

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



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

**CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DE LA FRONTERA ENTRE
LAS CUENCAS CONSAG Y DELFÍN SUPERIOR, GOLFO DE
CALIFORNIA, MÉXICO.**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

ALONSO SOJO AMEZQUITA

Ensenada, Baja California, México, Marzo de 2012

TESIS DEFENDIDA POR

Alonso Sojo Amezquita

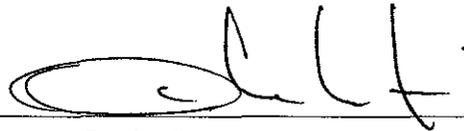
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ



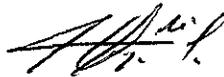
Dr. Mario González Escobar
Director del Comité



M.C. Francisco Suárez Vidal
Miembro del Comité



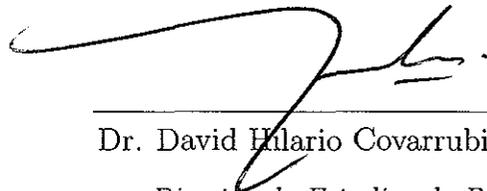
Dr. Jesús Arturo Martín Barajas
Miembro del Comité



M.C. José Luis Briseño Cervantes
Miembro del Comité



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



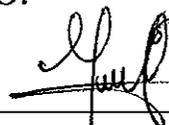
Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
Director de Estudios de Posgrado

16 de Marzo 2012

RESUMEN de la tesis de **ALONSO SOJO AMEZQUITA**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de **MAESTRO EN CIENCIAS en CIENCIAS DE LA TIERRA** con orientación en **GEOFÍSICA APLICADA**. Ensenada, Baja California, Marzo de 2012.

CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DE LA FRONTERA ENTRE LAS CUENCAS CONSAG Y DELFÍN SUPERIOR, GOLFO DE CALIFORNIA, MÉXICO.

Resumen aprobado por:



Dr. Mario González Escobar

Director de Tesis

En la década de los 70, Petróleos Mexicanos realizó un levantamiento de sísmica 2D multicanal en el norte del Golfo de California (NGC). La retícula del levantamiento cubre una serie de cuencas activas, entre ellas las cuencas Consag y Delfín Superior. El procesamiento e interpretación de la información recabada permitió documentar las principales características estructurales que delimitan ambas cuencas. Tradicionalmente el NGC ha sido descrito como un incipiente centro de dispersión. Sin embargo, anteriormente no se había documentado basamento acústico que aportara evidencia de una corteza de nueva generación. En este trabajo localizamos un basamento acústico bajo la cuenca Consag, sepultado bajo un paquete sedimentario superior a los 4 km.

También encontramos que cuencas extensionales son conectadas por segmentos de fallas de desplazamiento lateral derecho, contrastando con trabajos previos que sugieren que la extensión se concentra en el eje del rift y que la cizalla lateral ocurre solo en el margen de la península. Las fallas reportadas en este trabajo principalmente tienen una orientación entre 15° y 30° NNE, para las que acomodan principalmente extensión. Se detectaron dos zonas de cizalla lateral definidas por fallas con orientación 27° NNW, que constituyen el límite oriental de las cuencas Delfín Superior y Delfín Inferior. Estos resultados muestran el límite oriental de la zona de extensión activa en el NGC.

Palabras Clave: Sísmica de reflexión, cuenca Consag, cuenca Delfín Superior, Golfo de California.

ABSTRACT of the thesis presented by **ALONSO SOJO AMEZQUITA**, in partial fulfillment of the requirements of the degree of **MASTER IN SCIENCE** in **EARTH SCIENCES** with orientation in **GEOPHYSICS**. Ensenada, Baja California, March 2012.

In the 70's, Petroleos Mexicanos performed a 2D multichannel seismic survey in the north of the Gulf of California (NGC). The grid of the survey covers a range of active basins, including Consag and Delfín Superior basins. The processing and interpretation of information of seismic dataset allowed to document the major structural features that define both basins. NGC traditionally has been described as an incipient spreading center. However, not previously documented acoustic basement furnish evidence of a crust of new generation. In this paper, we located an acoustic basement under the basin Consag, buried under a sedimentary package over 4 km.

We also found that the extensional basins are connected by segments of right lateral faults, in contrast with previous works that suggest that the extension is concentrated in the rift axis and the lateral shear occur only at the margin of the peninsula. The faults reported in this thesis are primarily oriented between 15 and 30 ° NNE mainly for accommodating extension. We detected two lateral shear zones defined by faults oriented NNW 27 ° constituting the eastern boundary of the Superior and Lower Delfín basins. These results show the eastern boundary of the active extension zone in the NGC.

Keywords: Seismic reflection, Consag basin, Delfin Superior basin, Gulf of California.

*A mi familia por todo su
apoyo*

Agradecimientos

A todas las instituciones que hicieron posible este trabajo: al CONACYT, por su apoyo económico durante mi estancia en el posgrado; a Petróleos Mexicanos, quién facilito el conjunto de datos; a Halliburton Drilling Evaluation and Digital Solutions México y su programa Grant Universitario, que proporcionó el software de procesado e interpretación sísmica; al CICESE, por contar con el capital humano tan capaz que asesoró y dirigió la investigación.

Al Dr. Mario González Escobar, que me permitió integrarme a este proyecto. Por haber compartido sin celo alguno su conocimiento; que siempre puso a mis manos, las herramientas que hicieron posible concluir con éxito este reto.

A mis sinodales por sus oportunos y valiosos comentarios; Dr. Jesús Arturo Martín Barajas, MC Francisco Suárez Vidal y MC José Luis Briseño Cervantes.

A Sergio Manuel Arregui Ojeda por su apoyo en el manejo de la base de datos sísmicos y la elaboración de mapas.

Martin Francisco Pacheco Romero por su apoyo en el proceso de interpretación.

A Luis Alberto Sánchez por el apoyo técnico en el procesado de sísmica de reflexión.

A la coordinación, administración, docentes y cuerpo técnico de la división de Ciencias de la Tierra, con una especial dedicatoria a: Carlos Francisco Flores Luna, Selene Solorsa, Antonio Gonzáles Fernández, Juan Manuel Espinosa Cardeña, Enrique Gómez Treviño, Marco Antonio Pérez Flores, José Manuel Romo Jones, Martha Elva Barrera López, María Bárbara Uribe Martínez y Humberto Santana Benítez Pérez.

A Itzel Serrano por su apoyo incondicional en este proceso, y sobre todo por sus palabras de aliento.

A mis compañeros; Angelica, Esther, Adrian, Mario, Paco, Michael, Juan Carlos, Pedro, Paco, Enrique, Olaf, Armando, Ismael, Roman.

Un agradecimiento especial al grupo de símica de reflexión denominado como LOS MARIO'S: Cristina, Clemente y Xannez, quienes organizaron una fiesta de titulación digna de recordar de por vida.

Contenido

	Página
Resumen en español	i
Resumen en inglés	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Contenido	vi
Lista de Figuras	viii
Lista de Tablas	xiii
I. INTRODUCCIÓN	1
I.1 Sismicidad	9
I.2 Justificación	10
I.3 Objetivos generales	13
I.3.1 Objetivos específicos	13
II. EL DATO SISMICO	14
II.1 Parámetros de adquisición de los datos	14
II.2 Secuencia de Procesado	14
II.2.1 Edición de trazas y asignación de la geometría	15
II.2.2 Filtros (Señal vs. Ruido)	17
II.2.3 Corrección por divergencia esférica y ganancia	19
II.2.4 Deconvolución	19
II.2.5 Analisis de velocidad, corrección por NMO y stack	20
II.2.6 Migración	21
III. RESULTADOS	25
III.1 Interpretación de las secciones sísmicas	25
III.1.1 Descripción línea 5045	27
III.1.2 Descripción línea 5047	27
III.1.3 Descripción línea 5049	29
III.1.4 Descripción línea 5052	29
III.2 Basamento	33
III.3 Correlación	33
III.3.1 Cuenca Consag	33

Contenido (continuación)

	Página
III.3.2 Cuenca Delfín Superior	36
IV. Discusión y conclusiones	43
IV.1 Estructura general del basamento en el norte del Golfo de California	43
IV.2 Deformación distribuida o particionada?	44
IV.3 La frontera estructural entre la Cuenca Consag y Delfín Superior . .	46
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

Lista de Figuras

Figura		Página
1	Mapa del Golfo de California. El recuadro rojo indica el área que se verá con mayor detalle en la figura 2. Las flechas en color negro indican el movimiento relativo entre las placas Pacífico y Norte América, N37°W (Atwater y Stock, 1998).	3
2	Batimetría del norte del Golfo de California. Hace énfasis principalmente en el sistema de cuencas activas, comprendido por la Cuenca Wagner, Consag, Delfín Superior e Inferior. La configuración de curvas de nivel es a cada 50 m. Los datos fueron obtenidos gratuitamente Global Multi-Resolution Topography Data Portal (http://www.geomapapp.org).	6
3	Perfil magnético que corta la Cuenca Consag y Delfín superior. La grafica en la parte superior muestra los resultados de la inversión del levantamiento. La línea en color azul de ésta grafica representa la trayectoria que sigue la base del relleno sedimentario a lo largo del perfil. Como se observa en la figura en la región central de la sección se observa un alto estructural, que es inferido al ver como el espesor del relleno sedimentario es menor que a los extremos. Modificado de Sanchez-Zamora <i>et al.</i> (1991).	7
4	En el mapa se indica con puntos blancos las zonas donde se realizaron estudios de refracción, el número a un costado de estas ubicaciones es la profundidad a la base de los sedimentos expresada en kilómetros. En el modelo tridimensional que se encuentra en la parte superior se incluye una capa creada con la batimetría y otra con las profundidades de los sedimentos, que nos ayuda a visualizar que la tendencia estructural del basamento es caer al centro del Golfo de California. Sin embargo, se alcanza a observar que bajo la cuenca Consag existe un ligero alto estructural. Modificado de Sanchez-Zamora <i>et al.</i> (1991).	8

Lista de Figuras (continuación)

Figura		Página
5	Sismicidad en el norte del Golfo de California. Proyectada en un bloque isométrico con dos orientaciones para una mejor visualización de la distribución de hipocentros. Esta proyección muestra que la sismicidad ocurre en zonas circundantes a las cuencas, sin embargo, no indica una tendencia clara de la orientación de las fallas. La información fue obtenida del catalogo de RESNOM (http://resnom.cicese.mx). El recuadro en color blanco corresponde a el área de estudio.	11
6	a) El mallado de datos recolectados en el proyecto Ulloa99. b) es la ubicación del conjunto de registros colectados por PEMEX (1979-1984).	12
7	a) Es un conjunto de trazas ordenadas por fuente en común sin edición alguna. b) la edición del mismo grupo de trazas (matado de trazas, <i>top mute</i> , renombrado de etiquetas y asignación de la geometría)	17
8	Espectros de amplitud de un conjunto de trazas ordenadas por misma fuente en común. a) Contiene todo el rango de frecuencias del registro (8-124 Hz), y b) es el mismo dato, con un filtro pasa-bandas aplicado con una ventana de 8-12-40-50 Hz.	18
9	Ganancia automática es un método empírico, donde la ganancia es un simple número por el cual las amplitudes de entradas se multiplican. Posterior a este proceso, las trazas adquieren una mejor apariencia visual en lo vertical. Por lo tanto, será más sencillo identificar estructuras a profundidad. Modificada de Gadallah y Fisher (2005).	20
10	Geometría de un mismo punto en común (CMP). Ilustra la lógica del levantamiento sísmico marino en el método CMP. En la etapa de procesado se sortearon las trazas dejando grupos de tiros que comparten un mismo punto en común.	22
11	Apilados (<i>stacks</i>) de velocidad constante (CVS) para la línea 5045. Esta secuencia muestra como un reflector corregido por NMO con una velocidad ideal ó muy cercana a ella, logra ser apilado y expresado con mayor fuerza.	23

Lista de Figuras (continuación)

Figura		Página
12	Modelo de velocidades de la línea 5045. a) muestra el modelo de velocidad para la línea 5045. b) el <i>stack</i> de la sección 5045 ya corregida por NMO.	24
13	Esquema que ayuda a comprender como al aplicar la corrección por NMO los reflectores se colocan horizontal. Posterior a aplicar esta corrección apilamos las trazas para formar una única.	24
14	Conjunto de líneas sísmicas empleadas en la interpretación. Las líneas en color negro representan las secciones sísmicas procesadas en esta tesis. Las líneas en color guinda pertenecen a las secciones sísmicas tomadas de la base de datos de CICESE.	26
15	Sección 5045. En esta figura podemos observar la línea sísmica sin interpretar e interpretada. Cortó de costa a costa transversalmente el norte del Golfo de California.	28
16	Sección 5047. se presenta la imagen sin interpretar e interpretada.	30
17	Sección 5049 cortó transversalmente el Golfo. Se puede observar la base del relleno sedimentario en Consag se desplanta alrededor de 3.5 km sobre un difuso reflector, el cual parece ser el cuerpo de alta velocidad. El recuadro rojo indica un acercamiento del area marcada sobre la sección interpretada.	31
18	Sección 5052. esta imagen podemos observar la línea 5052 sin interpretar e interpretada.	32
19	Configuración final para el basamento acústico continental en el área de estudio. La escala de colores indica el tiempo doble al que se encontró el basamento acústico en las secciones analizadas para este trabajo. La notoria caída del basamento que se prolonga de la costa de Sonora posiblemente sea el trazo de la falla Amado. SF = San Felipe; PP = Puerto Peñasco; PL = Puerto Lobos.	34

Lista de Figuras (continuación)

Figura	Página	
20	Interpretación estructural de la zona de transición entre las cuencas Consag y Delfín Superior. Las líneas en color negro simple indican el trazo de las fallas que acomodan la extensión. Las líneas negras gruesas, son las fallas Refugio (FR), Volcanes (FV) y Cortés (FC), que acomodan principalmente desplazamiento lateral.	35
21	(a) Isométrico de la cuenca Consag, contiene la configuración de tres horizontes; El fondo marino, base de los sedimentos y cima del basamento. También se muestran las falla Consag Noroeste (FCNO) y la falla Consag Sureste (FCSE), (b) La ubicación de los segmentos de líneas sísmicas usados en la interpretación. FV = falla Volcanes; FR = falla Refugio; FA = falla Amado. SF = San Felipe; PP = Puerto Peñasco; PL = Puerto Lobos.	37
22	Segmento de línea sísmica 5047 usado para la interpretación de los rasgos estructurales dentro de la cuenca Consag. (a) es el segmento sin interpretación. (b) es el segmento con interpretación. FCNO = Falla Consag Noroeste; FCSE = Falla Consag Sureste.	39
23	Segmento de línea sísmica 5052 usado para la interpretación de los rasgos estructurales dentro de la cuenca Consag. (a) es el segmento sin interpretación. (b) es el segmento con interpretación. FCNO = Falla Consag Noroeste; FCSE = Falla Consag Sureste.	40
24	Las principales características estructurales en la cuenca Delfín Superior. FV = Falla Volcanes; FR = Falla Refugio; FC = Falla Cortés.	41
25	Dos segmentos de líneas sísmicas: (a) línea 5081 y (b) línea 5077 donde se muestra la interpretación de la falla Refugio y (b) la correlación de la misma.	42

26	Estructuras principales en el norte del Golfo de California. Las líneas en color negro representan las estructuras interpretadas en este trabajo. Las líneas en color café son las estructuras interpretadas por Persaud <i>et al.</i> (2003). Las líneas en color azul son las estructuras interpretadas por Aguilar-Campos (2007). Las líneas en color verde son las estructuras interpretadas por González-Escobar <i>et al.</i> (2010).	47
----	---	----

Lista de Tablas

Tabla	Página
I Principales parámetros de adquisición de los datos sísmicos . .	15
II Procesos aplicados al dato sísmico	16

Capítulo I

INTRODUCCIÓN

El golfo de California es parte de un sistema de *rift* transtensional dominado por un sistema de fallas transcurrentes, que junto con la falla de San Andrés conforman el límite de placas Pacífico-Norte América a lo largo del sistema San Andrés -Golfo de California.(Larson *et al.*, 1972). Dentro del sistema transtensional Golfo de California la deformación se distribuye en fallas de rumbo y fallas normales-oblicuas, que acomodan el movimiento, principalmente lateral derecho y la extensión continental que caracteriza el movimiento relativo entre las placas Pacífico y Norte América, N37°W (Atwater y Stock, 1998; Fenby y Gastil, 1991; Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007; Nagy y Stock, 1991).

La formación y evolución tectónica del Golfo de California se registra a partir del Mioceno Tardío (Martín-Barajas, 2000). Originalmente se atribuye a una secuencia de dos eventos: i) extensión ortogonal en el Mioceno medio al tardío y ii) el desarrollo del margen transtensivo entre las placas Pacífico y Norte América en el Plioceno (Stock y Hodges, 1989). El margen entre placas Pacífico-Norte América se consolidó como tal, al completar la transferencia de la microplaca de Baja California a la Placa Pacífico a los ~ 3.5 Ma con referencia a la edad de anomalías magnéticas y se estima que el desplazamiento relativo después de los 6.5 Ma, es de ~ 260 km (Oskin *et al.*, 2001).

Una controversia actual gira en torno a la edad de las primeras incursiones marinas en el Golfo de California. El modelo tradicional de dos fases propone que las condiciones marinas se establecen alrededor de los 6 Ma (Oskin y Stock, 2003). Sin embargo,

estudios recientes muestran sedimentos con edades relativas (fósiles) que datan del Mioceno medio (Carreño y Smith, 2007; Helenes *et al.*, 2009).

A lo largo del Golfo podemos encontrar importantes diferencias estructurales que permiten segmentarlo y distinguir claramente dominios estructurales. De norte a sur, experimentos de refracción han detectado variaciones en espesores de corteza, desde la depresión de Salton hacia el sur, el espesor de la corteza se adelgaza de 21 a 8 km en la boca del Golfo (Couch *et al.*, 1991). Estas variaciones también se hacen presentes de manera longitudinal al *rift* en las cuencas Delfín Superior y Tiburón, Gonzalez-Fernández *et al.* (2005) reportaron espesores de corteza de 14 y 17 km para la cuenca Delfín Superior y la cuenca Tiburón respectivamente. Por otra parte, anomalías magnéticas en la boca del golfo manifiestan la generación de piso oceánico (Lawver *et al.*, 1973; Sanchez-Zamora *et al.*, 1991; DeMets, 1995), contrastando con el norte donde se carece de ellas. Además, trabajos recientes muestran que las propiedades sísmicas para el Norte del Golfo no son típicas de una corteza oceánica, y se ha propuesto que se trata de una transición océano-continente (Persaud *et al.*, 2003).

En el norte del Golfo se han documentado varias cuencas tipo *rift* (Persaud *et al.*, 2003; Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007), que por sus características tectónicas se clasifican en activas e inactivas (González-Escobar *et al.*, 2006; Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007). El sistema activo está integrado por las cuencas Wagner, Consag y Delfín Superior e Inferior; Mientras que el sistema inactivo está compuesto por las cuencas Adair, Tepoca y Tiburón. La región que abarcan las cuencas activas está delimitada en sus extremos por dos grandes zonas de falla; al norte, la falla de Cerro Prieto, con una caída al oeste que constituye el límite occidental de la cuenca inactiva Altar y el límite de la cuenca activa Cerro Prieto (Pacheco *et al.*, 2006); al sur, la falla transformante Canal de Ballenas, la cual pierde expresión al norte de la cuenca Delfín

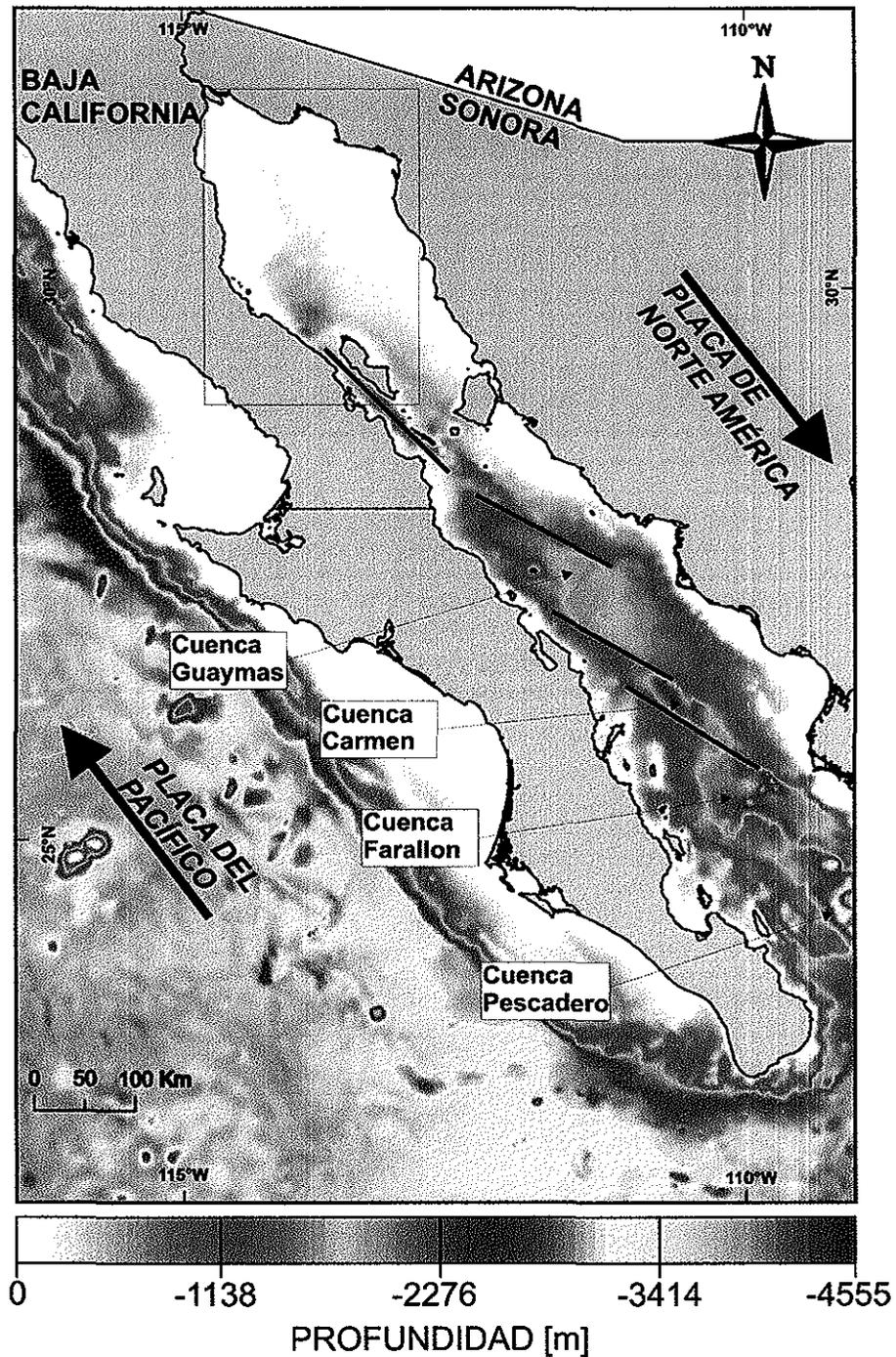


Figura 1. Mapa del Golfo de California. El recuadro rojo indica el área que se verá con mayor detalle en la figura 2. Las flechas en color negro indican el movimiento relativo entre las placas Pacífico y Norte América, N37°W (Atwater y Stock, 1998).

inferior, en donde se divide en varios segmentos que definen una estructura en cola de caballo (Persaud *et al.*, 2003). La principal zona de falla al norte del Canal de Ballenas se denomina falla Volcanes.

Las cuencas Wagner y Consag han sido descritas como un incipiente centro de dispersión (Henyey y Bischoff, 1973), aunque no se ha detectado evidencias de piso oceánico. Canet *et al.* (2010) reportaron que al costado este de Wagner y Consag existe una actividad intensa de emisión de gases y alto flujo geotérmico (posiblemente asociado con la formación de corteza oceánica), rasgos que en las cuencas Delfín Superior e inferior no se han observado. Por lo tanto, aun dentro del sistema de cuencas activas existen dos subsistemas, agrupados de la siguiente forma: 1) Wagner y Consag y 2) Delfín Superior e Inferior.

Las cuencas en el norte del Golfo han sido rellenas de sedimentos drenados de la cuenca del Río Colorado desde las montañas Rocallosas. Los sedimentos fueron conducidos hacia el suroeste, a través de la Meseta del Colorado en Estados Unidos, en donde se agregaron grandes volúmenes de sedimentos durante su erosión, que posteriormente fueron depositados en el norte del Golfo de California. Las altas tasas de acumulación hacen que los sedimentos sean rápidamente supultados, calentados y mezclados con intrusiones magmáticas en las cuencas profundas. Por esta razón, se ha propuesto la formación de una nueva corteza híbrida, producida por el reciclado de los sedimentos y las intrusiones magmáticas (Dorsey, 2010).

La estructura y geomorfología de las cuencas Consag y Delfín Superior es inferida principalmente por observaciones batimétricas (Figura 2). Anteriormente, (Henyey y Bischoff, 1973) a partir de batimetría y sísmica mono-canal somera delimitaron los principales rasgos estructurales en el norte del Golfo. Por lo tanto, un modelo batimétrico sirve como primera aproximación para definir bajo un contexto geométrico las cuen-

cas de interés para esta tesis. La cuenca Consag es una zona de deformación estrecha (González-Escobar *et al.*, 2010), en contraste con Delfín Superior que es una zona de deformación más ancha. Sin embargo, los rasgos batimétricos no exponen una clara geometría en términos de estructura a causa de los grandes espesores de sedimentos depositados por el Río Colorado. Por lo tanto, la caracterización del límite estructural entre las cuencas Consag y Delfín Superior serán el objetivo de esta tesis, para ayudar a comprender como se efectúa la transferencia de deformación de una zona ancha a una más estrecha dentro del *rift*.

Los métodos geofísicos han contribuido significativamente en el estudio de la estructura del subsuelo. Un perfil magnético (Figura 3) recolectado sobre lo que en batimetría aparece como la frontera estructural entre las cuencas Consag y Delfín Superior, muestra que la base del relleno sedimentario se eleva formando un alto que divide a dichas cuencas (Sanchez-Zamora *et al.*, 1991). Asimismo, Sanchez-Zamora *et al.* (1991) presentaron un mapa que indica la localización de algunos estudios de refracción hechos por Phillips (1964), que hacen referencia a la profundidad de la base del relleno sedimentario figura (4).

El procesado e interpretación de datos sísmicos, ha sido la fuente de información más importante para mejorar el conocimiento sobre la estructura del Golfo de California (Henyey y Bischoff, 1973; Pérez Cruz, 1982; Persaud *et al.*, 2003; Gonzalez-Fernández *et al.*, 2005; Aragón-Arreola y Martin-Barajas, 2007; Aguilar-Campos, 2007; Hernández-Pérez, 2008; Mar-Hernández, 2009; Vargas-Magaña, 2011; González-Escobar *et al.*, 2010). Básicamente existen cuatro tipos de sísmica recolectada sobre el norte del Golfo: i) sísmica monocanal de Henyey y Bischoff (1973) con penetración en los sedimentos de solo 0.40 segundos, ii) sísmica multicanal del proyecto ulloa99 analizada por Persaud *et al.* (2003) con un tiempo de registro máximo de 2.0 segundos y cuyo ob-

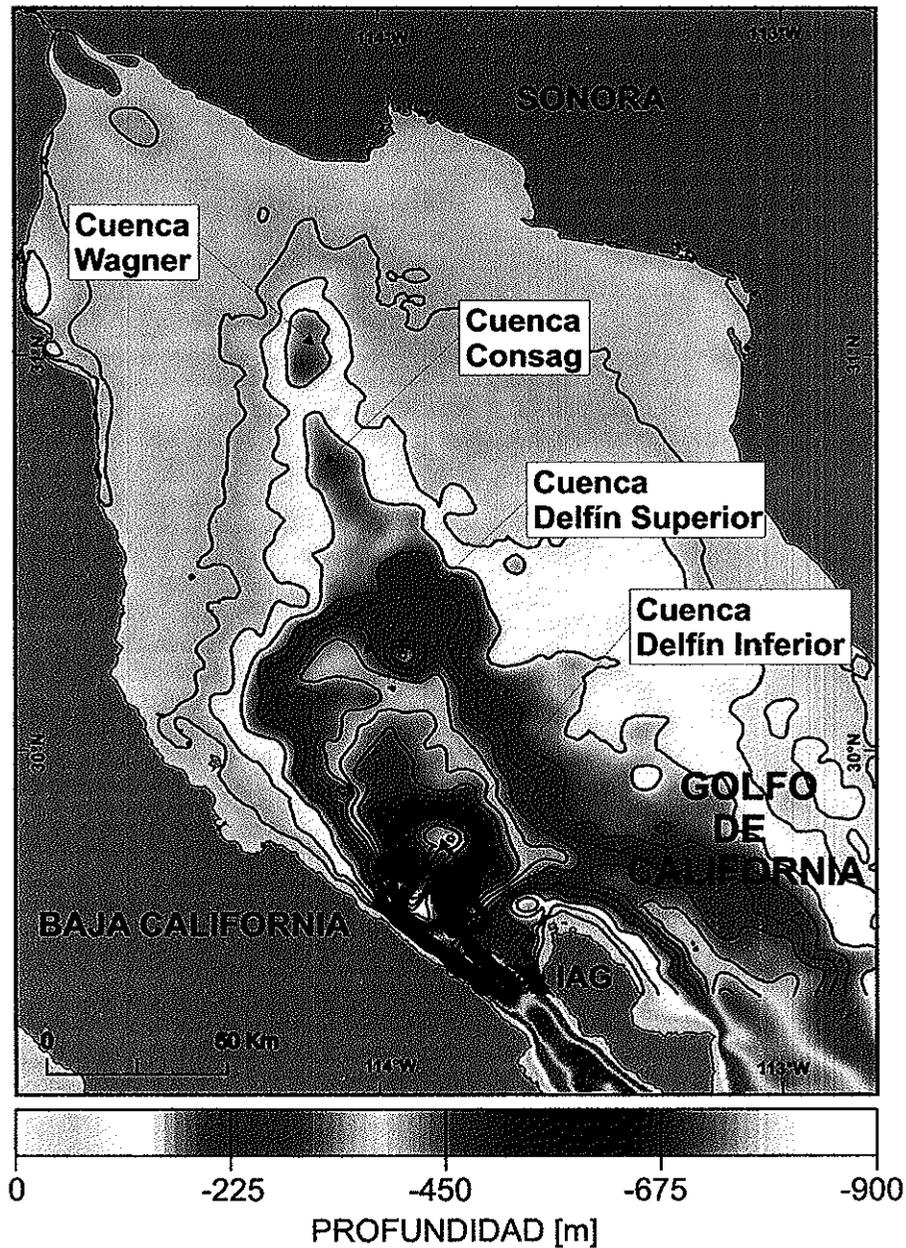


Figura 2. Batimetría del norte del Golfo de California. Hace énfasis principalmente en el sistema de cuencas activas, comprendido por la Cuenca Wagner, Consag, Delfín Superior e Inferior. La configuración de curvas de nivel es a cada 50 m. Los datos fueron obtenidos gratuitamente Global Multi-Resolution Topography Data Portal (<http://www.geomapapp.org>).

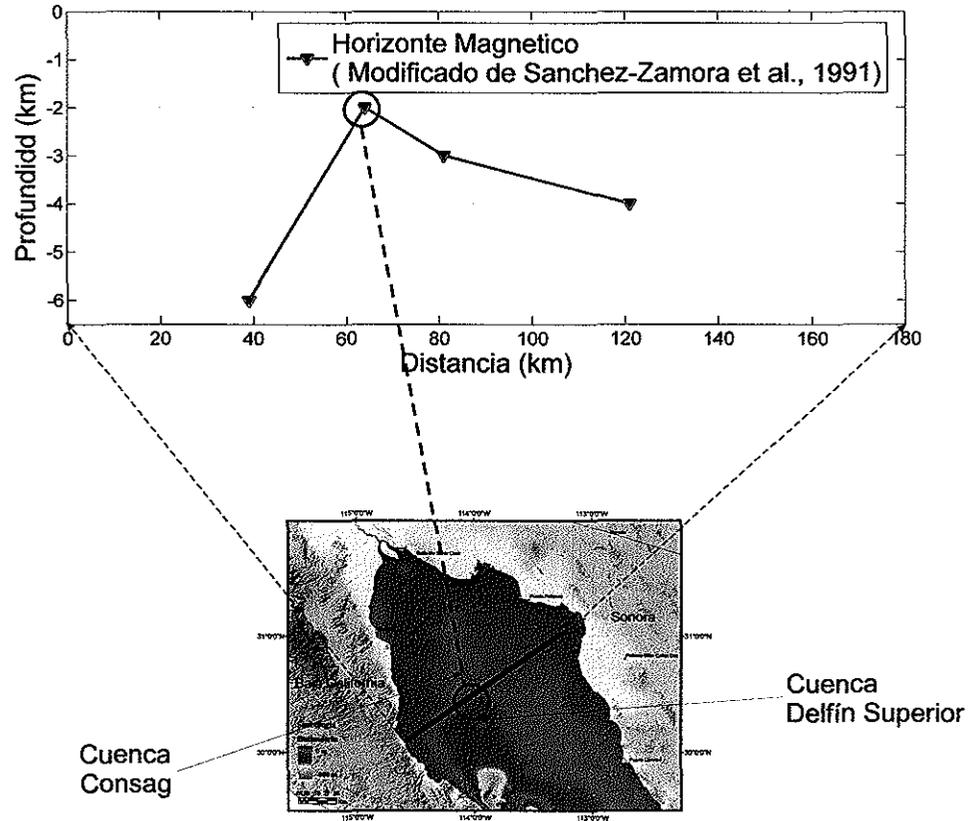


Figura 3. Perfil magnético que corta la Cuenca Consag y Delfin superior. La grafica en la parte superior muestra los resultados de la inversión del levantamiento. La línea en color azul de ésta grafica representa la trayectoria que sigue la base del relleno sedimentario a lo largo del perfil. Como se observa en la figura en la región central de la sección se observa un alto estructural, que es inferido al ver como el espesor del relleno sedimentario es menor que a los extremos. Modificado de Sanchez-Zamora et al. (1991).

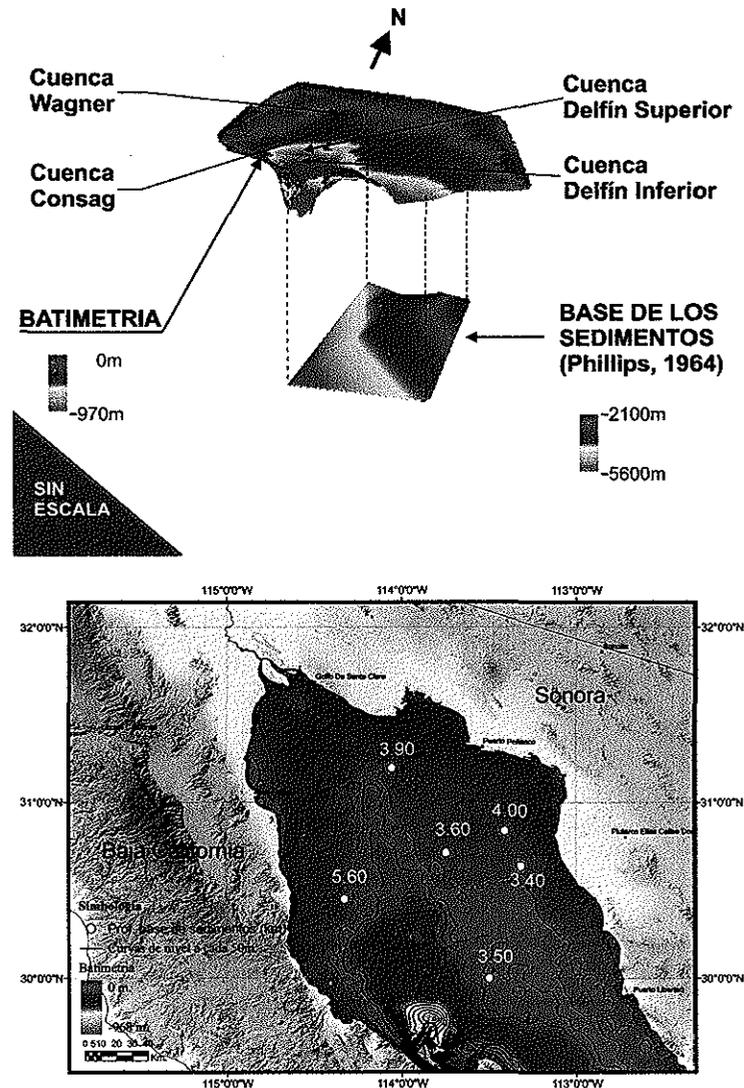


Figura 4. En el mapa se indica con puntos blancos las zonas donde se realizaron estudios de refracción, el número a un costado de estas ubicaciones es la profundidad a la base de los sedimentos expresada en kilómetros. En el modelo tridimensional que se encuentra en la parte superior se incluye una capa creada con la batimetría y otra con las profundidades de los sedimentos, que nos ayuda a visualizar que la tendencia estructural del basamento es caer al centro del Golfo de California. Sin embargo, se alcanza a observar que bajo la cuenca Consag existe un ligero alto estructural. Modificado de Sanchez-Zamora et al. (1991).

jetivo principal fue determinar las zonas de deformación activa, iii) sísmica multicanal de Petróleos Mexicanos (PEMEX) con tiempo de registro de 6.0 segundos y iv) un perfil sísmico de gran ángulo, procesada e interpretada por Gonzalez-Fernández *et al.* (2005), con un tiempo de registro de 9.0 segundos que aportó información de la estructura de la corteza.

Persaud *et al.* (2003) basada en los datos de Ulloa 99 lograron definir rasgos estructurales someros en las cuencas Consag y Delfin Superior; la cuenca Consag ha sido descrita como una depresión colmatada simétrica con fallamiento distribuido y una subsidencia en su parte central, aparentemente siendo una zona de acomodamiento (Persaud *et al.*, 2003); en la cuenca Delfín Superior se observaron importantes diferencias en la densidad de fallas con echados opuestos, que permitieron subdividirla en dos subcuencas: Delfín Superior Norte y Delfín Superior Sur, que para efecto de este trabajo ambas fueron tomadas como Delfín Superior. Persaud *et al.* (2003) concluye en base a sus observaciones, que en el norte del Golfo de California la deformación por cizalla lateral se concentra principalmente en el margen de la costa de la península y que la extensión se concentra principalmente en el centro del *rift*, en cuencas con fallamiento normal orientado NNE.

I.1 Sismicidad

En el régimen tectónico transtensivo del Golfo de California, la sismicidad define la zona activa en donde se acomoda el desplazamiento entre las placas Pacífico y Norte América (Allen y Allen, 2005). El mapa de la figura 5 muestra la actividad sísmica histórica para el norte del Golfo de California, donde los eventos registrados no sobrepasan de una magnitud mayor a 5 en escala de Richter. Esta actividad delinea tanto el límite de

placas Pacífico-Norte América, así como la localización y el desarrollo de las cuencas activas al norte del Golfo.

En las cuencas Wagner y Consag se observa como disminuye la ocurrencia de los sismos históricos, lo que posiblemente se debe a una relajación de los esfuerzos en esta zona. En contraste, en la frontera entre las cuencas Consag y Delfín Superior existe una gran actividad sísmica. Los sismos (epicentros) mapeados fueron obtenidos de la base de datos de la Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM), con registros en el catálogo 1985-2011. El promedio de la profundidad de los eventos sísmicos en el norte del Golfo de California es de 8.5 km y como máximas cercanas a los 40 km. Por lo tanto, este rango indica una aproximación de un límite geológico entre la deformación frágil y dúctil.

I.2 Justificación

En el CICESE¹ se cuenta con una copia de la base de datos de sísmica 2D multicanal constituida por los levantamientos de Ulloa 99-5 y PEMEX (1979-1984), que se muestran en las figuras 6(a) y 6(b). Estos trabajos tuvieron el objetivo de determinar zonas de deformación activa y detectar áreas de interés petrolero, respectivamente.

El dato sísmico del cruce Ulloa 99-5 tiene mayor resolución debido al rango de altas frecuencias de los instrumentos de registro (hidrófonos²), a diferencia de los datos de

¹Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada

²*Hidrofono: es un dispositivo diseñado para la detección de energía sísmica en forma de cambios de presión bajo el agua, durante la adquisición de datos marinos. Oilfield Glossary, Schulumberger*
<http://www.glossary.oilfield.slb.com>

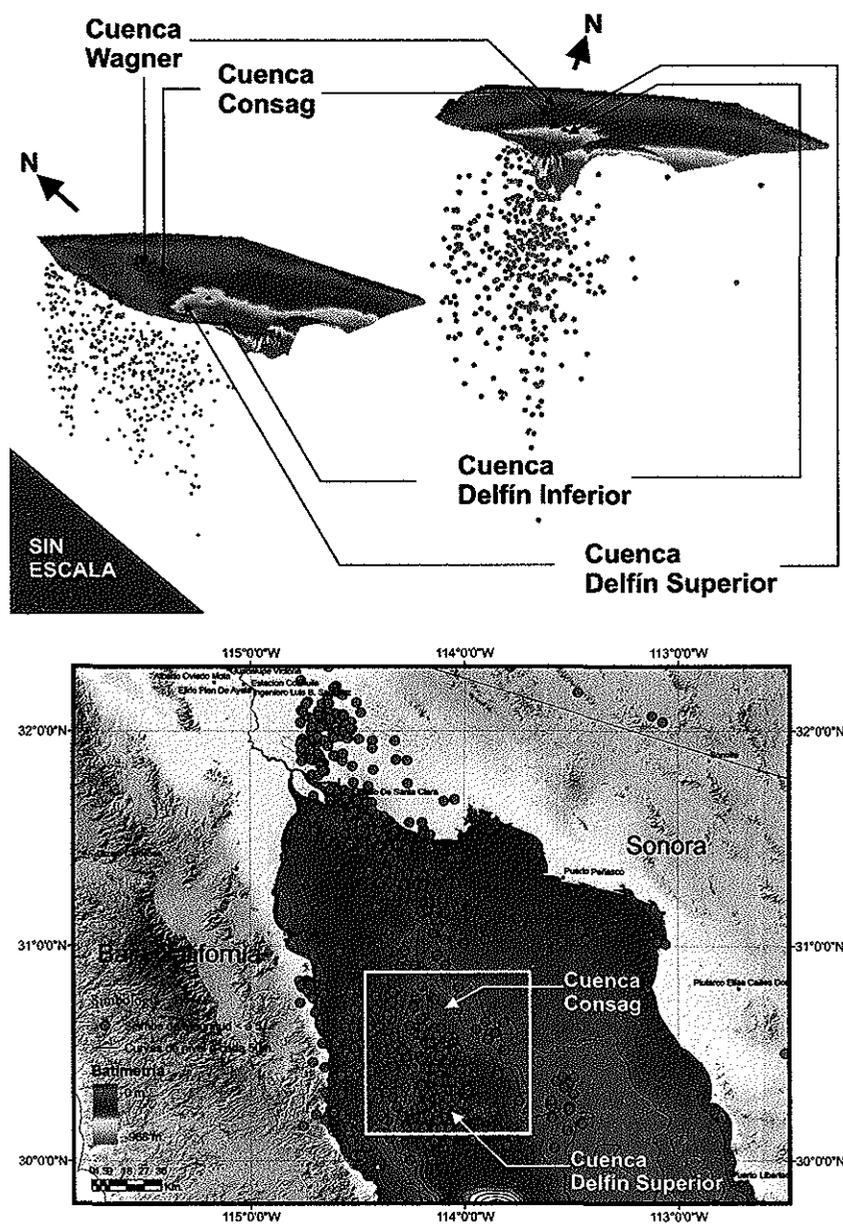


Figura 5. Sismicidad en el norte del Golfo de California. Proyectada en un bloque isométrico con dos orientaciones para una mejor visualización de la distribución de hipocentros. Esta proyección muestra que la sismicidad ocurre en zonas circundantes a las cuencas, sin embargo, no indica una tendencia clara de la orientación de las fallas. La información fue obtenida del catalogo de RESNOM (<http://resnom.cicese.mx>). El recuadro en color blanco corresponde a el área de estudio.

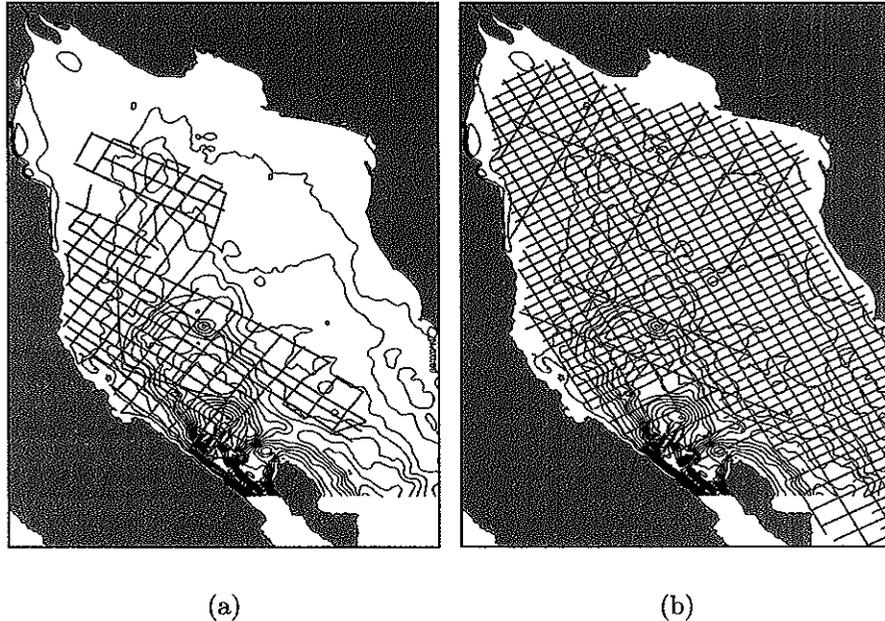


Figura 6. a) El mallado de datos recolectados en el proyecto Ulloa99. b) es la ubicación del conjunto de registros colectados por PEMEX (1979-1984).

PEMEX. La sísmica de Ulloa de alta resolución tiene un tiempo máximo de registro de 2 segundos, por lo tanto, solo permite ver estructuras relativamente someras (<1.5 km de profundidad). En contraste, el levantamiento sísmico de PEMEX tiene un tiempo de registro de 6 segundos, por lo que con esta información se pueden observar profundidades del subsuelo hasta de 8 km. Por éste motivo, el procesado e interpretación de las líneas sísmicas de PEMEX presenta una gran oportunidad para estudiar las estructuras geológicas profundas en el norte del Golfo de California.

Las características estructurales de la frontera entre las Cuencas Consag y Delfín Superior no son claras, en virtud de que no ha sido analizada con detalle, desde el punto de vista de sísmica de reflexión. Anteriormente a este trabajo de tesis, el área que abarca la zona de transición entre las cuencas Consag y Delfín Superior había sido estudiada solamente con solo una línea de PEMEX, y algunas líneas de Ulloa 99 enfocadas a la estructura somera. Por lo tanto, se desconoce los detalles de las estructuras profundas,

y es el principal objetivo de esta tesis.

I.3 Objetivos generales

Con el presente trabajo se tiene por objetivo definir la frontera estructural entre las cuencas Consag y Delfin Superior, así como interpretar patrones estructurales a partir del procesamiento e interpretación de líneas sísmicas propiedad de PEMEX. Este conocimiento de la estructura y edad del relleno sedimentario de las cuencas constituyen el mejor registro de eventos de deformación tectónica y de otros procesos geológicos, generando información para futuras investigaciones.

I.3.1 Objetivos específicos

- Aplicar una secuencia de procesamiento estándar a 700 km de sísmica de reflexión propiedad de PEMEX.
- Integrar las secciones sísmicas procesadas a la base de datos de CICESE.
- Interpretación conjunta de las secciones sísmicas para obtener patrones de fallamiento.
- Proponer un mapa estructural para la zona de transición entre las cuencas Consag y Delfin Superior, que explique el modelo de deformación en esa zona de *rift*.

Capítulo II

EL DATO SISMICO

En esta segunda sección se describe de forma general la metodología utilizada para procesar e interpretar datos de sísmica de reflexión multicanal, así como los materiales y equipos implicados en los procesos. La descripción está dividida en dos partes: i) características del dato, ii) secuencia estándar empleada en el procesado de la sísmica.

II.1 Parámetros de adquisición de los datos

En este estudio usamos líneas sísmicas multicanal de datos marinos propiedad de PEMEX recolectados entre 1979 y 1984. Sus principales parámetros de adquisición se mencionan en la tabla I.

II.2 Secuencia de Procesado

En sísmica de reflexión el procesado tiene como objetivo producir imágenes del subsuelo con la máxima fidelidad posible, atenuando distorsiones ópticas presentes en los datos. Se procesaron los datos en el Laboratorio de Exploración Sísmica del CICESE, usando el software ProMAX de Landmark en su versión 2003. Usamos una secuencia convencional (Yilmaz, 1987; Sheriff y Geldart, 1995; Gadallah y Fisher, 2005) que se muestra en la Tabla II y la experiencia adquirida en CICESE en los últimos años (Aguilar-Campos, 2007; Hernández-Pérez, 2008; Mar-Hernández, 2009; Vargas-Magaña, 2011; González-Escobar *et al.*, 2010).

Tabla I. Principales parámetros de adquisición de los datos sísmicos

Parametro de adquisición	Valor
<i>Numero de canales</i>	48
<i>Tiempo de registro</i>	6144 MS
<i>Intervalo de muestreo</i>	2 MS
<i>Filtro bajo</i>	8 Hz
<i>Filtro alias</i>	124 Hz
<i>Fuente de energia</i>	7 Airgun
<i>Detectores por traza</i>	32
<i>Distancia entre estaciones</i>	50 m
<i>Distancia entre P. T.</i>	25 m
<i>Patron de tiro</i>	0-270-2350

II.2.1 Edición de trazas y asignación de la geometría

La edición de trazas¹ tiene el objetivo de poder detectar anomalías contenidas en los registros, que posteriormente son removidas (*kill trace*). Estas anomalías probablemente se deben a causas de algún defecto en el instrumento receptor, una mala conexión, etc. Tras realizar esta el matado de trazas se aplica un recorte al ruido² ubicado sobre

¹Una traza sísmica representa la respuesta de una onda elástica a los contrastes de velocidad y densidad, a través de las interfaces de las capas de rocas y sedimentos, y como la energía viaja desde la fuente a través del subsuelo hasta el arreglo de receptores.

²Ruido: Toda aquella energía sísmica no deseada, como las múltiples, los efectos de oleaje, embarcaciones, actividad humana, etc. Para atenuarlo se utilizan arreglos de múltiples receptores durante la adquisición. Posteriormente se filtrara la señal y se apilaran los registros. Oilfield Glossary, Schlumberger <http://www.glossary.oilfield.slb.com>

Tabla II. Procesos aplicados al dato sísmico

PROCESO	OBJETIVO
Edición de trazas <i>Kill trace; top mute; Renombrar cabeceras</i>	<i>Eliminar trazas defectuosas; Eliminar ruido sobre la columna de agua; Etiquetar aquellos datos que sean necesarios</i>
Filtrado <i>Pasa-bandas; F-K</i>	<i>Atenuación de ruido y selección de frecuencias de interés; Atenuar ruido coherente</i>
Corrección por divergencia esférica	<i>recuperar la amplitud</i>
Ganancia (AGC)	<i>recuperar la amplitud</i>
Deconvolución	<i>Eliminar el efecto de la fuente</i>
Análisis de velocidad	<i>Determinar velocidades para la corrección por NMO</i>
Corrección por NMO	<i>Simular offset cero</i>
Stack	<i>Formar una traza única</i>
Filtro variable en tiempo	<i>Filtrar por intervalos de tiempo</i>
Migración	<i>Colapsar difracciones y localizar los reflectores en su sitio correcto</i>

la columna de agua (*top mute*) y finalizamos esta etapa con el renombrado de los identificadores. El renombrado da orden en el proceso y evita confusión al asignar la geometría cada traza obtenga su coordenada XY correspondiente. En la figura 7 se observa la diferencia entre un grupo de 48 trazas previas a la edición y posterior a la misma.

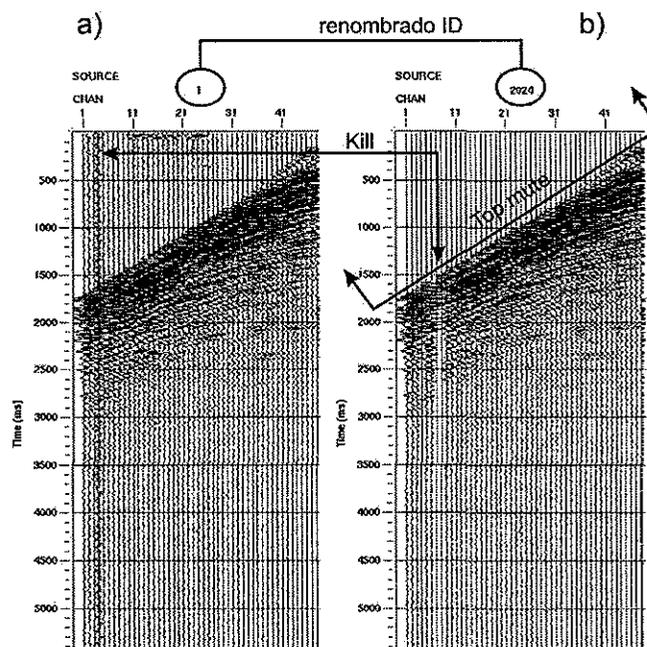


Figura 7. a) Es un conjunto de trazas ordenadas por fuente en común sin edición alguna. b) la edición del mismo grupo de trazas (matado de trazas, top mute, renombrado de etiquetas y asignación de la geometría).

II.2.2 Filtros (Señal vs. Ruido)

Nuestro conjunto de datos incluyen algunas regiones donde las reflexiones son de gran calidad y otras de muy mala calidad, siendo normalmente las cuencas sedimentarias los puntos con mejor reflectividad. En caso contrario, donde las reflexiones no son tan marcadas, la atenuación de ruido se vuelve un factor importante en la calidad de la

imagen a producir.

Un registro sísmico es la suma de señal y ruido; donde el término señal es usado para denotar cualquier evento del cual se desea obtener información, considerando todo lo demás como ruido (Sheriff y Geldart, 1995). Normalmente el ruido es generado por efectos de viento, oleaje y de la misma fuente (Campbell *et al.*, 2010), generalmente controlado por altas frecuencias. Por lo tanto, un simple filtro pasa-bandas aplicado en un estado *prestack* ayuda a reducir sus efectos en buena medida. Usamos la transformada de Fourier como herramienta intercaladora de dominios, para realizar un análisis espectral (Figura 8) y determinar una banda frecuencias con amplitudes dominantes. También fue aplicado un filtro *f-k* (frecuencia-numero de onda) para eventos coherentes, en este caso para atenuar la onda directa y el *aliasing*.

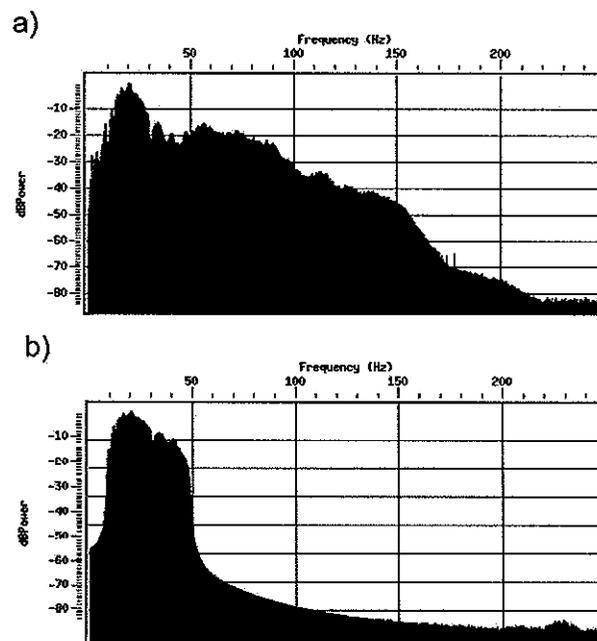


Figura 8. Espectros de amplitud de un conjunto de trazas ordenadas por misma fuente en común. a) Contiene todo el rango de frecuencias del registro (8-124 Hz), y b) es el mismo dato, con un filtro pasa-bandas aplicado con una ventana de 8-12-40-50 Hz.

II.2.3 Corrección por divergencia esférica y ganancia

En sismica de reflexión se supone una tierra conformada por capas homogéneas, sin embargo, existe un decaimiento en la amplitud generada por la atenuación inelástica de las rocas, producida tras el viaje fuente-receptor del frente de ondas, este fenómeno recibe el nombre de Divergencia Esférica. Por lo tanto, después de un filtrado es necesario realizar una corrección por este efecto, el cual se logra tratando de mantener la expresión $A_1 t_1 = A_2 t_2$, donde A_1 es la amplitud para el tiempo t_1 y A_2 la amplitud correspondiente al tiempo t_2 (Gadallah y Fisher, 2005).

Esta compensación no logra recuperar todas las amplitudes, por lo tanto se aplica un escalamiento, frecuentemente llamado en la literatura como Control Automático de Ganancia (AGC por sus siglas en ingles, Figura 9). La metodología consiste en multiplicar la señal registrada por una función de ganancia de carácter exponencial, que simula el decaimiento de la amplitud en la señal (Gadallah y Fisher, 2005).

La relación del dato de entrada $A_i(t)$ y de salida $A_o(t)$ se encuentra dada por:

$$A_o(t) = A_i(t)G(t)$$

donde

$$G(t) = 10^{at}$$

y a es una constante expresada en dB/seg .

II.2.4 Deconvolución

Como sabemos, la señal del dato sísmico es considerada una convolucion de la señal de la fuente con los instrumentos y la respuesta de la tierra. La respuesta de la tierra contiene algunos efectos como las reverberaciones, atenuación, fantasmas, etc. Por lo

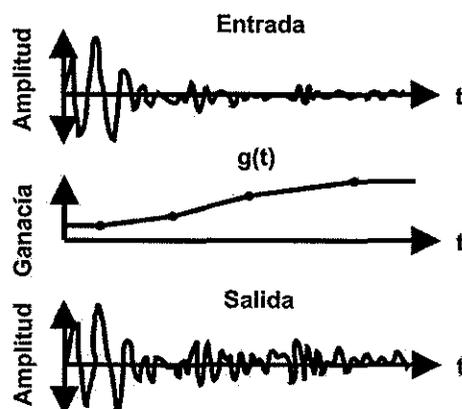


Figura 9. **Ganancia automática es un método empírico, donde la ganancia es un simple número por el cual las amplitudes de entradas se multiplican. Posterior a este proceso, las trazas adquieren una mejor apariencia visual en lo vertical. Por lo tanto, será más sencillo identificar estructuras a profundidad. Modificada de Gadallah y Fisher (2005).**

tanto, una deconvolución pre-apilado fue aplicada con la finalidad de proveer mayor resolución temporal al comprimir la señal y remover estos efectos.

II.2.5 Análisis de velocidad, corrección por NMO y stack

Los pasos anteriormente descritos fueron aplicados sobre un grupo de trazas ordenadas por una misma fuente en común, cuya finalidad fue mejorar individualmente la calidad de cada registro. Los tiros ordenados por fuentes fueron reordenados en conjuntos con un punto medio común (*Common MidPoint, CMP*). Para obtener el CMP se agrupan las trazas, que por geometría teóricamente tienen un mismo punto común en profundidad (*Common Deep Point, CDP*, Figura 10). Sin embargo, las reflexiones contenidas tienen un desfase en función de la distancia fuente-receptor (*offset*). Este incremento en tiempo es descrito por una hipérbola. Ya bajo un dominio de CDP's se hizo un análisis de semblanza (Yilmaz, 1987), complementado con apilados(*stacks*) de veloci-

dad constante (Figura 11). El determinar un buen modelo de velocidades (Figura 12) es el punto fundamental del procesado, ya que es la base para una corrección apropiada por *normal moveout* (NMO) y una migración adecuada. La corrección por NMO emplea el modelo de velocidades para simular reflexiones con *offset* cero, para que éstas finalmente pudieran ser sumadas en un *stack* y mejorar la relación señal/ruido (Figura 13).

II.2.6 Migración

En sismica de reflexión la migración es usada tradicionalmente como el último paso dentro de un flujo de trabajo, siendo ésta el proceso más importante sobre el dato ya apilado. Tiene la finalidad de colapsar energía de puntos difractores y relocalizar el echado de los reflectores en su posición correcta. Pese a la gran variedad de tipos de migrado que han aparecido actualmente, nosotros optamos por la migración de Kirchoff en tiempo, caracterizada por su uso en estructuras complejas. Su aplicación requirió de un modelo de velocidades y el ajuste del mismo hasta producir una buena imagen. Cabe mencionar que este modelo de velocidades manipulado solo se utiliza para este proceso y no interfiere con el apilado previo del dato.

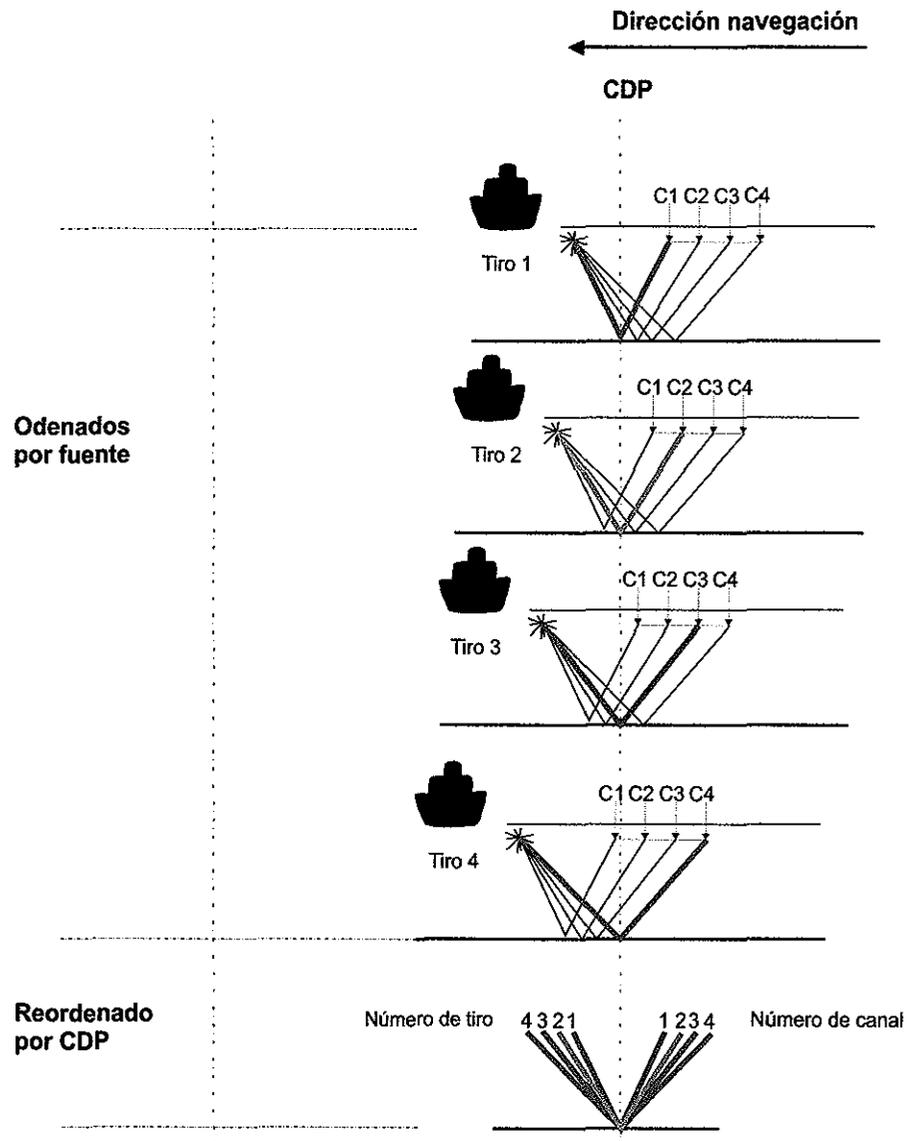


Figura 10. Geometría de un mismo punto en común (CMP). Ilustra la lógica del levantamiento sísmico marino en el método CMP. En la etapa de procesado se sortearon las trazas dejando grupos de tiros que comparten un mismo punto en común.

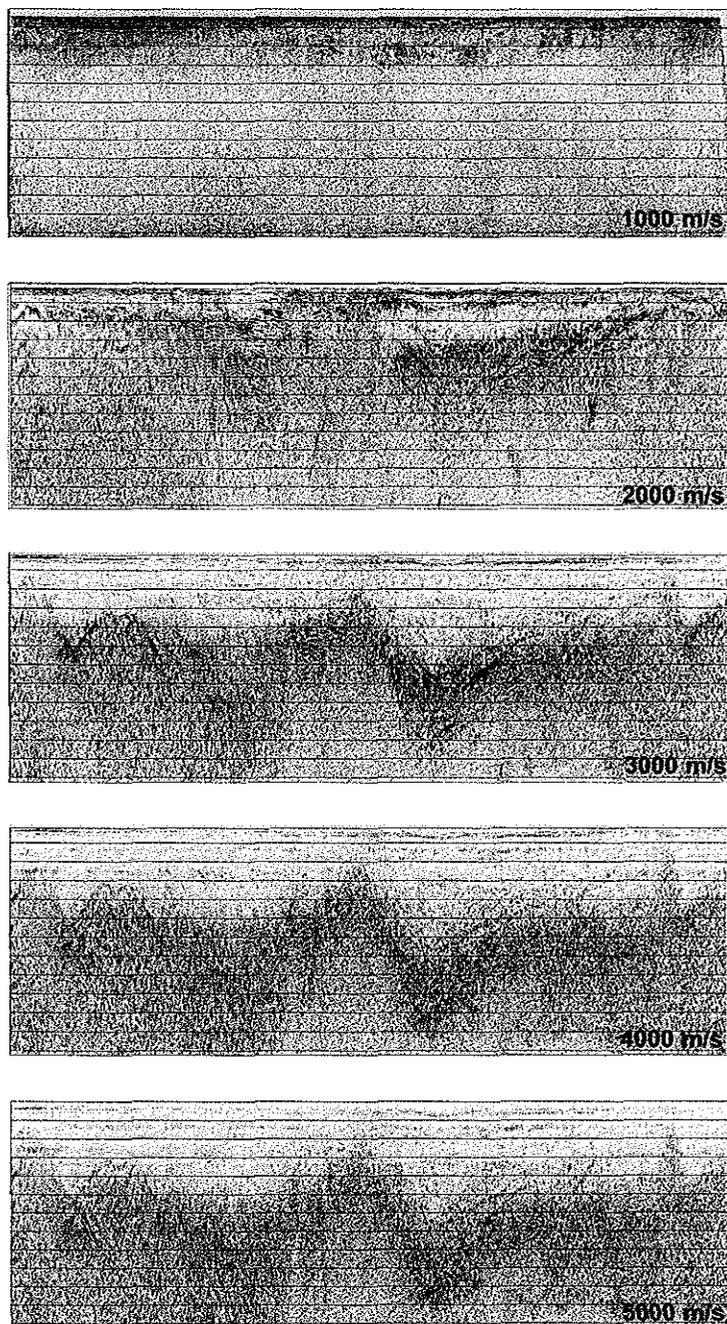


Figura 11. Apilados (stacks) de velocidad constante (CVS) para la línea 5045. Esta secuencia muestra como un reflector corregido por NMO con una velocidad ideal ó muy cercana a ella, logra ser apilado y expresado con mayor fuerza.

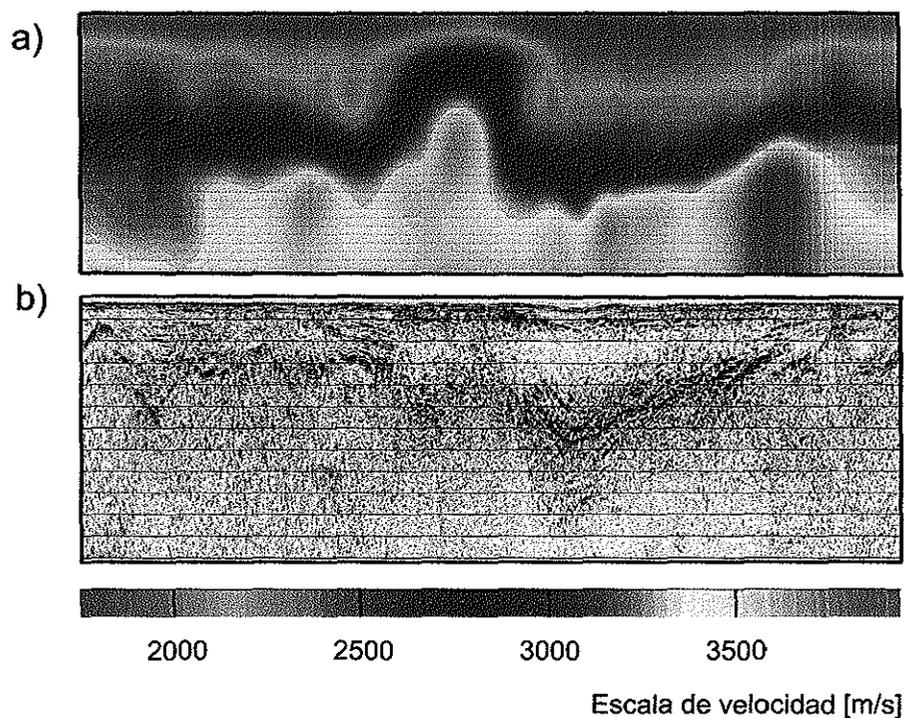


Figura 12. Modelo de velocidades de la línea 5045. a) muestra el modelo de velocidad para la línea 5045. b) el stack de la sección 5045 ya corregida por NMO.

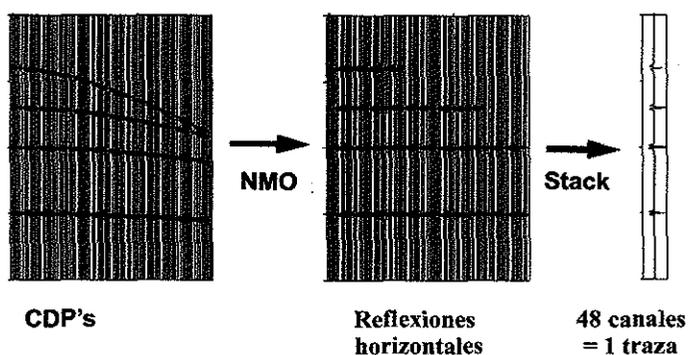


Figura 13. Esquema que ayuda a comprender como al aplicar la corrección por NMO los reflectores se colocan horizontal. Posterior a aplicar esta corrección apilamos las trazas para formar una única.

Capítulo III

RESULTADOS

Más de 700 km de sísmicas multicanal 2D fueron procesados e interpretados. Además, se incluyeron en la interpretación las líneas 5044, 5048, 5056, 5060, 5064, 5039, 5049, 5057, 5059, 5067, 5077 y 5081, que cruzan la zona de interés (Figura 14). Tras la descripción de los procesos aplicados e implicados en el procesado de datos sísmicos en el capítulo II, continuaremos con la descripción de los resultados de la interpretación.

III.1 Interpretación de las secciones sísmicas

La interpretación sísmica tiene como objetivo tratar de explicar en términos geológicos los contrastes en las reflexiones observadas. Como resultado final se construye un modelo geológico, verosímil y compatible con el dato. Actualmente aún y con los avances tecnológicos, la interpretación es un oficio de criterio basado en la experiencia. Se debe a que cada sección es diferente una de la otra, por lo tanto se carece de una metodología sistemática. Sin embargo, características como tiempo de arribo, amplitud, continuidad de los reflectores y carácter, entre otras consideraciones ayudaran a definir los principales reflectores sísmicos que permiten interpretar los rasgos estructurales. La interpretación individual de las líneas tuvo por objetivo la localización de las fallas principales y el basamento acústico, así como todo rasgo estructural de interés.

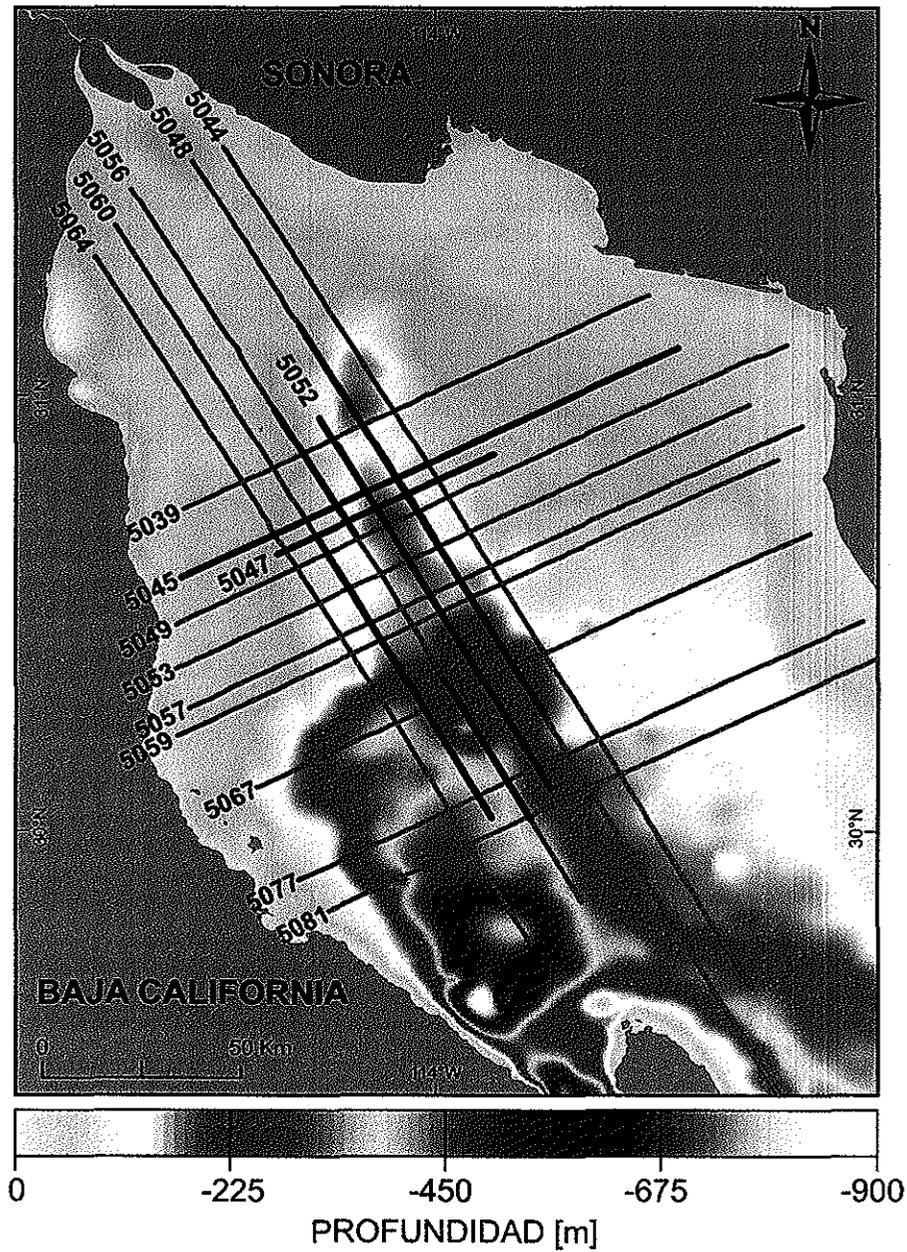


Figura 14. Conjunto de líneas sísmicas empleadas en la interpretación. Las líneas en color negro representan las secciones sísmicas procesadas en esta tesis. Las líneas en color guinda pertenecen a las secciones sísmicas tomadas de la base de datos de CICESE.

III.1.1 Descripción línea 5045

En la sección 5045 (Figura 15) se observan fallas normales subverticales ($\approx 45^\circ$) que dominan la deformación de la secuencia estratigráfica. El límite este de la cuenca Consag se observada al centro de la sección sísmica. Este límite parece fungir como parteaguas estructural que subdivide en dos zonas diferenciadas por la densidad de fallamiento, siendo el más denso la región occidental. En éste parteaguas estructural se puede observar una anomalía en la amplitud de los reflectores que le sobreyacen, que genera una apariencia de una discontinuidad lateral. En la base del relleno sedimentario de la cuenca Consag se observó un cuerpo de alta velocidad, posiblemente asociado con un basamento acústico, el cual no se había reportado anteriormente en esta zona.

III.1.2 Descripción línea 5047

La línea 5047 corta transversalmente la región central en la cuenca Consag (Figura 16). Fallas normales subverticales expresan una deformación activa concentrada en los límites de cuenca. La densidad aproximada es de 1 falla por cada kilómetro, con una longitud en profundidad que varía desde 2000 a 3000 ms. En el costado oriental del depocentro de la cuenca, rumbo a Sonora, encontramos una anomalía de amplitud en las reflexiones, que genera un rápido decaimiento en la señal y solo permite observar como máximo 1000 ms. El paquete sedimentario ubicado al centro de la cuenca esta poco fallado, cuenta con un espesor mayor a los 4 segundos y sobreyace a un reflector profundo que es una estructura de interés, posiblemente basamento acústico reportado por primera vez en esta zona. La forma geométrica de esta estructura es semejante a una posible intrusión.

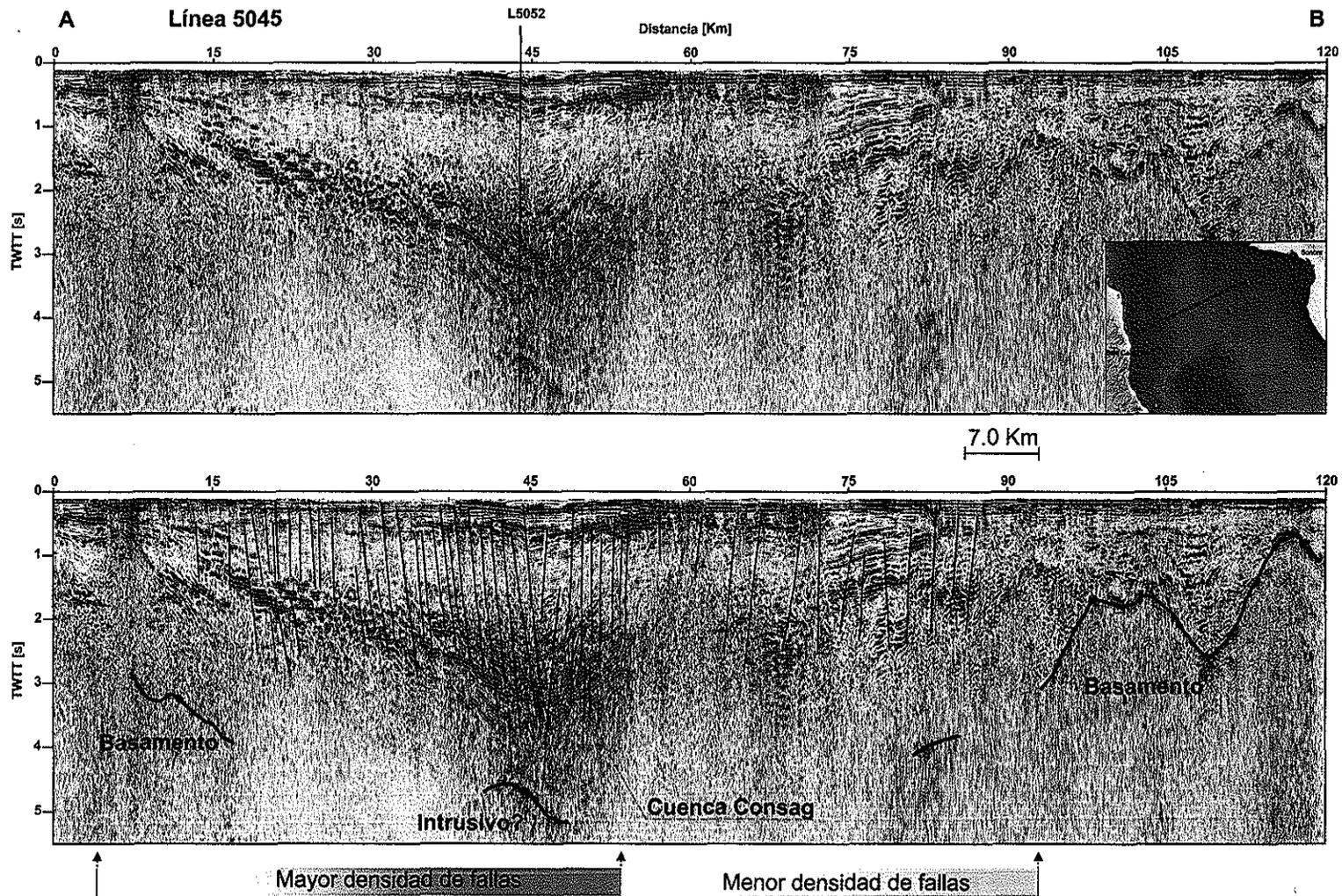


Figura 15. Sección 5045. En esta figura podemos observar la línea sísmica sin interpretar e interpretada. Cortó de costa a costa transversalmente el norte del Golfo de California.

III.1.3 Descripción línea 5049

La línea 5049 (Figura 17) orientada ENE a través del norte del Golfo y de la cuenca Consag. El panorama estructural es similar a las líneas con la misma orientación anteriormente descritas. La base del relleno sedimentario en Consag se ubica a más de 4 km sobre un reflector difuso, el cual parece ser el cuerpo de alta velocidad, también identificado en las líneas 5045 y 5047.

III.1.4 Descripción línea 5052

La ubicación de la línea 5052 (Figura 18) es de gran interés, ya que atraviesa longitudinalmente el centro de la cuenca Consag y el extremo este de la cuenca Delfín Superior. En la sección sísmica se puede observar que las fallas son subparalelas y subverticales ($\pm 45^\circ$). Las cuencas tienen una profundidad mínima de 3000 ms. Podemos observar que la cuenca Delfín Superior está segmentada por un alto estructural de 10-15 Km de ancho que segmenta y subdivide la cuenca en norte y sur.

El cuerpo de alta velocidad ubicado en la base del relleno sedimentario de la cuenca Consag (Figura 16), descrito en las líneas 5045, 5047 y 5049, es nuevamente observado entre 4000 y 4500 ms. En esta sección la frontera entre Consag y Delfín Superior es una zona amplia de más de 20 Km de ancho. Las fallas normales concentran la deformación actual en los límites de las cuencas, ya que solamente en estas regiones las fallas llegan hasta la superficie. Dentro de esta frontera encontramos un decaimiento en la amplitud de los estratos medios, posiblemente debido a la presencia de gas disperso en toda la estructura, que posiblemente migró desde las cuencas.

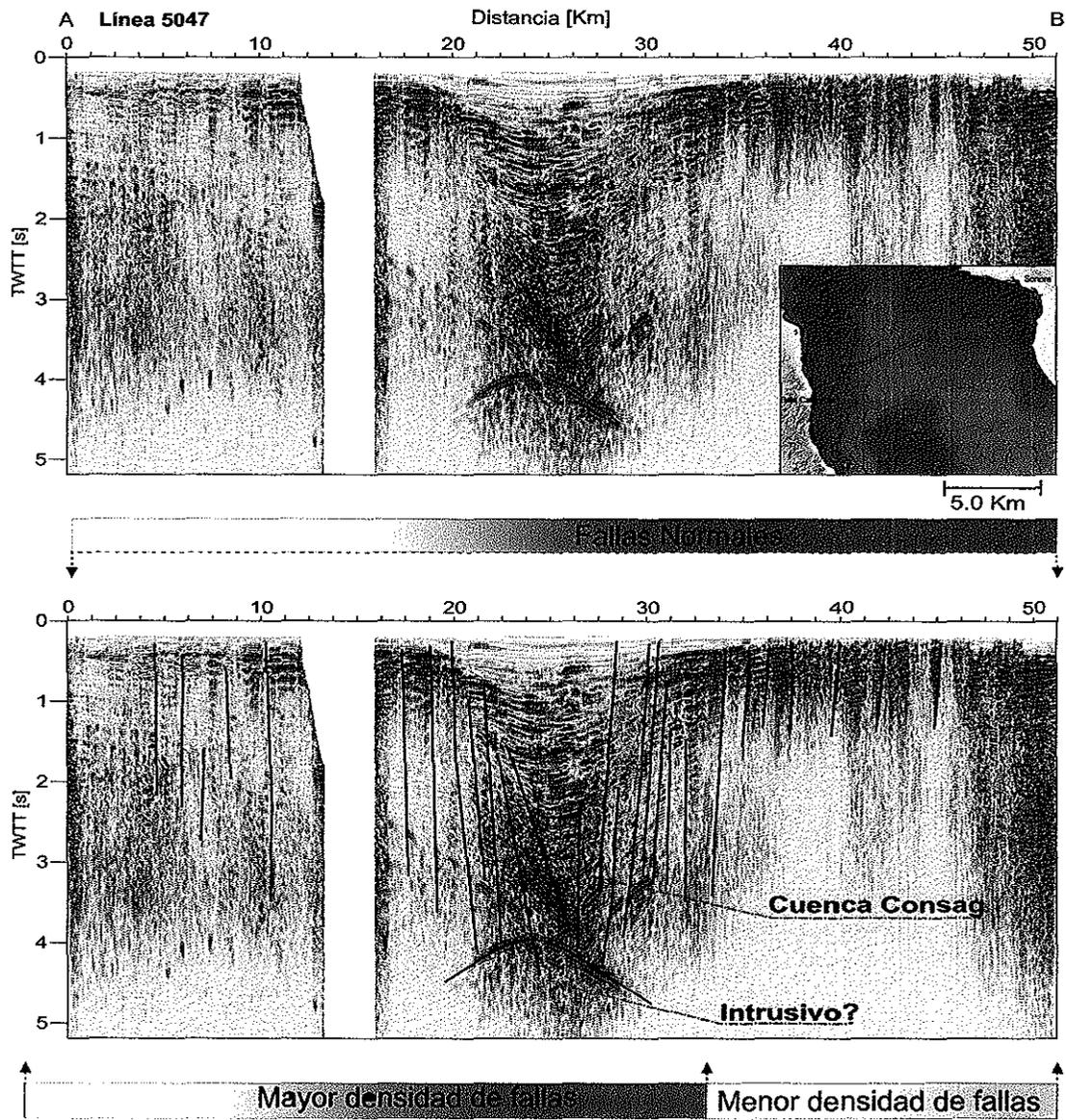


Figura 16. Sección 5047. se presenta la imagen sin interpretar e interpretada.

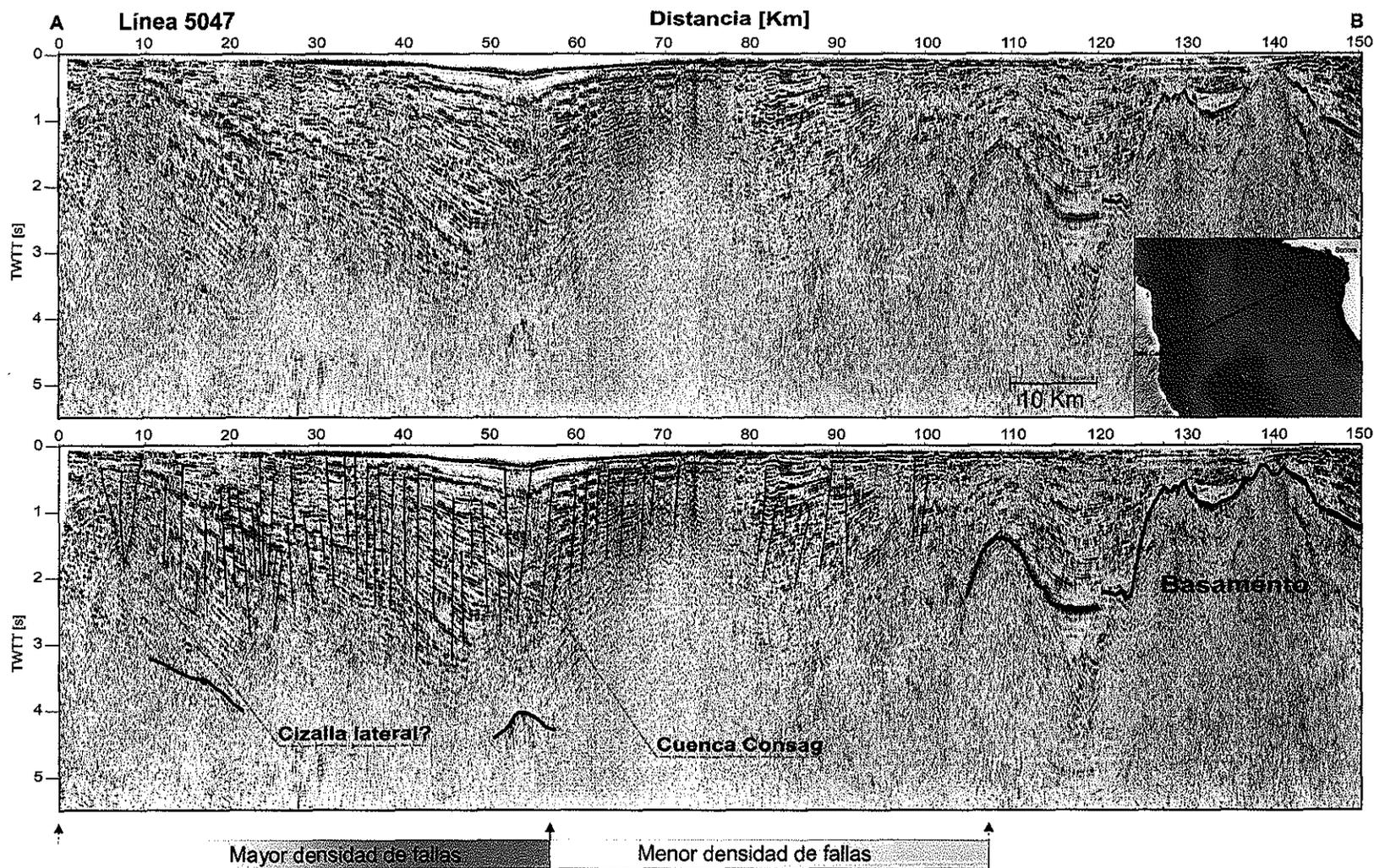


Figura 17. Sección 5049 cortó transversalmente el Golfo. Se puede observar la base del relleno sedimentario en Consag se desplanta alrededor de 3.5 km sobre un difuso reflector, el cual parece ser el cuerpo de alta velocidad. El recuadro rojo indica un acercamiento del área marcada sobre la sección interpretada.

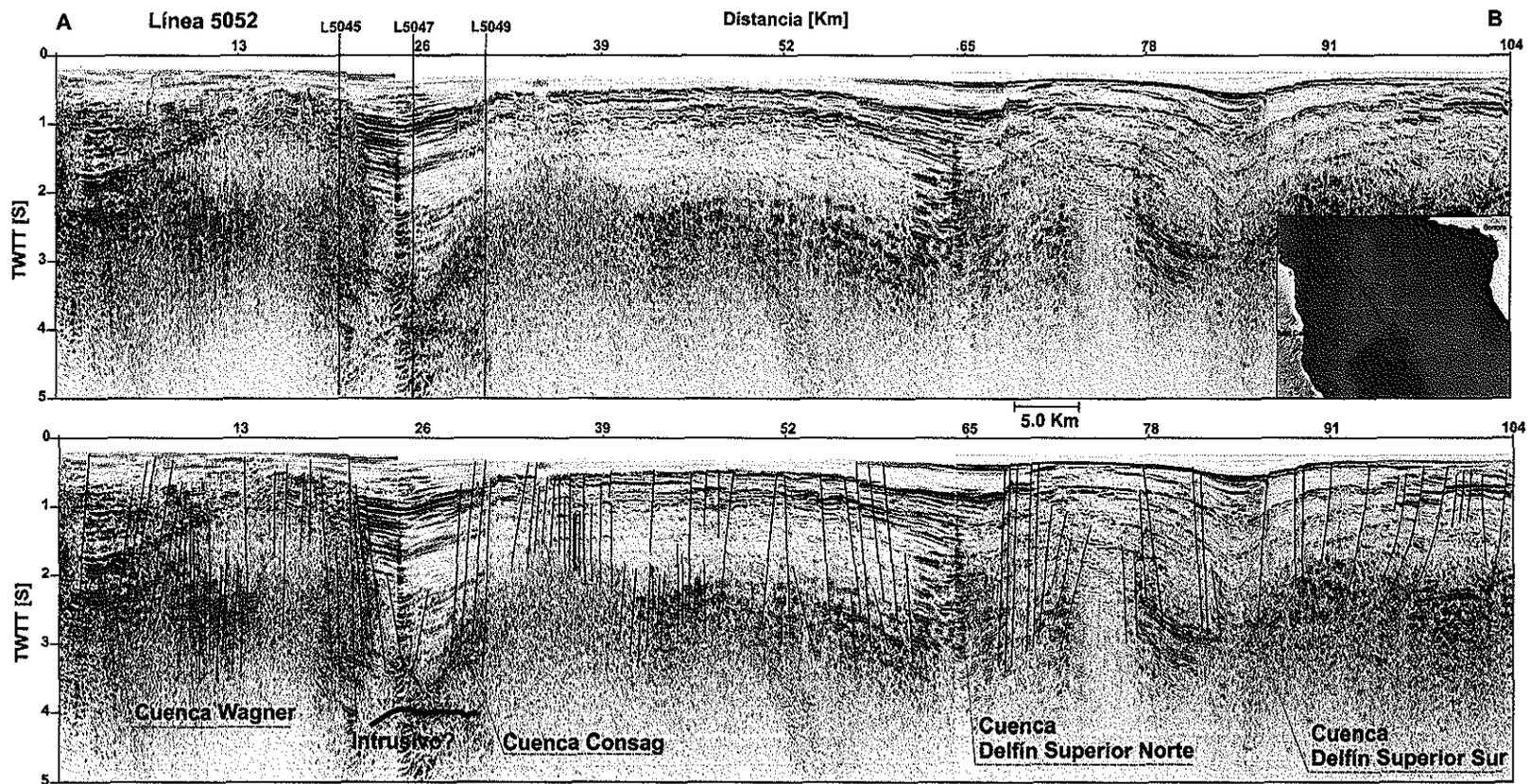


Figura 18. Sección 5052. esta imagen podemos observar la línea 5052 sin interpretar e interpretada.

III.2 Basamento

Se configuró el basamento acústico en las líneas sísmicas (Figura 19). El basamento es dividido por sus características y ubicación en: i) basamento de la costa de Baja California, el cual se caracteriza por una reflexión difusa de su cima, con geometría análoga a una rampa; ii) el basamento de la costa de Sonora, está compuesto de una geometría de altos y bajos estructurales, con una reflexión muy clara de su cima, posiblemente debida a un fuerte contraste en la interface basamento-sedimento.

III.3 Correlación

El resumen de las estructuras interpretadas en este trabajo y las líneas sísmicas de PEMEX usadas en la correlación se muestran en la figura 20. La descripción de las estructuras interpretadas fueron agrupadas en dos secciones, usando como criterio incluir en un grupo aquellos que pertenecen a una misma cuenca, ó bien, la cuenca más cercana de la estructura.

III.3.1 Cuenca Consag

La figura 21 resume las principales características estructurales dentro de la cuenca Consag. Se configuraron tres horizontes sísmicos: i) el fondo marino, ii) la base del relleno sedimentario y iii) la cima del basamento acústico. La configuración del horizonte que representa al fondo marino, comienza a expresarse a partir de un tiempo de 0.14 segundos de tiempo doble y alcanza un tiempo máximo de 0.37 segundos de tiempo doble. El motivo principal por el que se realizó la correlación de este horizonte es para tener referencia de la cima del paquete sedimentario. El horizonte dos es la base

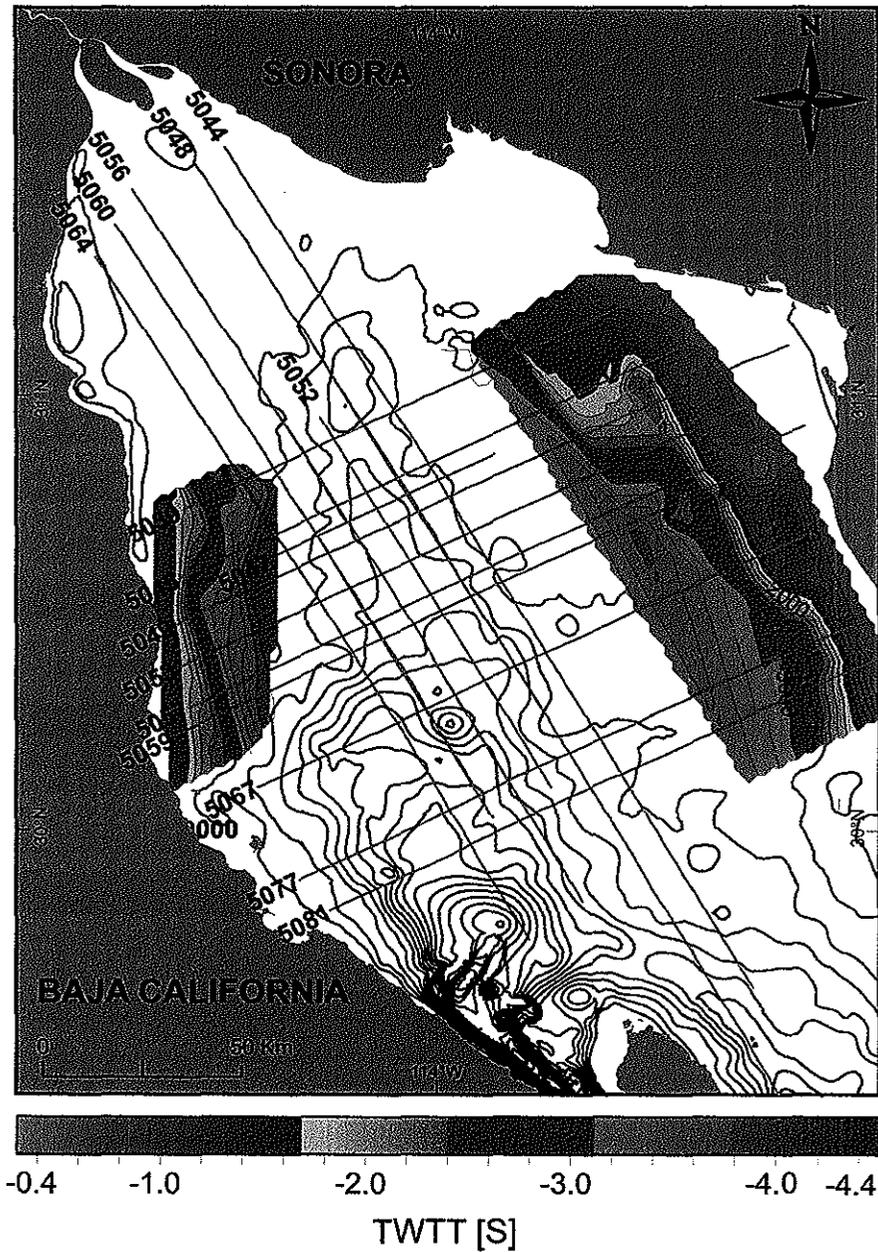


Figura 19. Configuración final para el basamento acústico continental en el área de estudio. La escala de colores indica el tiempo doble al que se encontró el basamento acústico en las secciones analizadas para este trabajo. La notoria caída del basamento que se prolonga de la costa de Sonora posiblemente sea el trazo de la falla Amado. SF = San Felipe; PP = Puerto Peñasco; PL = Puerto Lobos.

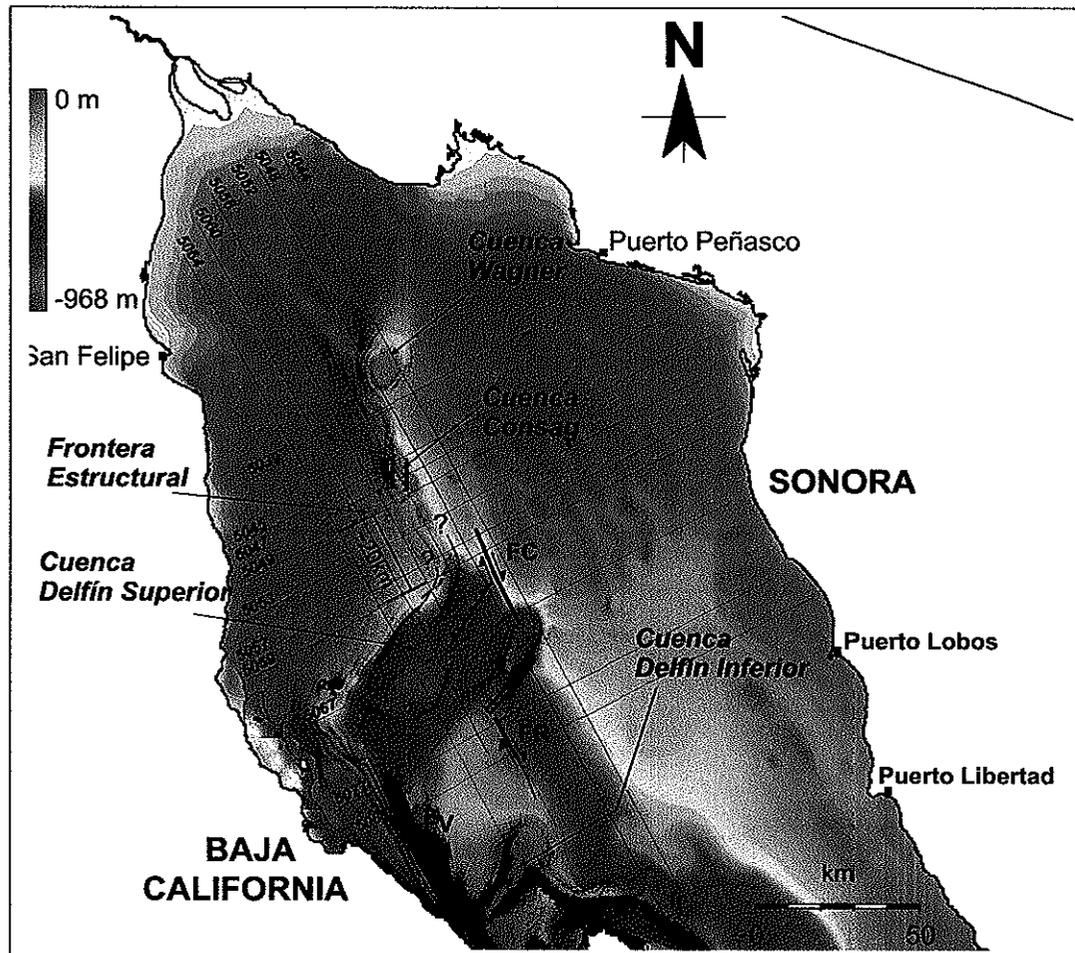
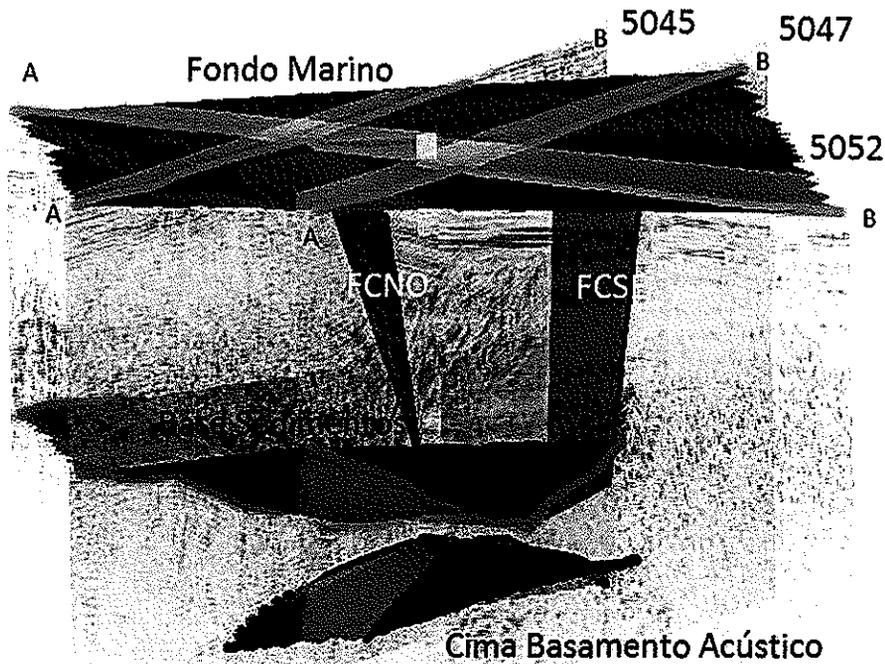


Figura 20. Interpretación estructural de la zona de transición entre las cuencas Consag y Delfín Superior. Las líneas en color negro simple indican el trazo de las fallas que acomodan la extensión. Las líneas negras gruesas, son las fallas Refugio (FR), Volcanes (FV) y Cortés (FC), que acomodan principalmente desplazamiento lateral.

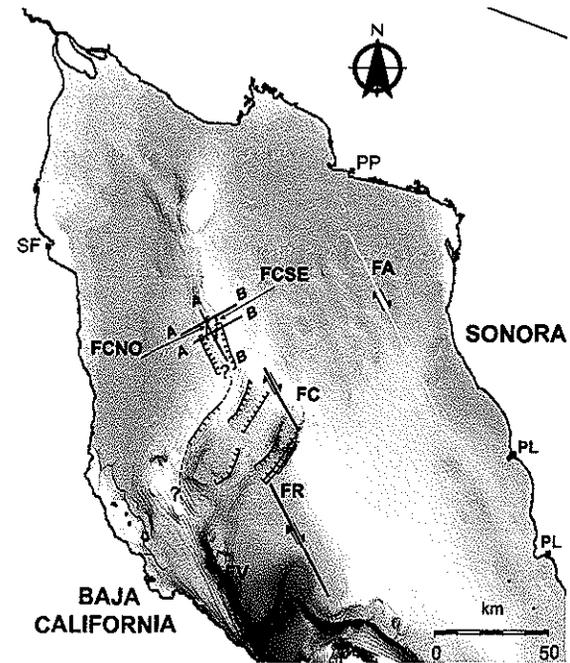
del relleno sedimentario, que varía entre un tiempo de 2.60 y 3.96 segundos de tiempo doble. Este horizonte disminuye su profundidad a medida que se aleja de la cuenca. Como tercer horizonte se configuro el basamento acústico (cuerpo de alta velocidad) que se encuentra entre 3.97 a 5.14 segundos de tiempo doble. La parte más somera de este reflector se encuentra bajo la cuenca Consag. Principalmente dos fallas normales controlan la subsidencia en la cuenca Consag: la falla Consag Noroeste (Figuras 22 y 23) con un echado promedio de 64° que cae hacia el SE y la falla Consag Sureste (Figuras 22 y 23) con un echado promedio de 69° que cae hacia el NO, ambas fallas tienen una orientación NNE. Su longitud en planta es de 8 y 10 km, para la falla Consag Noroeste y la falla Consag Sureste respectivamente, con una longitud en profundidad aproximada de 3.64 km.

III.3.2 Cuenca Delfín Superior

La figura 24 resume las estructuras localizadas en la cuenca Delfín Superior. Para la descripción de las estructuras interpretadas se dividió en tres regiones: La región I (Figura 24) se localiza al NE en la cuenca Delfín Superior, está delimitada por dos fallas normales al NO y SE, ambas con caída hacia el depocentro de la cuenca Delfín Superior Norte. La falla al NO tiene una orientación $15-30^\circ$ NNE, su echado promedio es de 61° y cae hacia al SE y su longitud en profundidad promedio de 2.65 km. La falla al SE de esta región tiene una orientación de 30° NNE, su echado es de $\sim 67^\circ$ y su longitud en profundidad alrededor de los 2.60 km.



(a) Isométrico de la cuenca Consag



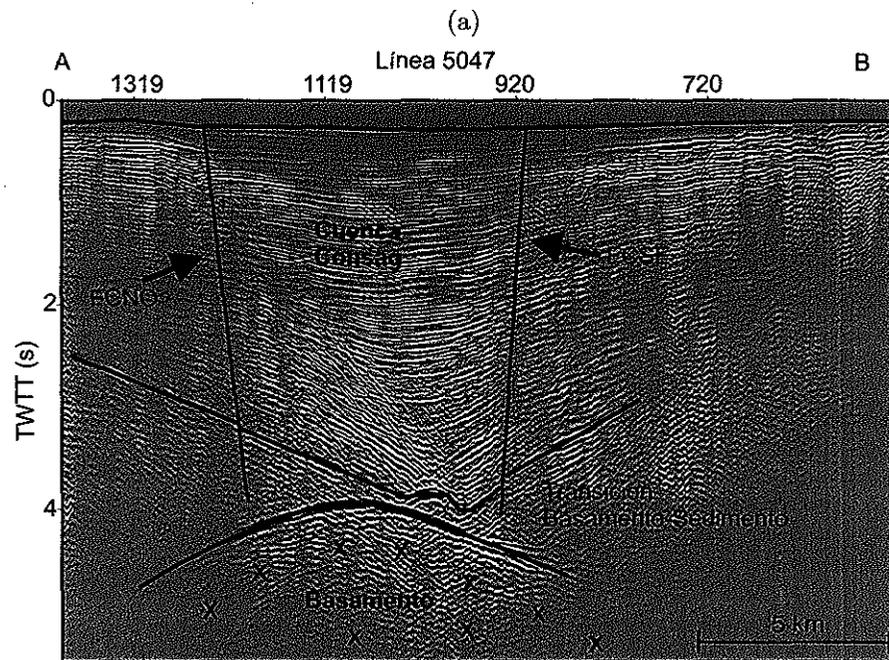
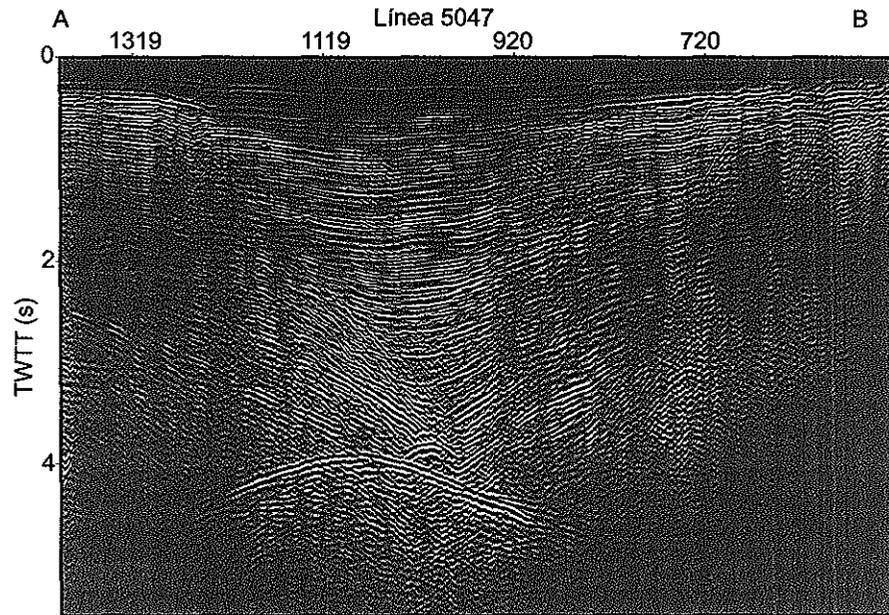
(b) Segmentos de líneas sísmicas

Figura 21. (a) Isométrico de la cuenca Consag, contiene la configuración de tres horizontes; El fondo marino, base de los sedimentos y cima del basamento. También se muestran las falla Consag Noroeste (FCNO) y la falla Consag Sureste (FCSE), (b) La ubicación de los segmentos de líneas sísmicas usados en la interpretación. FV = falla Volcanes; FR = falla Refugio; FA = falla Amado. SF = San Felipe; PP = Puerto Peñasco; PL = Puerto Lobos.

La región II (Figura 24) se localiza al NO en la cuenca Delfín Superior, está delimitada principalmente por dos fallas normales al NO y SE, ambas con caída hacia la cuenca. La falla al NO tiene un echado promedio de 44° y la falla SE un echado promedio de 41° . La longitud promedio en profundidad de estas fallas es aproximadamente de 3.70 km.

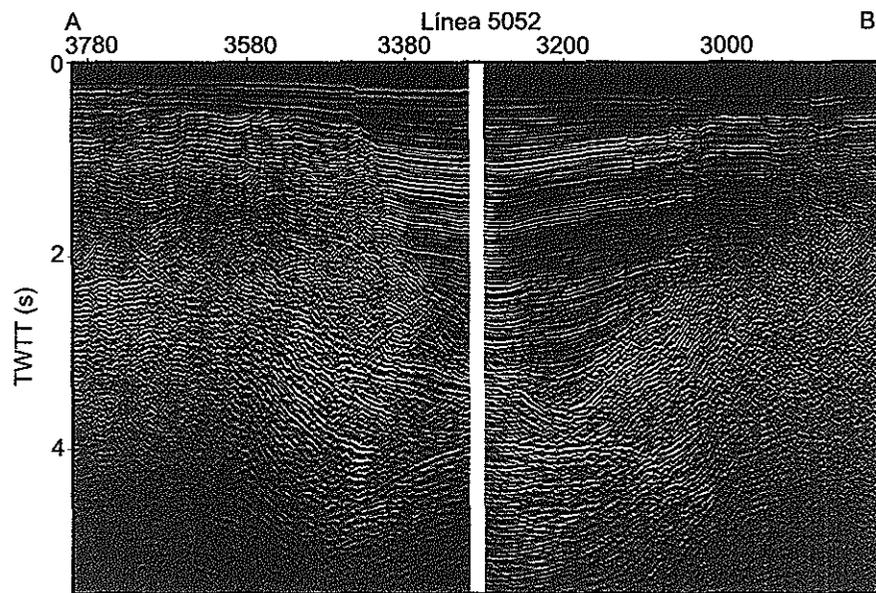
La región III (Figura 24) se caracteriza por fallas normales con un echado promedio de 68.61° con una orientación NNE. Las fallas delimitan a un depocentro independiente al resto de la cuenca. Este depocentro sirve como paso entre dos fallas con desplazamiento lateral inferido por la discontinuidad de los reflectores sísmicos a través del plano de falla; la falla Refugio (Figura 25) y la falla Cortés, interpretadas por primera vez en este trabajo.

La falla Refugio y la falla Cortés tienen una orientación de $\sim 30^\circ$ NNE. La falla refugio constituye el límite este de la cuenca Delfín Inferior y la falla Cortés es el límite este de la cuenca Delfín Superior.

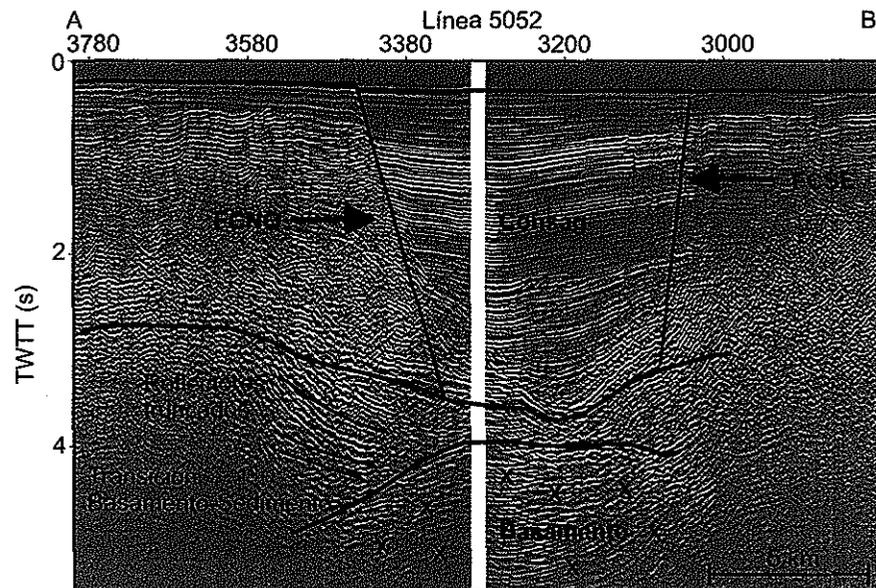


(b)

Figura 22. Segmento de línea sísmica 5047 usado para la interpretación de los rasgos estructurales dentro de la cuenca Consag. (a) es el segmento sin interpretación. (b) es el segmento con interpretación. FCNO = Falla Consag Noroeste; FCSE = Falla Consag Sureste.



(a)



(b)

Figura 23. Segmento de línea sísmica 5052 usado para la interpretación de los rasgos estructurales dentro de la cuenca Consag. (a) es el segmento sin interpretación. (b) es el segmento con interpretación. FCNO = Falla Consag Noroeste; FCSE = Falla Consag Sureste.

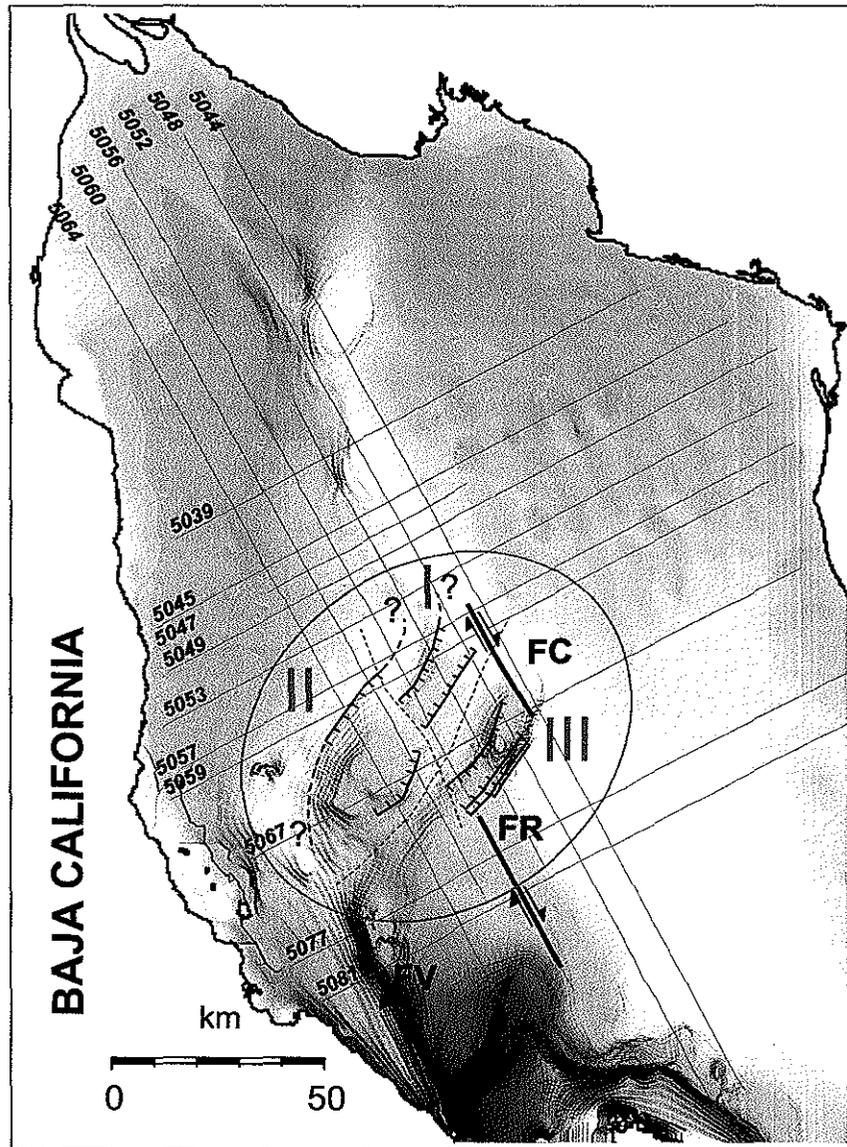
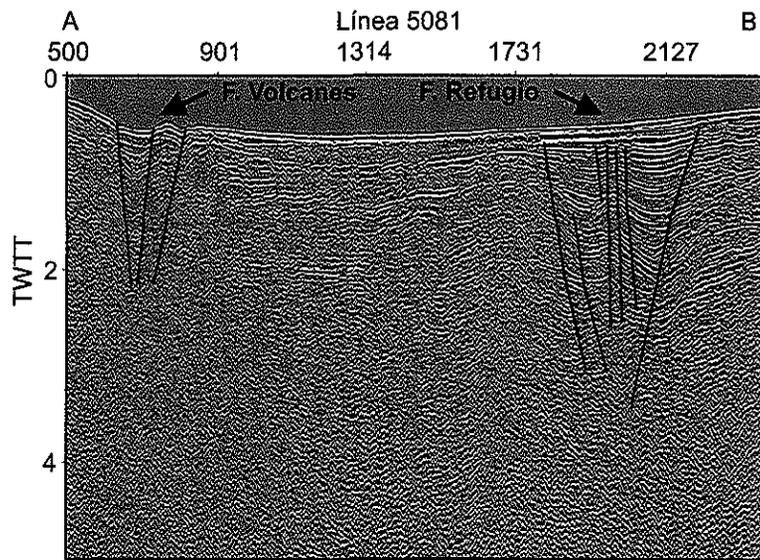
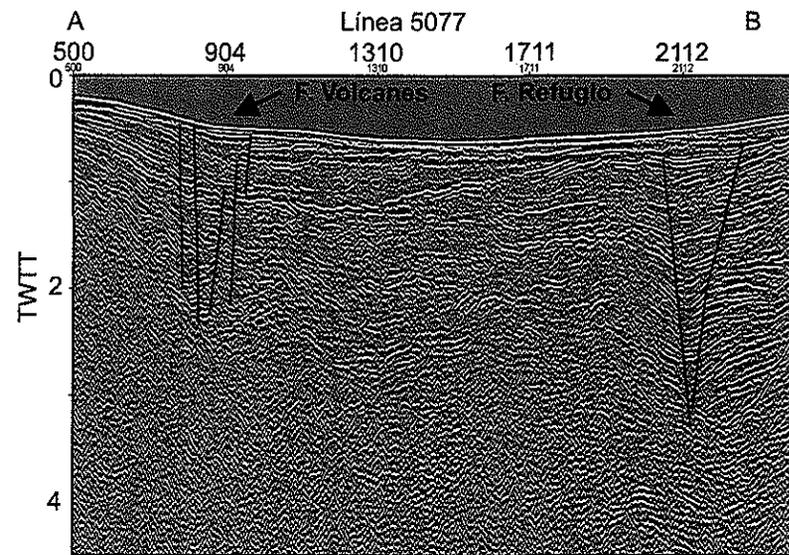


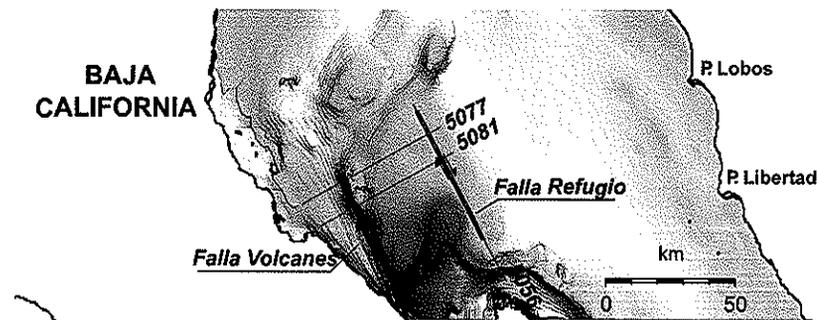
Figura 24. Las principales características estructurales en la cuenca Delfín Superior.
 FV = Falla Volcanes; FR = Falla Refugio; FC = Falla Cortés.



(a) Línea 5081



(b) Línea 5077



(c) Ubicación

Figura 25. Dos segmentos de líneas sísmicas: (a) línea 5081 y (b) línea 5077 donde se muestra la interpretación de la falla Refugio y (b) la correlación de la misma.

Capítulo IV

Discusión y conclusiones

IV.1 Estructura general del basamento en el norte del Golfo de California

La configuración del basamento acústico continental en la región central del norte del Golfo de California, muestra la distancia máxima en donde ha ocurrido la ruptura continental y la formación de piso oceánico entre los márgenes de la costa de Baja California y la costa de Sonora. La reflexión del basamento acústico que se prolonga de la costa de Baja California es difusa y desaparece por debajo de los 4 segundos de tiempo doble (TWTT). Así mismo, la reflexión del basamento acústico que proviene de la costa de Sonora es muy clara y de gran amplitud, no obstante, se vuelve difusa y se pierde alrededor de los 4 segundos de tiempo doble (TWTT). Sin embargo, el cuerpo de alta velocidad ubicado bajo la cuenca Consag (ver capítulo III) genera un contraste de impedancia acústica que sugiere una interface sedimento-basamento. Este reflector que representa a un basamento acústico posiblemente se debe a extensas intrusiones ígneas, relacionadas con la ruptura de la corteza continental en esta región.

La reflexión difusa y ausencia del basamento acústico en las regiones oeste y centro del norte del Golfo de California respectivamente, puede implicar un gradiente vertical en la velocidad, que impide que las capas de la corteza se comporten de forma discreta. Este comportamiento puede ser análogo a lo observado por Fuis *et al.* (1984) en el Valle Imperial, donde un estudio de sismica de refracción muestra que no existe una

discontinuidad marcada en la velocidad entre el paquete sedimentario y el basamento. Fuis *et al.* (1984) propone que el *rifting* y las intrusiones producen un flujo de calor tal que transforma la roca sedimentaria en un basamento metasedimentario que se consolida como la nueva corteza. Un estudio de sismica de reflexión y sismica de gran ángulo sobre la cuenca Delfín Superior muestra que existen difracciones posiblemente asociadas a intrusiones magmáticas o sills. No obstante, la actividad magmáticas no es extensa, debido a que no existen velocidades altas de onda P, y tampoco una densidad anómala en la corteza inferior.

La presencia de un fuerte gradiente vertical en el norte del Golfo de California fue sugerida inicialmente por Henyey y Bischoff (1973). Ellos proponen que es más realista interpretar una velocidad continua en función de la profundidad, que una velocidad en capas discretas en regiones cercanas a centros de dispersión. Gonzalez-Fernández *et al.* (2005) reportan un gradiente vertical de $0.4 \text{ km s}^{-1}\text{km}^{-1}$ en la capa sedimentaria inferior de la cuenca Delfín Superior. Probablemente este gradiente constituya la causa principal de que no se tenga una interface sedimento-basamento marcada, que se exprese con una reflexión clara en las líneas sísmicas, salvo el ubicado en la cuenca Consag. Posiblemente la presencia de basamento acústico en la cuenca Consag se deba a que el espesor de la capa de transición sea menor bajo la cuenca, y a medida que se prolonga hacia la costa aumente considerablemente su espesor.

IV.2 Deformación distribuida o particionada?

Son reportadas por primera vez en este estudio dos fallas de desplazamiento lateral constituyen el límite oriental de las cuencas Consag y Delfín Superior, en el norte del Golfo de California (Figura 26). La falla Refugio que limita al NE la cuenca Delfín

Inferior y la falla Cortés que limita al NE la cuenca Delfín Superior indican el límite de la zona de extensión al oriente.

La interpretación de estas zonas que acomodan desplazamiento lateral se basa en dos observaciones: i) ambas estructuras muestran una geometría similar a la de una flor negativa, típicas de zonas de transtensión. Ésta geometría consiste en fallas que convergen en profundidad, aunadas a un desplazamiento vertical considerable; ii) la segunda observación se basa en la comparación de la orientación de las estructuras Refugio y Cortes (27° NW), con las orientaciones obtenidas en modelos físicos de arcilla para rifting oblicuo, aplicados para el caso del Golfo de California. Los resultados muestran fallas normales con una orientación NE, sobre 30° a partir de la dirección del *rift*, y las fallas con componente de desplazamiento lateral derecho tendrán una orientación NW (Withjack y Jamison, 1986). La orientación de las estructuras Refugio y Cortes interpretadas en este trabajo es de 27° NW, parecida a lo obtenida en los modelos de arcilla. Por lo tanto, concluimos que la falla Refugio y la falla Cortés acomodan principalmente desplazamiento lateral.

Esta información contrasta con lo reportado anteriormente, que sugiere para el norte del Golfo de California, un patrón de fallas que concentra la deformación en fallas de desplazamiento lateral en la costa y fallas predominantemente extensionales al centro (Persaud *et al.*, 2003). Sin embargo, desde la boca del Golfo California hasta el sistema de fallas Canal de Ballenas podemos encontrar un sistema de cuencas rift conectadas entre sí por segmentos de fallas transformes. Por lo tanto, esperaríamos este mismo estilo estructural para el norte del Golfo de California.

Basados en nuestras observaciones concluimos que la corteza del norte del Golfo de California exhibe una segmentación controlada por fallas transformes, similar a la del resto del sistema de *rift*, y que los grandes espesores de sedimentos (>2km) han jugado

un papel importante al enmascarar los principales rasgos estructurales.

IV.3 La frontera estructural entre la Cuenca Consag y Delfín Superior

La frontera estructural entre las cuencas Consag y Delfín superior consiste en una estructura análoga a un domo, que separa por 20 km los depocentros en el eje norte-sur. Bajo la frontera no se identificó basamento acústico. Las líneas sísmicas que cubrieron la frontera entre las cuencas Consag y Delfín Superior, son principalmente de una orientación NW-SE (líneas 5048, 5052, 5056 y 5060), las cuales no se muestran fallas dominantes. En caso contrario, las secciones 5047 y 5045 que cortan transversalmente el norte del Golfo de California, muestran una gran cantidad de fallas normales dentro y en el límite sur de la cuenca Consag. Esto sugiere que las fallas dentro de la frontera, que conectan las cuencas Consag y Delfín Superior tienen una orientación NW-SE, similar a la de las secciones sísmicas.

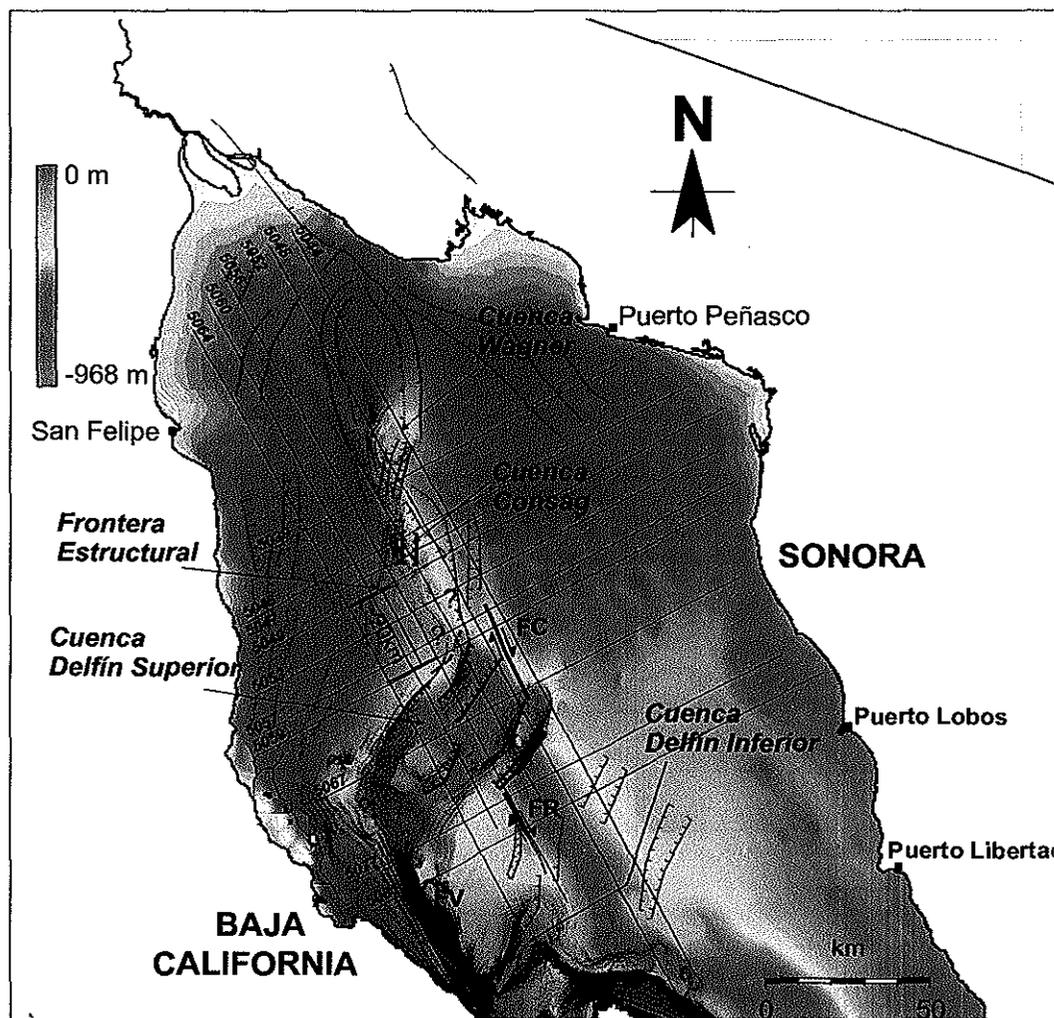


Figura 26. Estructuras principales en el norte del Golfo de California. Las líneas en color negro representan las estructuras interpretadas en este trabajo. Las líneas en color cafe son las estructuras interpretadas por Persaud et al. (2003). Las líneas en color azul son las estructuras interpretadas por Aguilar-Campos (2007). Las líneas en color verde son las estructuras interpretadas por González-Escobar et al. (2010).

Referencias

- Aguilar-Campos, C. (2007). *Sísmica de reflexión en el alto Golfo de California*. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Ensenada, Baja California, México. 100p.
- Allen, P. A. y Allen, J. R. (2005). *Basin Analysis; Principles and Applications*. Blackwell Science Ltd, Massachusetts, USA, segunda edición. 190p.
- Aragón-Arreola, M. y Martín-Barajas, A. (2007). Westward migration of extension in the northern Gulf of California, Mexico. *Geology*, **35**(6): 571–574.
- Atwater, T. y Stock, J. (1998). Pacific-North America Plate tectonics of the Neogene southwestern United States: An update. *Int. Geol. Rev.*, **40**: 375–402.
- Campbell, F. M., Kaiser, A., Horstmeyer, H., Green, A. G., Ghisetti, F., y Gorman, A. R. (2010). Processing and preliminary interpretation of noisy high-resolution seismic reflection/ refraction data across the active Ostler Fault zone, South Island, New Zealand. *Journal of Applied Geophysics*, **70**: 332–342.
- Canet, C., Prol-Ledesma, R. M., Dando, P. R., Vázquez-Figueroa, V., Shumilin, E., Birosta, E., Sánchez, A., Robinson, C. J., Camprubí, A., y Tauler, E. (2010). Discovery of massive seafloor gas seepage along the Wagner Fault, northern Gulf of California. *Sedimentary Geology*, **228**: 292–303.
- Carreño, A. L. y Smith, J. T. (2007). Stratigraphy and correlation for the ancient gulf of California and Baja California Peninsula, Mexico. *Bulletin of American Paleontology*, **371**: 1–146.
- Couch, R., Ness, G. E., Sánchez-Zamora, O., Calderón-Riveroll, G., Doguin, P., Plawman, T., Coperude, S., Huehn, B., y Gumma, W. (1991). Gravity anomalies and crustal structure of the Gulf and Peninsular Province of the Californias, Dauphin, J.P., and Simoneit, B. R. (Editor), *The Gulf and Peninsular Provinces of the Californias*. *AAPG Mem.*, **47**: 25–45.
- DeMets, A. C. (1995). Reappraisal of seafloor spreading lineations in the el Gulf of California: Implications for the transfer of Baja California to Pacific plate y estimates of pacific-North America motion. *Geophys. Res. Lett.*, **22**: 3545–3548.
- Dorsey, R. J. (2010). Sedimentation and crustal recycling along an active oblique-rift margin: Salton Trough and northern Gulf of California. *Geology*, **5**: 443–446.
- Fenby, S. S. y Gastil, R. G. (1991). Geologic-tectonic map of the Gulf of California and surrounding areas, in *The Gulf and Peninsular Provinces of Californias*, edited by J. P. Dauphin and B. R. T. Simoneit. *AAPG Mem.*, **47**: 79–83.

- Fuis, G. S., Mooney, W. D., Healy, J. H., McMechan, G. A., y Lutter, W. J. (1984). A seismic refraction survey of the Imperial Valley region, California. *J. Geophys. Res.*, **89**: 1165–1189.
- Gadallah, M. R. y Fisher, R. L. (2005). *Applied Seismology*. Pennwell, Oklahoma, USA. 473p.
- Gonzalez-Fernández, A., Danobeitia, J. J., Delgado-Argote, L. A., Michaud, F., Cordoba, D., y Bartolome, R. (2005). Mode of extension y rifting history of upper Tiburon y upper Delfin basins, northern Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, **110**: 1–17.
- González-Escobar, M., Martín-Barajas, A., Abdeslem-García, J., y Aragón-Arreola, M. (2006). Evolución Tectonoestratigráfica de las Cuencas del Norte del Golfo de California. *Reporte técnico, No. 410303843, PEMEX.*, **3**: 104–108.
- González-Escobar, M., Suárez-Vidal, F., Hernández-Pérez, J., y Martín-Barajas, A. (2010). Seismic reflection-based evidence of a transfer zone between the Wagner and Consag basins: implications for defining the structural geometry of the northern Gulf of California. *Geo-Marine Letters*. doi:10.1007/s00367-010-0204-0 (PA: 99505).
- Helenes, J., Carreño, A. L., y Carrillo, R. M. (2009). Middle to late Miocene chronostratigraphy and development of the northern Gulf of California. *Marine Micropaleontology*, **72**: 10–25.
- Heney, T. L. y Bischoff, J. L. (1973). Tectonic elements of the central part of the Gulf of California. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **85**: 315–329.
- Hernández-Pérez, J. A. (2008). *Estructura y estratigrafía en las cuencas Wagner y Consag, Golfo de California, a partir de sísmica de reflexión*. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Ensenada, Baja California, México. 100p.
- Larson, P. A., Mudie, J. D., y Larson, R. (1972). Magnetic anomalies and fracture-zone trends in the Gulf of California. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **83**: 3361–3368.
- Lawver, L. A., Sclater, J. G., Heney, T. L., y Rogers, J. (1973). Heat flow measurements in the southern portion of the Gulf of California. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **12**: 198–208.
- Mar-Hernández, J. E. (2009). *Tectónica de la cuenca Tiburón a partir de sísmica de reflexión*. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Ensenada, Baja California, México. 77p.
- Martín-Barajas, A. (2000). Volcanismo y extensión en la Provincia Extensional del Golfo de California. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, **LIII**: 72–83.

- Nagy, E. A. y Stock, J. M. (1991). Structural controls on the continent-ocean transition in the northern Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, **105(B7)**: 16251–16269.
- Oskin, M. y Stock, J. (2003). Marine incursion synchronous with plate-boundary localization in the Gulf of California. *Geological Society of America*, **31**: 23–26.
- Oskin, M., Stock, J., y Martín-Barajas, A. (2001). Rapid localization of Pacific-North America plate motion in the Gulf de California. *Geology*, **29**: 459–462.
- Pacheco, M., Martín-Barajas, A., Elders, W., Espinosa-Cardena, J. M., Helenes, J., y Segura, A. (2006). Stratigraphy and structure of the Altar basin of NW Sonora: Implications for the history of the Colorado River delta and the Salton trough. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, **23**: 1–22.
- Persaud, P., Stock, J. M., Steckler, M. S., Martín-Barajas, A., Diebold, J. B., González-Fernández, A., y Mountain, G. S. (2003). Active deformation and shallow structure of Wagner, Consag and Delfin Basins, northern Gulf of California, Mexico. *J. Geophys. Res.*, **108**: 23–55.
- Phillips, R. P. (1964). Seismic refraction studies in Gulf of California, en *Marine Geology of the Gulf of California*, edited by T. van Andel and G. G. Shor. *AAPG Mem.*, **3**: 90–125.
- Pérez Cruz, G. (1982). Algunos resultados de la investigación geológico-geofísica en la porción noroccidental del Golfo de California. *Boletín de la Sociedad Mexicana de Geólogos Petroleros*, **34**: 71–77.
- Sanchez-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 *The Gulf and peninsular province of the Californias*, edited by J. P. Dauphin and B. R. T. Simoneit. *AAPG mem.*, **47**: 377–401.
- Sheriff, R. E. y Geldart, L. P. (1995). *Exploration Seismology*. Cambridge University Press, New York, USA, segunda edición. 275-346.
- 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.
- Vargas-Magaña, Y. J. (2011). *Estructura en el sector noroeste del Golfo de California, a partir de sísmica de reflexión*. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares, Nuevo León, México. 122p.
- Withjack, M. O. y Jamison, W. R. (1986). Deformation produced by oblique rifting. *Tectonophysics*, **126**: 99–124.
- Yilmaz, O. (1987). *Seismic Data Processing*. Investigations in Geophysics, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, USA, segunda edición. 526p.