión que se calcula del Golfo. Los desplazamientos adicionales pueden ser calculados teniendo en cuenta correcciones por compactación, rotaciones y desplazamientos laterales, oblicuos y normales de tipo constructivo y no-constructivo de las fallas sintéticas y antitéticas asociadas a la Falla Wagner.

La extensión del Dominio B de fallamiento no se conoce con exactitud con los datos disponibles del presente estudio. El Dominio B es un sistema estructural de fallas aisladas al Oeste de la Cuenca Wagner. Este dominio podría estar asociado directamente con la Falla Wagner, o a su vez podría estarlo como con los dominios estructurales hacia el Norte del Golfo, que transfieren la deformación hacia el sistema de falla Cerro Prieto. Lo que se desconoce es el mecanismo de estas relaciones. Es probable que la relación con la Falla Wagner sea a través de una zona de acomodamiento definida con un fallamiento en-echelón y localizada justo al NW de la Falla Wagner. Esta zona respondería favorablemente a las condiciones entre ambos dominios, transfiriendo la deformación de Wagner hacia el Norte del Dominio B.

La parte central de la Cuenca Wagner (0.2 - 5.5 s de TD) está comprendida por dos paquetes sedimentarios diferenciados por su carácter sísmico, posiblemente debido al grado de consolidación. La geometría de la estratificación sugiere un llenado de la cuenca de forma divergente y localmente progradante. No se observan discordancias angulares que indiquen cambios importantes en la sedimentación, que se relacionen a levantamientos y erosión. La unidad estratigráfica más somera de la cuenca es la Unidad A (entre 0.2 y 0.5 s de TD). Está representada por 7 facies sísmicas que se separan discordantemente entre ellas por paraconformidades. La edad estimada de este paquete somero es ~80 ka, lo cual ubica a la Unidad A de las secciones de ULLOA-99 con un origen en el Pleistoceno superior.

Los numerosos múltiples al NW de las secciones 6 y 10 de ULLOA-99 podrían estar relacionados con el tipo de material sedimentario superficial que alimentan la Cuenca Wagner. La presencia de material fino en la superficie marina podría estar ocasionando múltiples de manera constructiva. Los horizontes de grano más grueso en el sector SE de las secciones generan dispersión de las ondas sísmicas por la rugosidad de la superficie, y por lo tanto la generación de múltiples no-constructivos, lo cual favorece el reflejo y registro de las señales sísmicas más profundas.

Hacia el Sur del Dominio B cambia un poco la dirección de las estructuras; allí se define la forma de una rampa de relevo como resultado particular del traslape de dos grupos de fallas. El resultado es un valle profundo que probablemente ha sido la entrada principal de material sedimentario hacia la Cuenca Wagner. La sección 6 de ULLOA-99 localmente presenta un material en la boca de la rampa, que sólo se observa en este sector al NW de la sección.

La Falla Wagner no es la estructura más septentrional que transfiere la deformación al sistema continental de la Falla Cerro Prieto. Se propone que la deformación se transfiere a través del *Dominio Estructural Wagner Cerro-Prieto* (DWCP), localizado en el sector NNW–Norte de la Falla Wagner. Algunos rasgos estructurales y enjambres de sismicidad reciente sugieren que este sistema está orientado NNE-SSW, como una probable prolongación del sistema de fallas del Dominio B. De ser así, tendría una orientación entre Norte-Sur y N05E, con buzamientos hacia al Este-SE principalmente, en un corredor de fallas ~20 km de ancho.

Las relaciones tectonoestratigráficas entre la zona de la Falla Wagner y DWCP, y entre la zona de la Falla Wagner y las estructuras de la Cuenca Consag, no se pudieron identificar claramente con los datos disponibles en este estudio. Sin embargo, la interacción con el sistema DWCP propuesto parece ser a través de una zona de acomodación que conecta la Falla Wagner con el sector Norte del Dominio B de fallamiento. Adicionalmente, las características observadas al SSE y Este de la Cuenca Wagner sugieren que las estructuras de la Cuenca Consag son un sistema de falla transforme, desarrollado al parecer a lo largo de una zona de transferencia. Bajo estas condiciones tectónicas, la Cuenca Wagner está limitada por dos posibles sistemas transcurrentes, al Norte por DWCP y al Sur por el fallamiento NW-SE de la Cuenca Consag, lo cual sugiere que la subsidencia de la Cuenca Wagner esta relacionada con la deformación por extensión de una cuenca *pull-apart*.

Referencias

- Ackermann, R.V., Schlische, R.W., and Withjack, M.O., 2001, The geometric and statistical evolution of normal fault systems: an experimental study of the effects of mechanical layer thickness on scaling laws, *Journal of Structural Geology*, 23, 1803-1819.
- Adams, J., Maslin, M. y Thomas, E., 1999 Sudden climate transitions during the Quaternary, *Progress in Physical Geography*, 23, 1-36.
- Atwater, I., and Stock, J.M., 1998. Pacific-North America Plate Tectonics of the Neogene Southwestern United States: An Update, *International Geology Review*, 40, 375-402.
- Anderson, E.M., 1951. *The Dynamics of Faulting*, 2nd ed. Oliver & Boyd, Edinburgh, 206 pp
- Badley, M. E., 1985. *Practical Seismic Interpretation*, IHRDC Boston. 185 pp.
- Barry, K.M., Caver, D.A. y Kneale, C.W., 1975 Report on recommended standards for digital tape formats, *Geophysics*, 40, 344 - 352.
- Buck, W. R., 1993. Effect of lithospheric thickness on the formation of high-and low-angle normal faults, *Geology*, 21, 933-936.
- Busby, C.J. y Ingersoll, R.V., 1995 *Tectonics of Sedimentary Basins*. Ed Blackwell Sciences. Cambridge, Massachusetts, USA. 457 pp.
- Carrquiry, J.D., Sánchez, A. y Camacho-Ibar, V.F., 2001. Sedimentation in the northern Gulf of California after cessation of the Colorado River discharge, *Sedimentary Geology*, 144, 37-62.
- Contreras, J., Scholz, C. y King, G.C.F., 1998. A model of rift evolution constrained by first-order stratigraphic observations, *Journal of Geophysical Research*, 102, 7673-7690.
- Contreras, J., Anders, M. y Scholz, C., 2000 Growth of a normal fault system: Observations from the Lake Malawi basin of the east African rift, *Journal of Structural Geology*, 22, 159-168.
- Contreras, J. y Scholz, C., 2001. Evolution of stratigraphic sequences in multisegmented continental rift basins: Comparison of computer models with the basins of the East Africa rift systems, *AAPG Bulletin*, 85, 1565-1581.
- Couch, R. W., Ness, G. E.; Sanchez-Zamora, O., Calderón-Riveroll, G., Doguin, P., Plawman, V., Coperude, S., Huehn, B. y Gumma, W., 1991. Gravity Anomalies and Crustal Structure of the Gulf and Peninsular Province of the Californias, in *AAPG, Memoir 47*, editado por J. P. Dauphin and B. R. I. Simoneit, *The Gulf and Peninsular Provinces of the Californias*, 25-45.
- Cowie, P.A., Gupta, S. y Dawers, N.H., 2000. Implications of fault array evolution for synrift depocentre development: insights from a numerical fault growth model, *Basin Research*, 12, 241-261.

- Cowie, P.A. y Roberts, G.P., 2001. Constraining slip rates and spacings for active normal faults, *Journal of Structural Geology*, 23, 1901-1915.
- Cowie, P.A. y Scholz, C., 1992. Displacement-length scaling relationship for faults: Data synthesis and discussion, *Journal of Structural Geology*, 14, 1133-1148.
- Crider, J.G., 2001. Oblique slip and the geometry of normal-fault linkage: mechanics and a case study from the Basin and Range in Oregon, *Journal of Structural Geology*, 23, 1997-2009.
- Curry, J.R. y Moore, D.G., 1984. Geologic and tectonic history of the mouth Gulf of California, en: *Tectonics and Sedimentation along the California Margin*, editado por J.K. Crouch y S.B. Bachman, Pac. Sec. SEPM, Bakersfield, California 17-36.
- Davinson, I., 1986. Listric normal faults profiles: calculation using bedlength balance and fault displacement, *Journal of Structural Geology*, 22, 291-305.
- Dawers, N.H., Anders, M.H. y Scholz, C., 1993. Fault length and displacement: Scaling laws, *Geology*, 21, 1107-1110.
- Dawers, N.H. y Anders, M.H., 1995. Displacement-length scaling and fault linkage, *Journal of Structural Geology*, 17, 607-614.
- DeMets, C., A., 1995. Reappraisal for seafloor spreading lineations in the Gulf of California: Implications for the transfer of Baja California to the Pacific Plate and estimates of Pacific-Northamerica plate motion, *Geophysical Research Letters*, 22, 3545-3548.
- Doguin, P., 1988. Crustal structure and faulting of the northern Gulf of California from geophysical modeling and deconvolution of magnetic profiles: M.S. Thesis, Oregon State University. 76 pp.
- Dula, W.F., Jr., 1991. Geometric models of listric normal faults and rollover folds, *AAPG Bulletin*, 75, 1609-1625.
- Faulds, J.E. y Varga, R.J., 1998. The role of accommodation zones and transfer zones in the regional segmentation of extended terranes. en: *Accommodation zones and transfer zones. The regional segmentation of the Basin and Range Province*. Editado por Faulds, J.E. y Stewart, J.H., Boulder Colorado, Geological Society of America. Special paper No. 323.
- Fenby, S.S. y Gastil, R.G., 1991. Geologic-Tectonic Map of the Gulf of California and Surrounding Areas. En: *The Gulf and Peninsular Provinces of the Californias*, *AAPG Bulletin Memoir* 47, 79-83.
- Fitch, A.A., 1976. *Seismic Reflection Interpretation*, Gebruder Borntraeger, Berlin-Stuttgart. 207 pp.
- Gartrell, A.P., 1997. Evolution of rift basins and low-angle detachments in multilayer analog models, *Geology*, 25, 615-618.
- Gastil, G., Lemone, D. y Stewart, W., 1973. Permian fusulinids from near San Felipe, Baja California, *AAPG Bulletin*, 57, 746-747.

- Gastil, G. y Krummenacher, D., 1977. Reconnaissance geology of coastal Sonora between Puerto Lobos and Bahía Kino, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 88, 189-198.
- Gawthorpe, R.L. y Leeder, M.R., 2000. Tectono-sedimentary evolution of active extensional basins, *Basin Research*, 12, 195-218.
- Gupta, S., Cowie, P.A., Dawers, N.H. y Underhill, J.R., 1998. A mechanics to explain rift-basin subsidence and stratigraphic patterns through fault-array evolution, *Geology*, 26, 595-598.
- Gupta, A. y Scholz, C., 2000. Brittle strain regime transition in the Afar depression: Implication for fault growth and seafloor spreading, *Geology*, 28, 1087-1090.
- Gupta, A. y Scholz, C., 2000b. A model of normal fault interaction based on observations and theory, *Journal of Structural Geology*, 22, 865-879.
- Harding, T.P., 1990. Identification of wrench fault using subsurface structural data: Criteria and Pitfalls. *AAPG Bulletin*, 74, 1590-1609.
- Henry, C.D., 1989. Late Cenozoic Basin and Range structure in Western Mexico adjacent to the Gulf of California, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 101, 1147-1156.
- Heney, T.L. y Bischoff, J.L., 1973. Tectonic elements of the Northern part of the Gulf of California, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 84, 315-330.
- Hill, S., Dragoset, B. y Weglen, A., 1999. An introduction to the special section: The new world of multiple attenuation, *The Leading Edge*, 18, 38-136.
- Hoskins, H., and Wood, W., 1996. Seismic acquisition system grounding and noise. En: Paull, C.K., Matsumoto, R., Wallace, P.J., et al., *Proc ODP, Init Repts*, 164: College Station, TX (Ocean Drilling Program), 43-46.
- Klitgord, K.D., Mudie, J.D., Bischoff, J.L. y Heney, T.L., 1974. Magnetic anomalies in the northern and central Gulf of California, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 85, 815-820.
- Larson, P.A.; Mudie, J.D. y Larson, R.L., 1972. Magnetic anomalies and fracture-zone trends in the Gulf of California, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 83, 3361-3368.
- Lavier, L.L. y Buck, R., 2000. Factors controlling normal faults offset in an ideal brittle layer, *Journal of Geophysical Research*, 105, 23431-23442.
- Lewis, C.J. y Stock, J.M., 1998. Paleomagnetic evidence of localized vertical axis rotation during Neogene extension, Sierra San Fermín, northeastern Baja California, México, *Journal of Geophysical Research*, 103, 2455-2470.
- Lindseth, R.O., 1987. Digital processing of Geophysical data, A Review, TRD, Alberta, Ca., 292 pp.
- Lonsdale, P., 1989. Geology and tectonic history of the Gulf of California, en: *The Eastern Pacific Ocean and Hawaii*, editado por Winterer, E. L., Hussong, D.M., y Decker, R. W.,

- Geological Society of America, The Geology of North America, Boulder Colorado, vol. N, 499–522.
- Lonsdale, P., 1995. Segmentation and disruption of the East Pacific Rise in the Mouth of the Gulf of California, *Marine Geophysical Researches*, 17, 323-359.
- Mammerickx, J., and Klitgord, K. D., 1982. Northern East Pacific Rise: Evolution from 25 m.y. b p to the Present, *Journal of Geophysical Research*, 87, 6751–6759.
- McQuillin, R., Bacon, M. y Barclay, W., 1979. *An Introduction to seismic Interpretation*, Gulf Publishing Company, Houston. 199 pp
- Mitchum, R.M., Vail, P.R. y Sangree, J.B., 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 6: Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences, *AAPG Bulletin. Memoir 26*, 117-133.
- Morley, C.K., 1999a. Boundary fault angle, with particular reference to the Lokichar Fault, Turkana Region, Kenya. Geoscience of Rift Systems Evolution of East Africa, *AAPG Studies in Geology*, 44, 115-129, Tulsa, Oklahoma.
- Morley, C.K., 1999b. Patterns of Displacement along large normal fault: Implications for basin evolution and fault propagation, based on examples from East Africa, *AAPG Bulletin*, 83, 613-634.
- Nagy, E.A. y Stock, J.M., 2000. Structural controls on the continent-ocean transition in the northern Gulf of California, *Journal of Geophysical Research*, 105, 16251-16269.
- Ness, G. E. y Lyle, M., 1991. A seismo-tectonic map of the gulf and peninsular province of the Californias, en: *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*, editado por J.P. Dauphin y B.R.T. Simoneit, *AAPG Bulletin, Memoir 47*, 71-78.
- Oskin, M., Stock, J.M. y Martin-Barajas, A., 2001. Rapid localization of Pacific-North America plate motion in the Gulf of California, *Geology*, 29, 459-462.
- Panda, S., LeBlanc, L.R., and Schock, S.G., 1994. Sediment classification based on impedance and attenuation estimation, *J Acoust Soc Am.*, 96, 3022-3035.
- Parson, T. y McCarthy, J., 1996. Crustal and upper mantle velocity structure of the Salton Trough, southeast California, *Tectonics*, 15, 456-471.
- Peacock, D.C.P., Knipe, R.J. y Sanderson, D.J., 2000. Glossary of normal faults, *Journal of Structural Geology*, 22, 291-305.
- Pérez-Cruz, G., 1982. Algunos resultados de la Investigación geológico-geofísica en la porción noroccidental del Golfo de California. *Bol. Soc Mex Geol Pet.*, 34, 71-77
- Persaud, P., Stock, J. M., Steckler, M., Martin-Barajas, A., Diebold, J.B., Gonzalez-Fernandez, A. y Mountain, G., 2002. Active deformation and shallow structure of the Wagner, Consag and Delfin Basins, Northern Gulf of California, Mexico. *Journal of Geophysical Research* En revision.

- Roberts, W. H. y Cordell, R. J., 1980. Problems of petroleum migration. *AAPG Studies in Geology*, 10. Tulsa, Oklahoma. 151 pp.
- Sánchez-Zamora, O., Doguin, P., Couch, R. W. y Ness, G. E., 1991. Magnetic anomalies of the northern Gulf of California: structural and thermal interpretations, en *AAPG Bulletin. Memoir 47. The Gulf and Peninsular Provinces of the Californias*, editado por J. P. Dauphin and B. R. T. Simoneit. 377-401.
- Sheriff, R.E. y Geldart, L P., 1995. *Exploration Seismology*, Cambridge University Press, 315 pp.
- Schlische, R.W., 1991. Half-graben basin filling models: New constraints on continental extensional basin development, *Basin Research*, 3, 123-141.
- Schlische, R W., 1995. Geometry and origin of fault-related folds in extensional settings, *AAPG Bulletin*, 79, 1661-1678.
- Schlische, R.W., Young, S.S. Ackermann, R.V. Gupta, A., 1996. Geometry and scaling relation of a population of very small rift-related normal faults, *Geology*, 24, 683-686.
- 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*, 8, 99-115.
- Stock, J.M., 2000. Relation of the Puertecitos Volcanic Province, Baja California, Mexico, to development of the plate boundary in the Gulf of California, en: *Cenozoic Tectonics and Volcanism of Mexico*, editado por Gerardo Aguirre Díaz, H. Delgado-Granados and J. M. Stock, Geological Society of America, Special Paper 334, 143-156.
- Van Andel, T. H., 1964. Recent marine sediments of Gulf of California, en: *Marine Geology of the Gulf of California*, editado por T. Van Andel and G. G. Shor, *AAPG Bulletin, Memoir 3*, 216-310.
- Walker, R G y James, N.P., 1992. *Facies models, response to sea level change*. Editado por Walker, R G y James, N P. Geological Association of Canada, 409 pp.
- Watterson, J, 1986. Fault dimensions, displacement, and growth, *Pure and Applied Geophysics*, 124, 365-373.
- Willemse, E.J.M, Pollard, D.D y Aydin, A , 1996. Three-dimensional analyses of slip distributions on normal fault arrays with consequences for fault scaling, *Journal of Structural Geology*, 18, 295-309.
- Williams, G. y Vann, I., 1987. The geometry of listric normal faults and deformation in the hangingwalls, *Journal of Structural Geology*, 9, 789-796.
- Withjack, M.O y Peterson, E. T., 1993. Prediction of normal-fault geometries-a sensitivity analysis, *AAPG Bulletin*, 77, 1860-1873.
- Xiao, H. y Suppe, J., 1992. Origin of rollover, *AAPG Bulletin*, 76, 509-529.
- Yilmaz, Ö., 1987. *Seismic data processing*. Investigations in Geophysics, No. 2. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, 473 pp.

anexos

ANEXO 1

Programas de Computadora Personal: Seismic Unix y Visul Sunt

Los programas de computador Seismic Unix y Visul Sunt están diseñados para procesar datos sísmicos de reflexión, desde asignar geometría hasta obtener secciones migradas. Estos programas fueron usados para el tratamiento de una parte de la información de este estudio, principalmente *Seismic Unix* (en ambiente *Unix*). Sólo en algunas etapas se utilizó el *Visual Sunt* (ambiente *Windows*).

Seismic Unix fue diseñado y programado por *Centre of Wave Phenomena* (CWP) perteneciente a *Colorado School of Mines*. Es un programa disponible gratuitamente en Internet (<http://www.cwp.mines.edu/cwpcodes/>). Por su parte, el *Visual Sunt* es un programa comercial de la empresa *W_Geosoft* (<http://www.geosoft.ch>). Ambos programas manejan un mismo conjunto de comandos, bajo un formato de datos específico propio del software. El programa *Visual Sunt* tiene la ventaja de poder manipular los comandos en un ambiente de ventanas, donde ya están montados muchos subprogramas (*scripts*) necesarios para llevar a cabo un proceso dado; en contraste, en *Seismic Unix* deben ser programados usando un *script* de *Unix*. Un ejemplo es el análisis de velocidad o la aplicación del filtro F-K, para los cuales en una sola ventana de comandos se invocan varios sub-comandos a la vez, incluyendo aquellos para la presentación gráfica de los datos. En contraste, para *Seismic Unix* deben ser provistos manualmente o con un *script*.

ANEXO 2

Programa para Estación de Trabajo: LandMark

LandMark es un grupo de programas en ambiente *Unix* diseñados por *Landmark Graphics Corporation* (<http://www.lgc.com/>), para interpretar los datos sísmicos de reflexión. Tiene módulos adicionales para utilizar en el análisis, información extraída de pozos, sismogramas sintéticos, mapas geológicos, etc...

El módulo de *LandMark* usado en la interpretación fue el *SeisWorks*, el cual está diseñado para trabajar con datos sísmicos después de apilar y/o migrados. En este módulo se digitalizó el fallamiento y los horizontes principales. Por último, este módulo es bastante útil en la presentación de secciones sísmicas en densidad variable, el cual es efecto visual que permite una mejor interpretación de la sección.

También se usaron otros programas para el tratamiento sísmico post-apilamiento. El *SeisWide* es un programa disponible gratuitamente en Internet (<http://www.phys.ocean.dal.ca/~deping/>). La plataforma de trabajo es el ambiente *Windows*, bajo un formato de datos estándar SEG-Y (Barry et al., 1975). Igual que *LandMark-SeisWorks*, este programa ofrece las opciones de digitalización y graficado especial. La diferencia está en que *LandMark* provee un número mayor de módulos y es más amigable en su ejecución.

ANEXO 3

Secciones ULLOA-99. Dirección NW-SE 3, 6a, 6b, 8, 10, 22

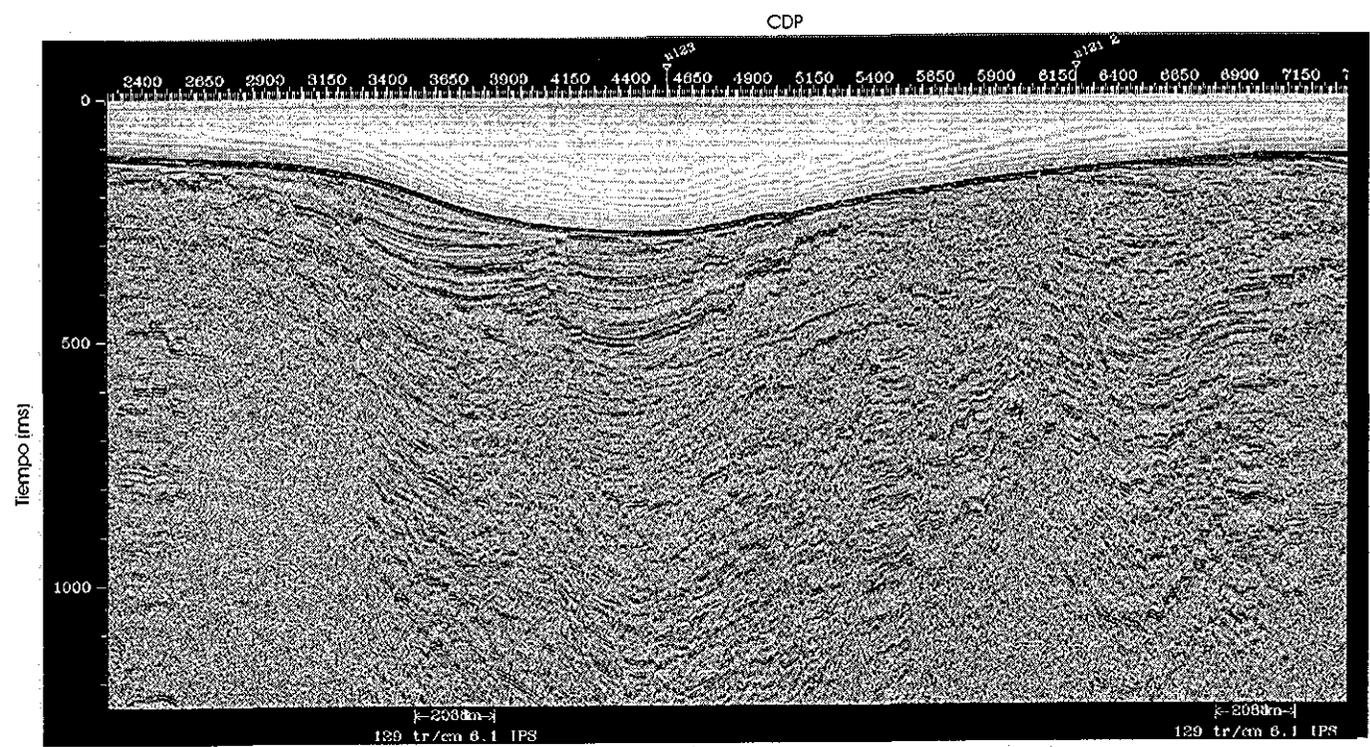
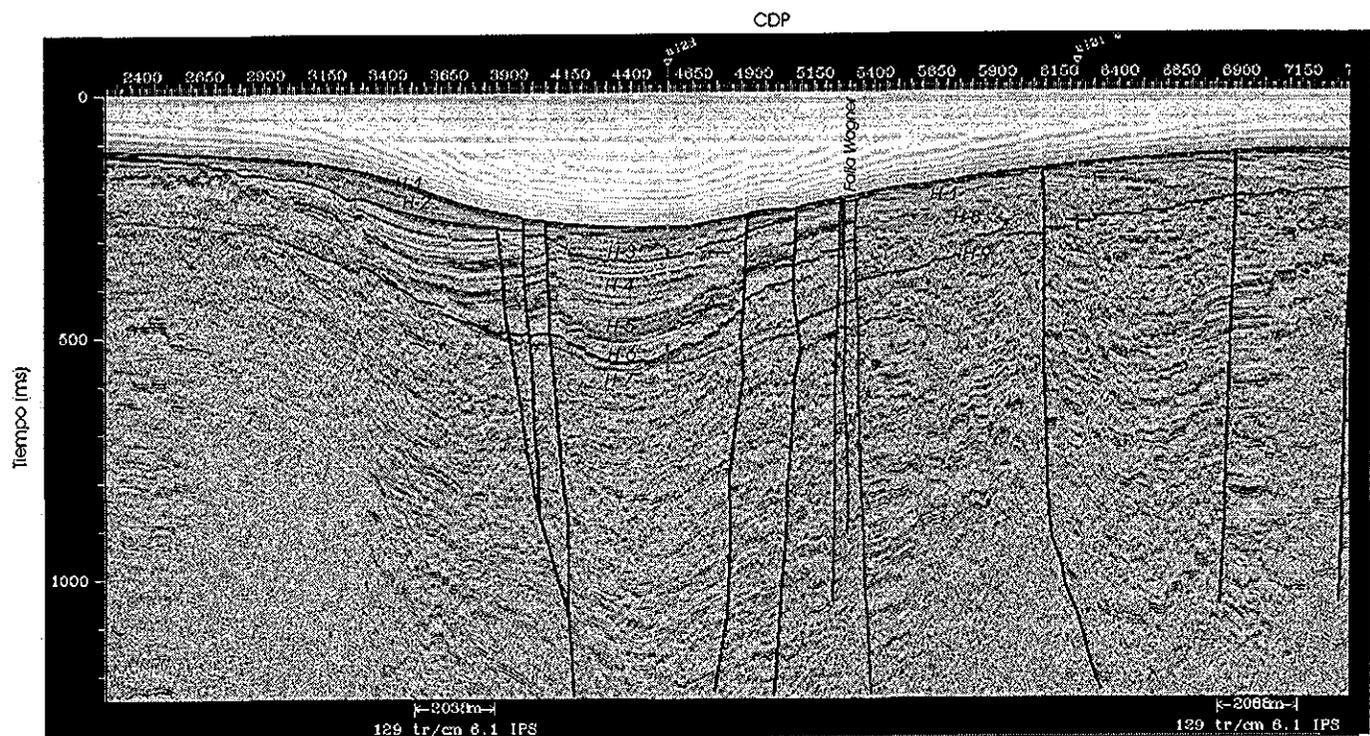
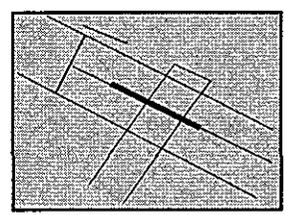
Las secciones siguientes presentan la Cuenca Wagner en un *perfil transversal* (Figura 1.1). Las secciones muestran solamente el área de la cuenca y una corta distancia a los costados de la cuenca. En cada línea sísmica se tiene la sección interpretada y sin interpretar, y su localización en el grupo de secciones de ULLOA-99 (Figura 1.1). El fallamiento interpretado representa el grupo de fallas más importantes en el modelo tectónico propuesto (Figura 5.1). Las fallas asociadas o menores no se grafican en estas secciones.

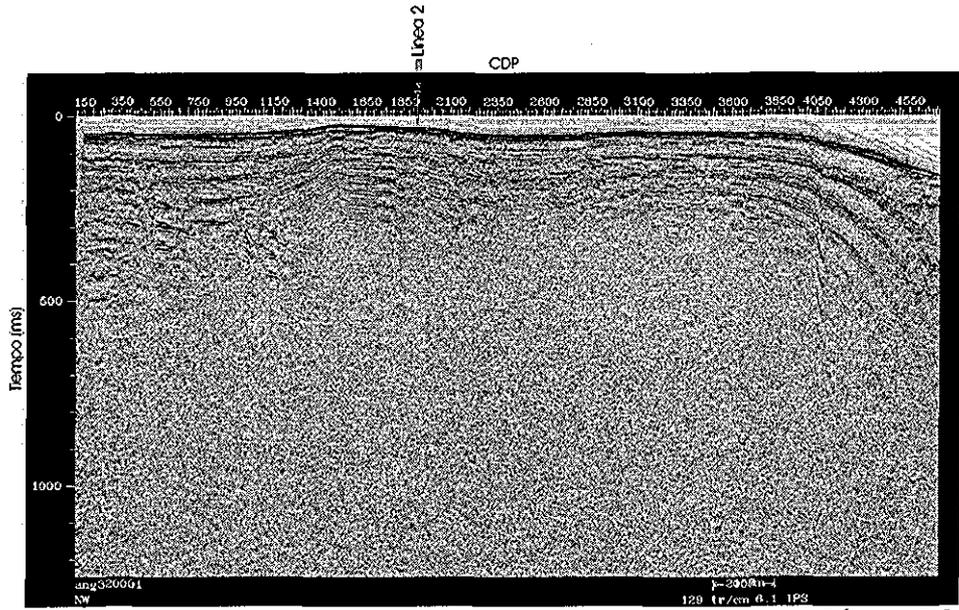
La mayoría de los horizontes (H-1 a H-7) representan las discordancias de la Unidad A principalmente (Figura 4.9). El resto de los horizontes (H-8 y H-9) separan las Unidades B y C (Figura 4.9). De la sección 6 se presenta también el sector NW de la línea sísmica (Sección 6b), para mostrar el material de alto contraste en impedancia acústica que explica estratigráficamente la presencia de una rampa de relevo con el fallamiento del Dominio B de ULLOA-99 (Figura 5.2). Se adjunta además las secciones al Norte (línea 10) y al Sur (línea 8) para comparar.

El eje vertical es el tiempo (milisegundos) y el horizontal representa los CDP's. La escala de cada sección está en la parte inferior en metros.

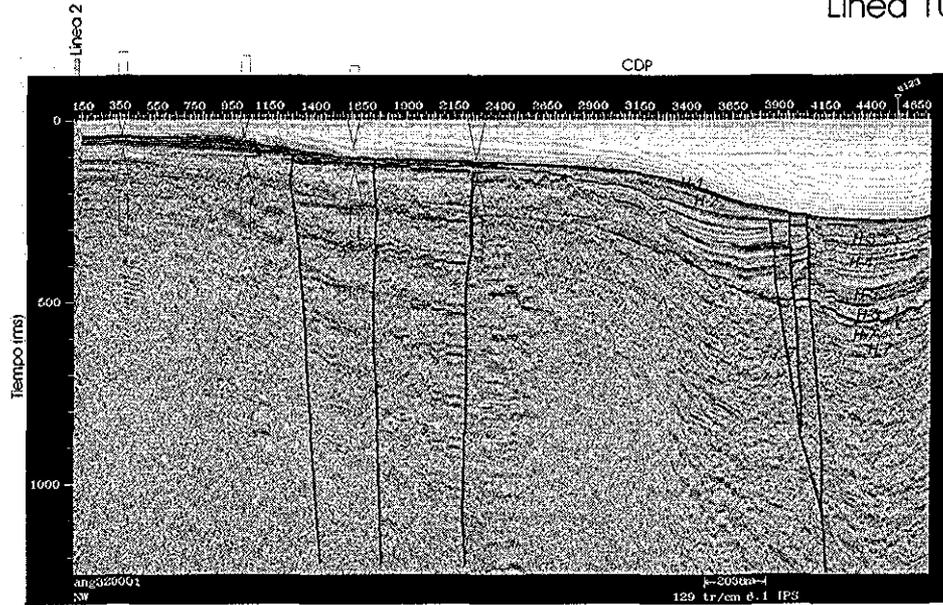
**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

SECCION SISMICA 6a
DIRECCION NW-SE



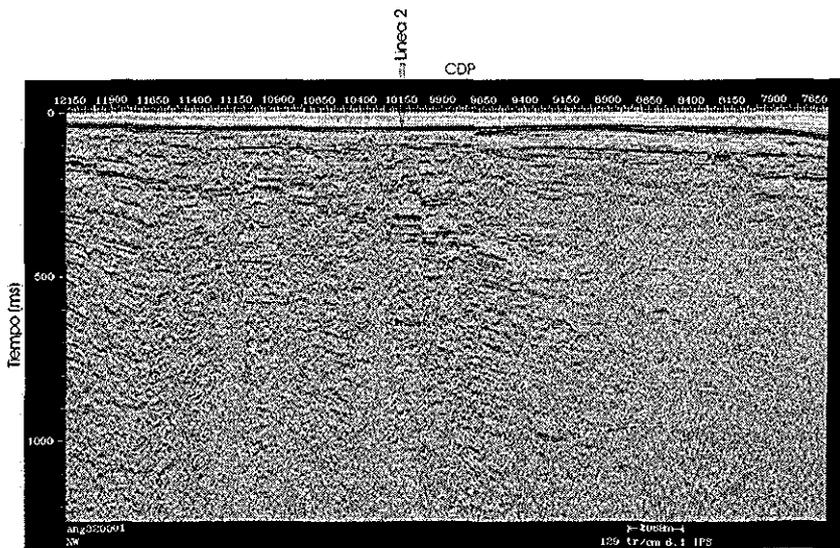


Línea 10

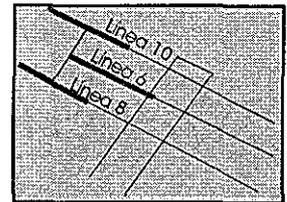


Línea 6

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Línea 8

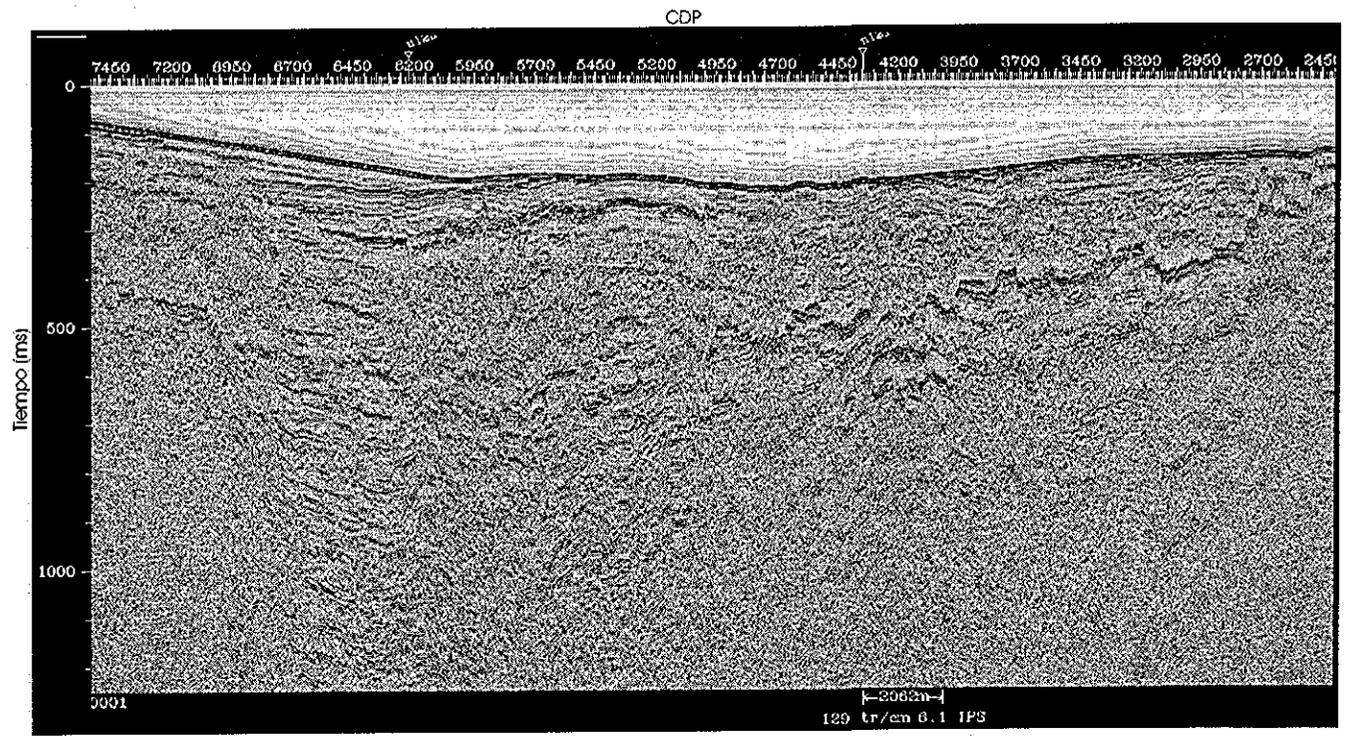
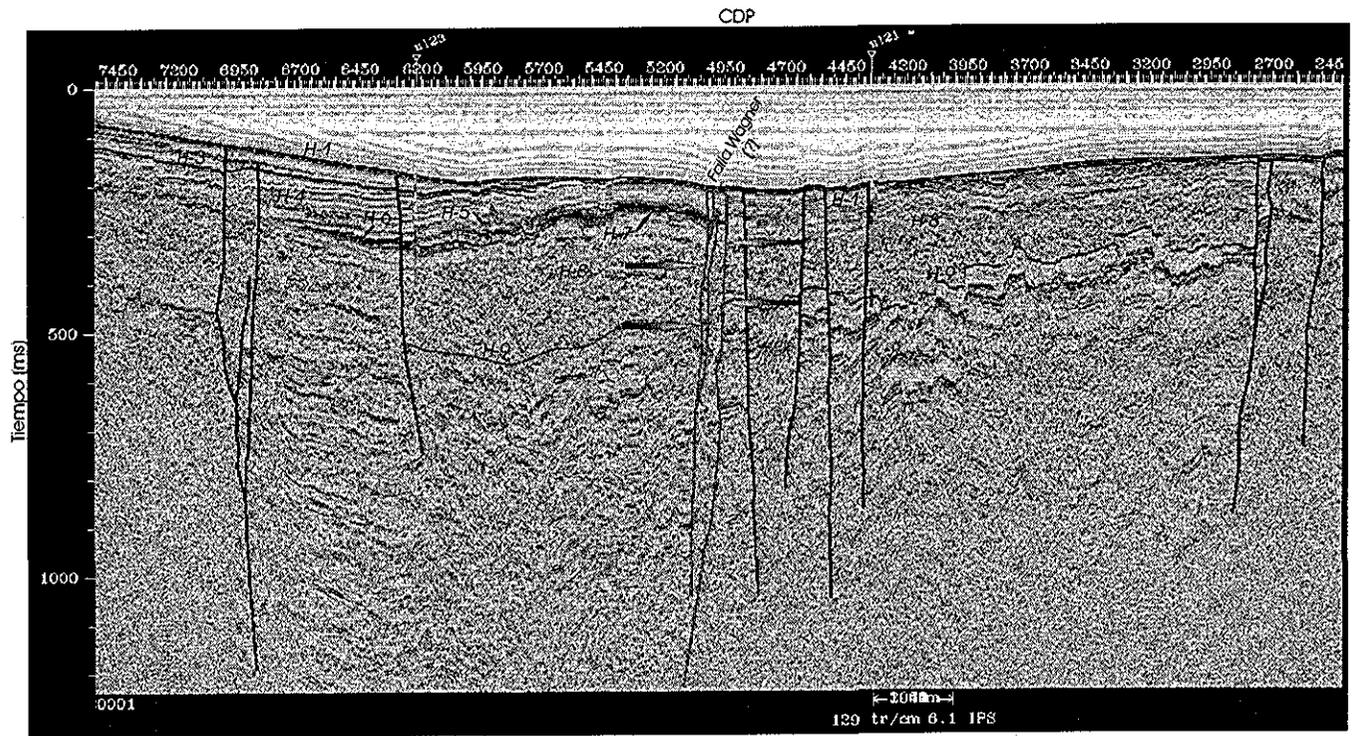
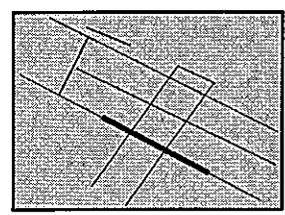


SECCION SISMICA 6b
DIRECCION NW-SE

Sector NW
Material superficial
asociado a la
rampa de relevo

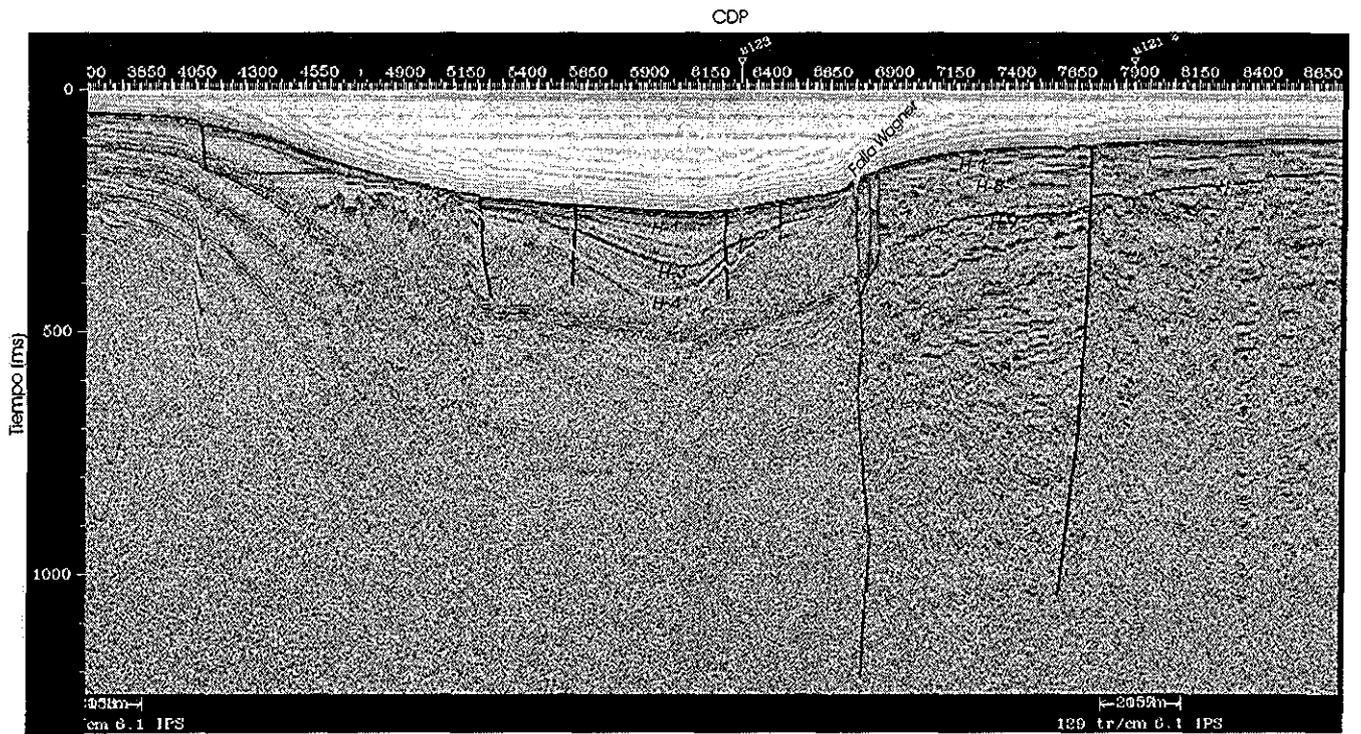
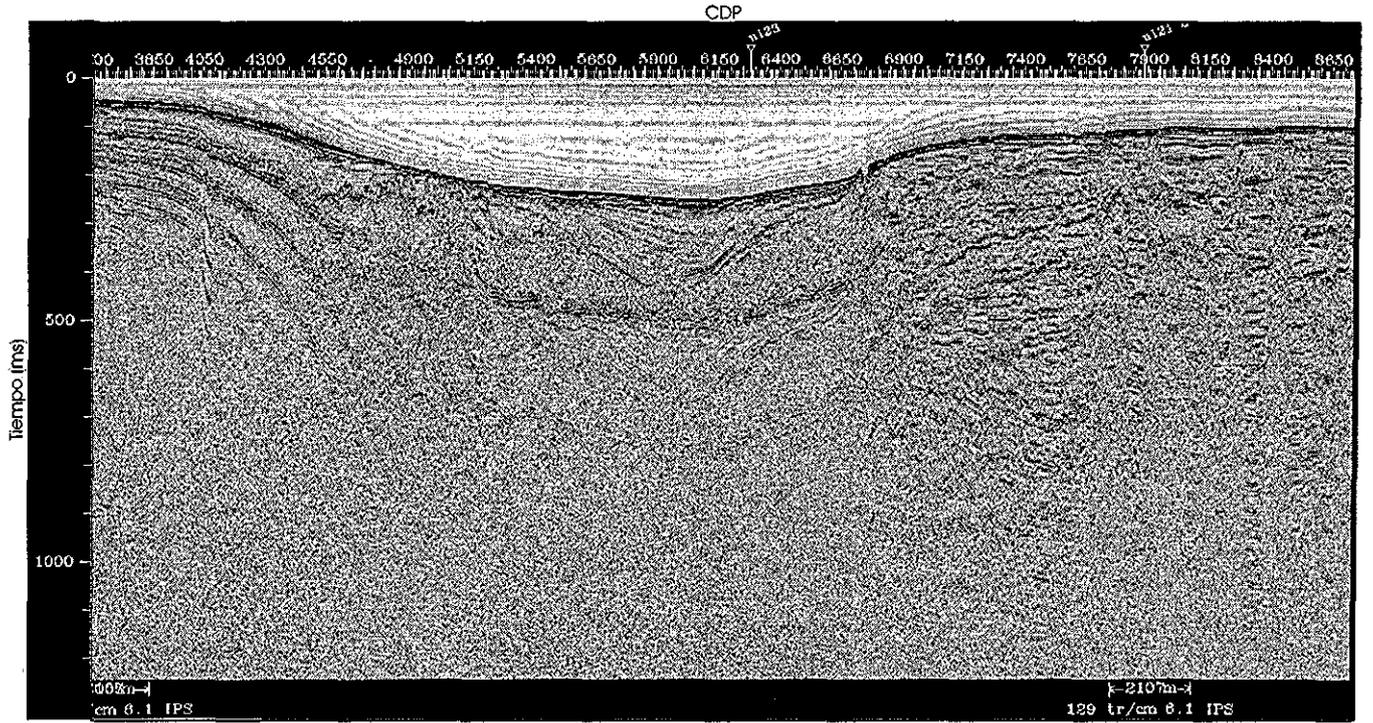
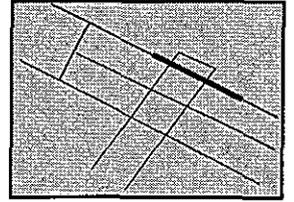
TESIS CON FALLA DE ORIGEN

SECCION SISMICA 8 DIRECCION NW-SE



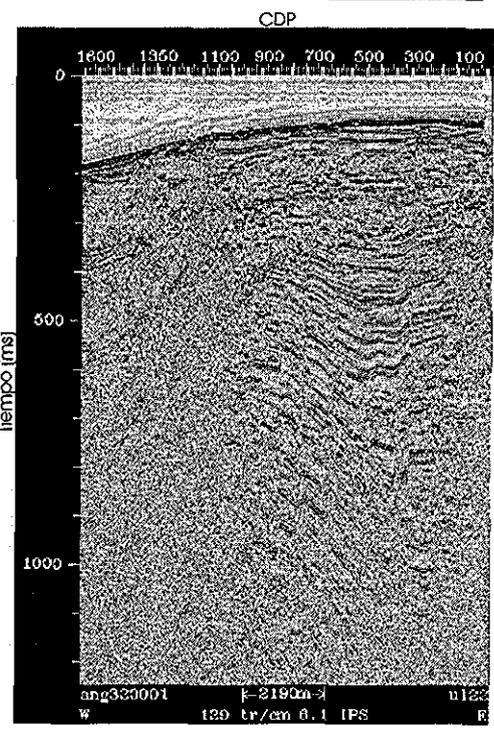
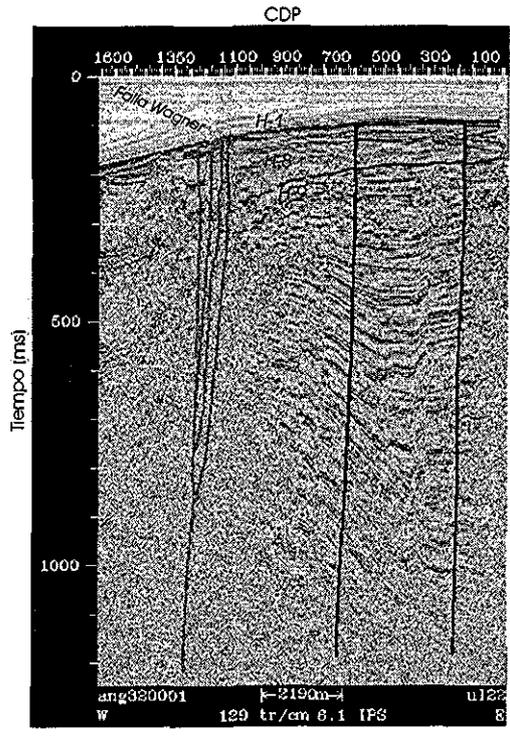
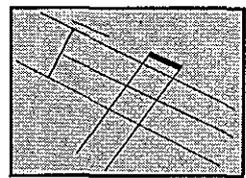
**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

SECCION SISMICA 10
DIRECCION NW-SE

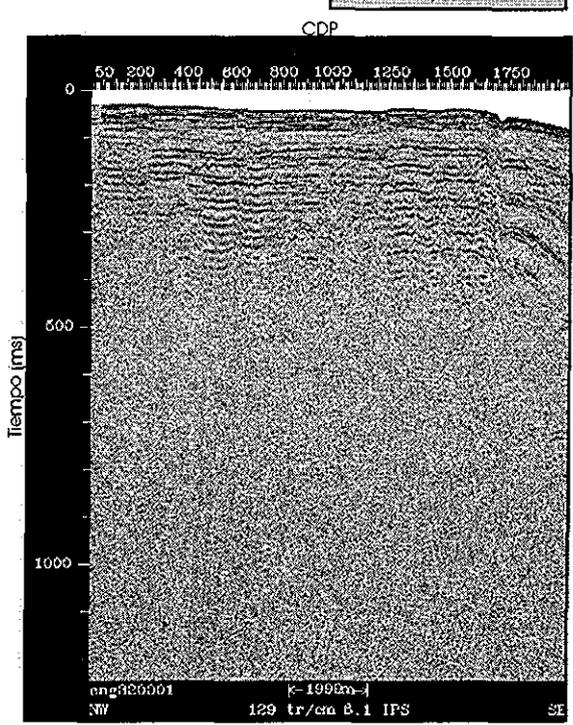
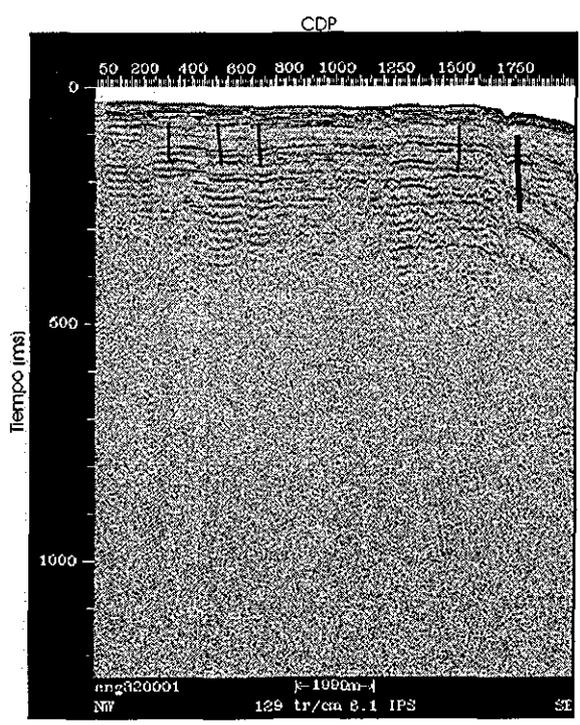
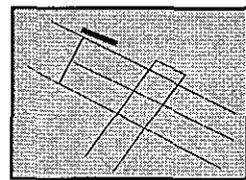


TESIS CON FALLA DE ORIGEN

SECCION SISMICA 22
DIRECCION NW-SE



SECCION SISMICA 3
DIRECCION NW-SE



ANEXO 4

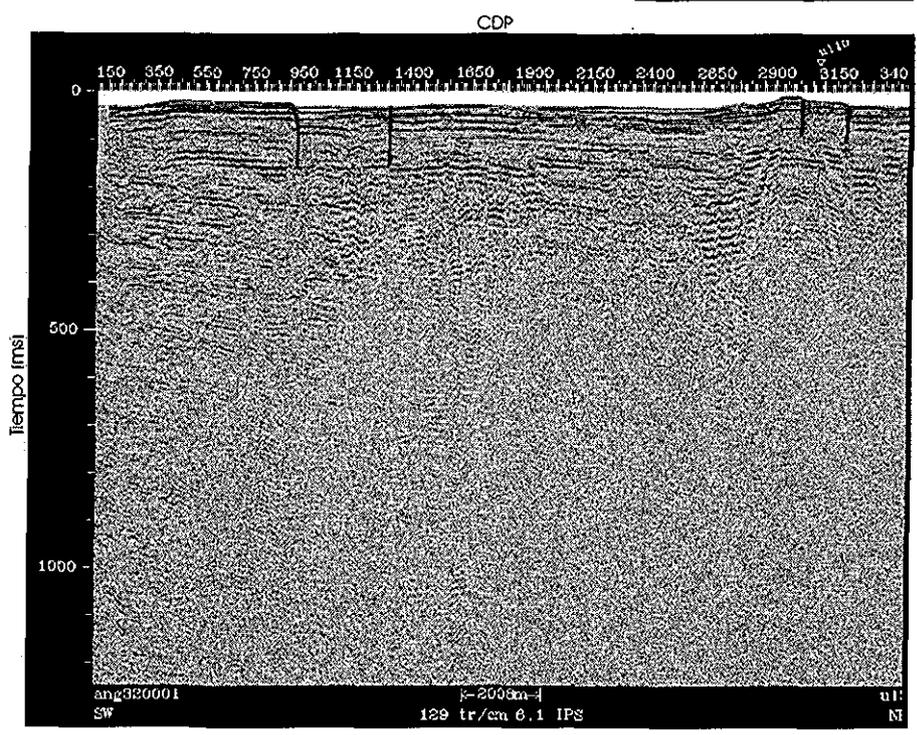
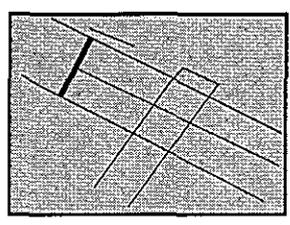
Secciones ULLOA-99. Dirección SW-NE 2, 21_2, 23

Las secciones siguientes muestran la zona que encierra la Cuenca Wagner en un *perfil longitudinal* (Figura 1.1). La sección que muestra la depresión de la cuenca es la Línea 23, el sector Oeste es la Línea 2 y el sector Este, la Línea 21_2. En cada línea sísmica se tiene la sección interpretada y sin interpretar, y su localización en el grupo de secciones de ULLOA-99 (Figura 1.1). El fallamiento interpretado representa el grupo de fallas más importantes en el modelo tectónico propuesto (Figura 5.1). Las fallas asociadas o menores no se muestran en estas secciones.

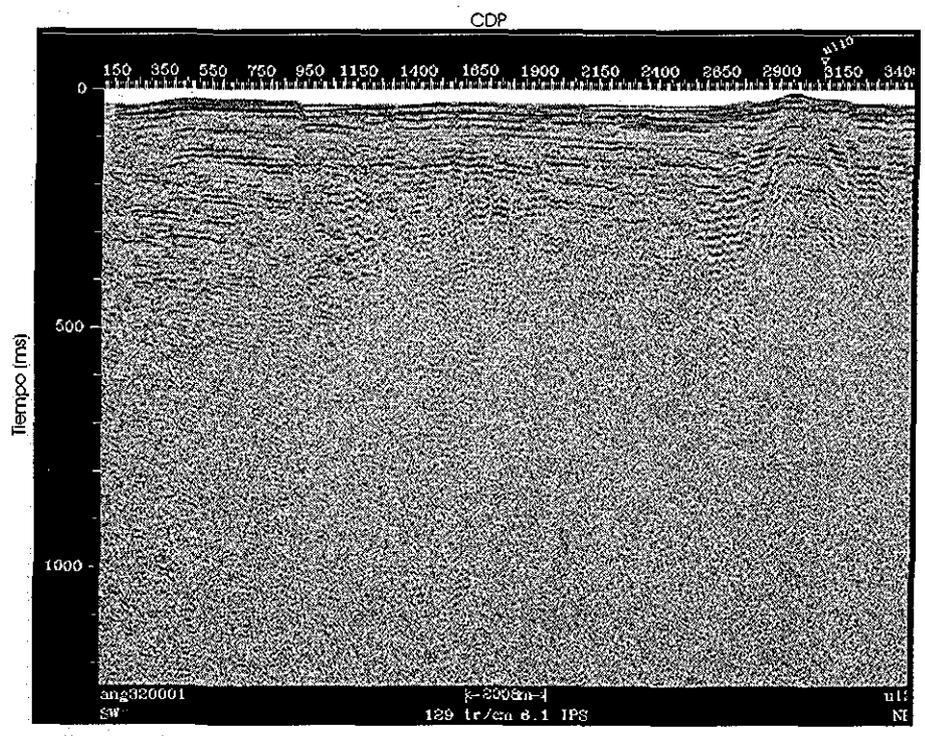
La mayoría de los horizontes (H-1 a H-7) representan las discordancias de la Unidad A principalmente (Figura 4.9). El resto de los horizontes (H-8 y H-9) separan las Unidades B y C (Figura 4.9). De la sección 6 se presenta también el sector NW de la línea sísmica (Sección 6b), para mostrar el material de alto contraste en impedancia acústica, que explica estratigráficamente la presencia de una rampa de relevo con el fallamiento del Dominio B de ULLOA-99 (Figura 5.2). Se adjunta además las secciones al Norte (línea 10) y al Sur (línea 8) para comparar.

El eje vertical es el tiempo (milisegundos) y el horizontal representa los CDP's. La escala de cada sección está en la parte inferior en metros

SECCION SISMICA 2 DIRECCION SW-NE

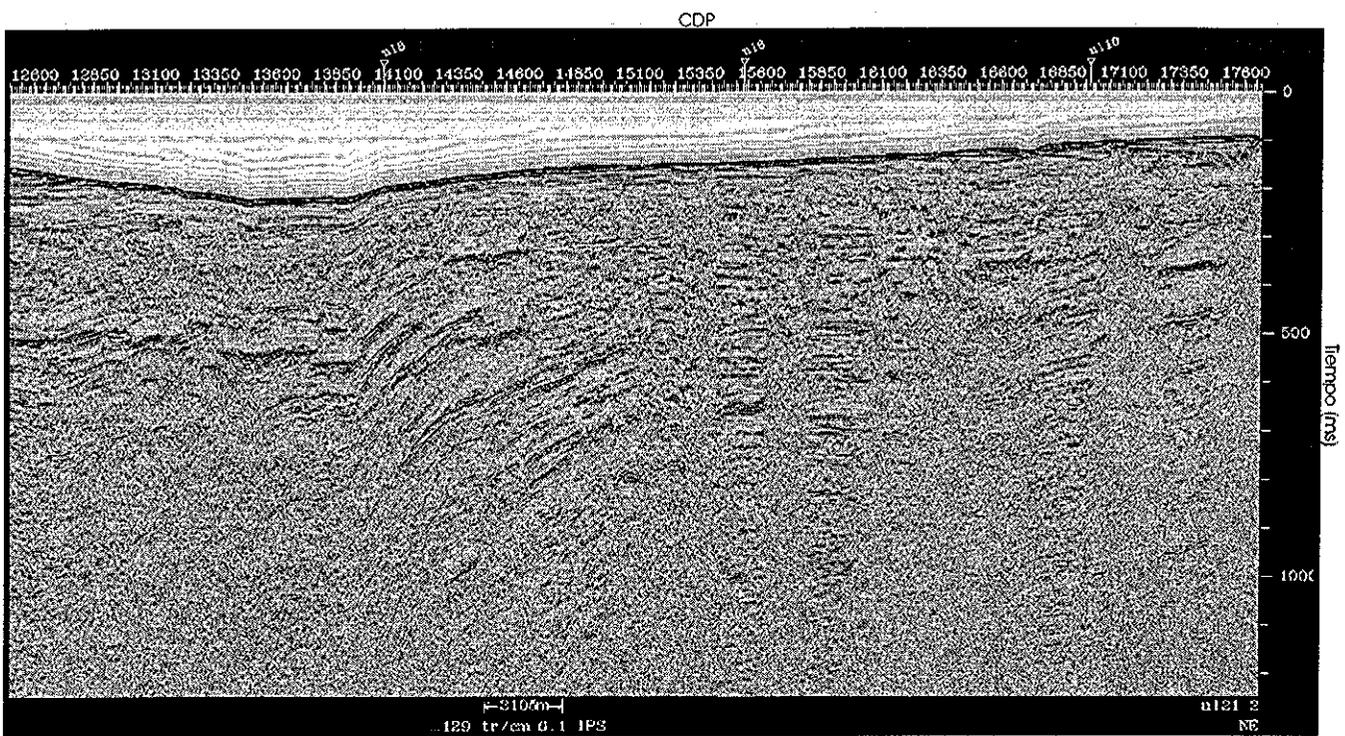
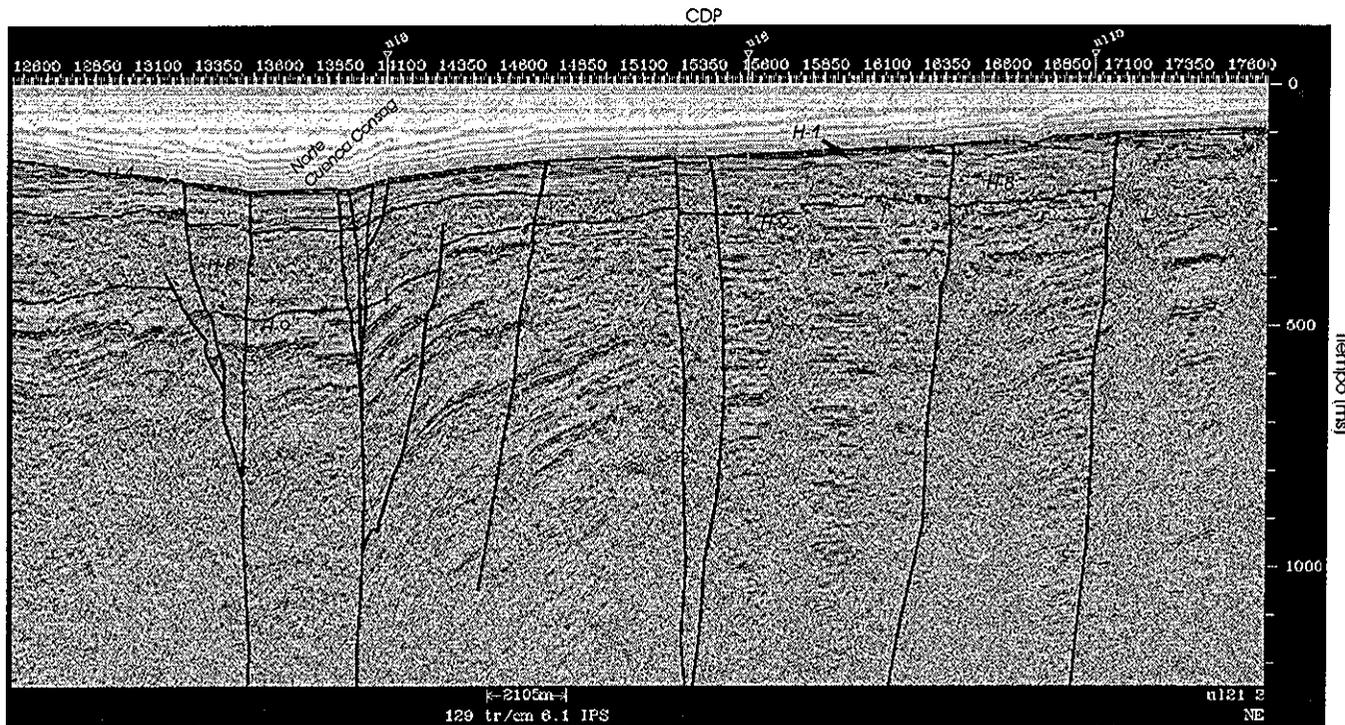
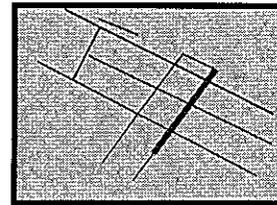


TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

SECCION SISMICA 21_2
DIRECCION SW-NE



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

SECCION SISMICA 23
DIRECCION SW-NE

