

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

La investigación fue financiada por el Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnología (CONAHCYT).

Todo el material contenido en esta tesis está 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 o titular de los Derechos de Autor.

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Ciencias de la Tierra**

**Estructura del subsuelo en un sector de la región Magdalena
en Baja California Sur por medio de sísmica de reflexión.**

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

Presenta:

Moisés Daniel González Álvarez

Ensenada, Baja California, México
2023

Tesis defendida por
Moisés Daniel González Álvarez

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Mario González Escobar
Director de tesis

Dr. Antonio González Fernández

Dr. José Pedro Osuna Cañedo

Dra. Dana Dierna Carciumaru



Dr. Diego Ruiz Aguilar
Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Tierra

Dra. Ana Denise Re Araujo
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Moisés Daniel González Álvarez** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra.

Estructura del subsuelo en un sector de la región Magdalena en Baja California Sur por medio de sísmica de reflexión.

Resumen aprobado por:

Dr. Mario González Escobar
Director de tesis

Las regiones de antearco son el reflejo y el albergue de procesos de convergencia tectónica. En este contexto, las cuencas formadas de manera colateral a la subducción se distinguen por sus considerables espesores sedimentarios. La península de Baja California alberga diversas cuencas de antearco, resultado del evento de subducción de la placa de Farallón durante el Mioceno Medio-Tardío. Con esta premisa, presentamos una serie de 8 perfiles sísmicos de reflexión terrestre proporcionados por la industria petrolera y ubicados en la región Magdalena, en la planicie de Ciudad Constitución, en Baja California Sur. Estos perfiles fueron procesados e interpretados y, en conjunto con datos gravimétricos y registros de pozos, permitieron identificar las estructuras geológicas más destacadas, como una cuenca de antearco cuyo depocentro alcanzó una profundidad de 3000 ms (TVD) y que se formó entre la antigua zona de subducción y la sierra La Giganta. Se identificó también una falla inversa con un buzamiento aparente de 39° que atraviesa las unidades sedimentarias de la región y controla la subsidencia en la cuenca. Desde el punto de vista sismoestratigráfico, se identificaron cinco límites de secuencias sísmicas, dos de los cuales representan discordancias significativas que se consideran rasgos geológicos importantes en la evolución tectónica de la región. Las observaciones presentadas tienen como objetivo incrementar el conocimiento de la evolución geológica de esta región y, a su vez, generar imágenes del subsuelo que permitan su comparación con regiones análogas.

Palabras clave: Sísmica, Reflexión, Cuenca, Antearco, Baja California Sur

Abstract of the thesis presented by **Moisés Daniel González Álvarez** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth Sciences

Subsurface structure in a sector of the Magdalena region in Baja California Sur through reflection seismic.

Abstract approved by:

Dr. Mario González Escobar
Thesis Director

The forearc regions are both the reflection and the host of tectonic convergence processes. In this context, the collaterally formed basins related to subduction are characterized by their considerable sedimentary thicknesses. The Baja California Peninsula hosts several forearc basins, resulting from the subduction event of the Farallon plate during the Middle-Late Miocene. With this premise, we present a series of 8 land-based seismic reflection profiles provided by the petroleum industry, located in the Magdalena region within the Ciudad Constitución plain, in Baja California Sur. These profiles were processed and interpreted, and in conjunction with gravimetric data and well logs, they allowed the identification of prominent geological structures, including a forearc basin with a depocenter reaching a depth of 3000 ms (TVD) that formed between the former subduction zone and the La Giganta mountain range. Additionally, an inverse fault with an apparent dip of 39° was interpreted, cutting through the sedimentary units of the region, and controlling subsidence in the basin. From a seismic-stratigraphic perspective, five seismic sequence boundaries were identified, two of which represent significant unconformities considered important geological features in the tectonic evolution of the region. The presented observations aim to enhance the understanding of the geological evolution of this region and, at the same time, generate subsurface images that allow for comparisons with analogous regions.

Keywords: Seismic, Reflection, Forearc, Basin, Baja California Sur

Dedicatoria

A mi familia.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) por brindarme la oportunidad de realizar este posgrado.

A mi director de tesis, el Dr. Mario González Escobar, por todo su apoyo y por los conocimientos compartidos dentro y fuera del laboratorio de sismica.

A mis sinodales Dr. Antonio González, Dr. Pedro Osuna y la Dra. Dana Carciumaru, por sus comentarios y sugerencias para mejorar este trabajo de investigación.

A Petróleos Mexicanos por suministrar los datos sísmicos de reflexión que permitieron desarrollar esta investigación.

A Halliburton, por permitirnos usar su software ProMax® para el procesamiento de datos sísmicos de reflexión.

A Esri, por la licencia académica para el uso de la paquetería de ArcGIS Pro.

A A dGB Earth Sciences, por la licencia académica para el uso del software OpendTect.

A todo el personal del laboratorio de procesamiento de datos de sismica de reflexión, a Sergio Arregui por mantener la parte computacional de manera funcional, al M.C. Edgar Agustín Mastache por compartir sus conocimientos sobre geofísica de campo, al M.C. Cristian Gallegos por el apoyo, la paciencia y el conocimiento compartido para la elaboración de mapas.

Al Dr. Simón Reyes y al M.C Young Ho Aladro, por los consejos y las buenas pláticas acompañadas de una cerveza.

A mi familia, que siempre me apoyó a la distancia.

A mis amigos.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	ix
Lista de tablas	xii
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Área de estudio	4
1.2 Antecedentes	5
1.2.1 Marco tectónico	5
1.2.2 Estudios previos	7
1.3 Hipótesis.....	11
1.4 Objetivos	11
1.4.1 Objetivo general.....	11
1.4.2 Objetivos específicos.....	11
Capítulo 2. Metodología.....	12
2.1 Sísmica de reflexión.....	12
2.1.1 Base de datos	13
2.1.2 Procesado de los datos.....	14
2.1.3 Pre-apilamiento.....	14
2.1.3.1 Revisión y editado de trazas.....	15
2.1.3.2 Asignación de geometría.....	17

2.1.3.3	Corrección estática.....	18
2.1.3.4	Aplicación de filtros.....	18
2.1.3.5	Divergencia esférica	20
2.1.4	Deconvolución.....	21
2.1.5	Apilamiento	21
2.1.5.1	Agrupamiento por CDP	22
2.1.5.2	Análisis de velocidad	23
2.1.5.3	Corrección por NMO (Normal Move Out).....	25
2.1.5.4	Apilamiento	26
2.1.6	Post-Apilamiento.....	28
2.1.6.1	Filtro variable en tiempo	28
2.1.6.2	Migración	28
2.2	Interpretación sísmica.....	29
2.2.1	Resolución sísmica.....	29
2.2.2	Discordancia	30
2.2.3	Interpretación de horizontes y fallas	31
2.3	Mapa gravimétrico	32
2.4	Registros de pozos.....	33
2.5	Perfiles complementarios procesados	33
Capítulo 3.	Resultados	35
3.1	Perfiles sísmicos	35
3.1.1	Perfiles con orientación Suroeste-Noreste	35
3.1.1.1	Perfil L-40	35
3.1.1.2	Perfil L-28	38
3.1.1.3	Perfil L-26A	40

3.1.1.4	Perfil L-10	42
3.1.2	Perfiles con orientación Noroeste-Sureste	44
3.1.2.1	Perfil L1-DC.....	44
3.1.2.2	Perfil L-9A	46
3.1.2.3	Perfil L-9	48
3.1.2.4	Perfil L-17	50
3.2	Integración de resultados.....	52
3.2.1	Horizontes y falla geológica.....	52
3.3	Modelo tridimensional.....	54
Capítulo 4.	Discusión.....	56
4.1	Características estructurales	56
Capítulo 5.	Conclusiones	59
Literatura citada		61

Lista de figuras

Figura	Página
1. Región de estudio donde se muestran los perfiles sísmicos trabajados y los principales rasgos tectónicos. El mapa insertado muestra la Sierra Madre Occidental. El recuadro negro punteado indica el área de estudio (prospecto constitución). SFTA Sistema de falla Tosco-Abreojos. FSL Falla San Lázaro. FSM Falla Santa Margarita. ISM Isla Santa Margarita. Las fallas fueron tomadas y modificadas de Stock y Hodges (1989) y Michaud et al. (2004).....	2
2. Representación gráfica de una cuenca de ante arco y sus componentes. Tomado y modificado de Dickinson (1995).....	3
3. Ubicación geográfica de las líneas y pozos utilizados en nuestro estudio. Isla Santa Margarita (ISM).	4
4. Modelo de la evolución tectónica de la península de Baja California, México, durante el Mesozoico. Tomado y modificado de Busby et al. (1998).	6
5. Mapa del área de estudio de González-Escobar et al. (2016). Las líneas negras indican los perfiles geofísicos. Se muestran también el sistema de fallas Tosco-Abreojos (SFTA), la falla San Lázaro (FSL) y la falla Santa Margarita (FSM). Se muestra el perfil II-II' utilizado para generar el modelo que atraviesa una parte de la cuenca Iray-Magdalena (IMB por sus siglas en inglés) y el perfil sísmico OW trabajado por Brothers et al. (2012). Imagen tomada y modificada de González-Escobar et al. (2016). Las fallas fueron tomadas y modificadas de Stock y Hodges (1989) y Michaud et al. (2004).....	8
6. Imágenes sísmicas interpretadas. En el mapa insertado se muestra la ubicación de los perfiles L3, L1 y L5. Imágenes sísmicas en tiempo de viaje doble (TWT, por sus siglas en inglés) de los perfiles L3, L1 y L5 ya interpretados, de donde se hace presente la cuenca San Lázaro (CSL) la cual es principalmente controlada por la falla San Lázaro (FSL). Tomado y modificado de Mastache-Román y González-Escobar (2020).....	9
7. Resultados obtenidos por Gómez-Ávila et al. (2021). Se puede observar la presencia de lo que se interpreta como dos discordancias (unconformity 1 y 2, por su traducción en inglés), así como las diferentes secuencias sedimentarias. Cuenca San Lázaro (SLB por sus siglas en inglés), Cuenca Iray-Magdalena (IMB por sus siglas en inglés), Basamento Acústico (AB por sus siglas en inglés), Falla San Lázaro (SLF por sus siglas en inglés), Falla San Carlos (SCF por sus siglas en inglés), Falla Iray (IF por sus siglas en inglés), Falla Magdalena (MGF por sus siglas en inglés).	10
8. Flujo de trabajo para el procesado de datos sísmicos de acuerdo con Yilmaz (2001).	14
9. Trazas de la línea L-40. Se puede observar que las trazas con las fuentes número 127 y 131 contienen información innecesaria, esta información necesita ser removida para evitar problemas con pasos posteriores en el flujo de trabajo.....	16
10. Filtrado de datos. La figura de la izquierda representa los datos originales, sin la aplicación de algún proceso. En la figura de la derecha se puede observar el registro sísmico con el filtro pasa	

banda aplicado, así como los procesos de top mute y trace kill, así mismo aparece la bandera pequeña que indica que la asignación de la geometría fue correcta.	18
11. Representación del proceso de filtrado a través del filtro F-K, en el cual se puede generar un polígono para seleccionar el área que contiene las ondas con número de onda de nuestro interés.	19
12. Representación gráfica de una sección sísmica antes y después de aplicar la corrección por divergencia esférica. Tomado de Yilmaz (2001).....	20
13. Sección sísmica antes y después de aplicar la deconvolución. La imagen superior muestra la sección sísmica sin el proceso de la deconvolución y la imagen inferior muestra la misma sección, pero ahora deconvolucionada. Las unidades de la imagen son segundos (s). Tomado de Yilmaz (2001).	22
14. Ubicación geométrica de los CMP y CDP. El procesamiento de los datos en la etapa del apilamiento se produce principalmente en estos grupos. Tomado y modificado de Yilmaz (2001).	23
15. Espectro de velocidades de la línea L-17 generado a partir del método de la semblanza. Los colores rojos representan los altos valores de energía que indican reflexiones. Del lado derecho de la imagen, en el recuadro rojo, se pueden observar los diferentes arribos de las ondas antes de ser corregidos por NMO.	24
16. Modelo de velocidades de la línea L1-DC generado a partir de las velocidades obtenidas por el método de la semblanza.	25
17. Corrección por NMO. Se puede observar del lado derecho la figura, en el recuadro de color rojo, como se corrigen las reflexiones hiperbólicas a una manera horizontal.	26
18. Comparación entre la sección apilada obtenida de la línea L1-DC, antes con un modelo de velocidades propuesto (sin análisis de velocidad) figura superior) y después (figura inferior) de la aplicación del modelo de velocidades obtenido a partir del análisis de velocidades. En la imagen inferior, se pueden apreciar de manera más clara los reflectores y sus variaciones laterales y verticales. Esta mejora en la visualización permite una mejor identificación y caracterización de las estructuras geológicas presentes en el subsuelo.	27
19. Generación de una discordancia angular. Tomada de Caldwell (1997).....	31
20. Patrones de secuencias sísmicas. Modificado de Sheriff (2002)	32
21. Registros de los pozos utilizados en el presente trabajo. Su localización geográfica se encuentra en la figura 22. MT-1 Matancitas-1. BM-3 Bahía Magdalena-3. BM-2 Bahía Magdalena-2. ...	33
22. Ubicación de las líneas proporcionadas por PEMEX (líneas verdes).....	34
23. Línea sísmica L-40. El mapa insertado indica su ubicación. A) Se presentan los horizontes interpretados, así como el registro de pozos de la zona (ajustado a la escala de la imagen sísmica), la presencia de la falla y las discordancias presentes en esta sección. B) Imagen sísmica sin interpretar.....	37

24. Imagen sísmica de L-28. El mapa insertado muestra su ubicación. A) Se presentan los horizontes interpretados, así como la falla y las discordancias presentes en esta sección. B) Sección sísmica sin interpretar..... 39
25. Imagen sísmica de L-26A. El mapa insertado indica su ubicación (línea marcada en azul). A) Se presentan los horizontes interpretados, la falla y las discordancias presentes en esta sección. B) Imagen sísmica sin interpretación. 41
26. Imagen sísmica interpretada de L-10. El mapa insertado indica su ubicación (línea marcada en azul). A) Se presentan los horizontes interpretados, así como la presencia de la falla. El círculo remarca el cambio en el patrón de reflexión que indica la presencia de la discordancia 2 y la flecha negra indica la discordancia 1. B) Imagen sísmica sin interpretar. 43
27. Línea sísmica L1-DC. El mapa insertado indica su ubicación (línea marcada en azul). A) Se presentan los horizontes interpretados y la discordancia presentes en esta sección. B) Línea L1-DC sin interpretar. 45
28. Imagen sísmica interpretada de L-9A El mapa insertado indica su ubicación (línea marcada en azul). A) Se presentan los horizontes interpretados. Las flechas negras marcan la discordancia 1 y las azules indican los levantamientos estructurales. B) Sección sísmica sin interpretar ... 47
29. Interpretación de L-9. El mapa insertado indica su ubicación (línea marcada en azul). A) Se presentan los horizontes interpretados, la falla y la discordancia 1 (marcada con la flecha negra). B) Sección sísmica sin interpretar..... 49
30. Imagen sísmica interpretada de L-17. El mapa insertado indica su ubicación (línea marcada en azul). A) Se presentan los horizontes interpretados, así como la presencia de la discordancia de esta sección, las flechas negras marcan el levantamiento presente en esta zona y la flecha azul indica la discordancia 1. B) Sección sísmica sin interpretar. 51
31. Mapa de anomalía de Bouguer en la región cercana a la Ciudad Constitución. En el mapa insertado IM: Isla Magdalena. ISM: Isla Santa Margarita. Se puede correlacionar (valores más bajos de gravedad) el depocentro de la cuenca 52
32. Modelo 3D de la cuenca interpretada. 54
33. Modelo 3D correlacionado con el mapa de anomalía de Bouguer. Se puede observar la falla que corta 4 de los horizontes descritos en este trabajo. 55
34. Modelo Conceptual de la cuenca Iray-Magdalena. Tomado de García-Domínguez (1976). El mapa insertado muestra la ubicación del perfil A-B propuesto por Garcia-Dominguez (1976). Las fallas del mapa insertado fueron tomadas y modificadas de Stock y Hodges (1989) y Michaud et al. (2004) 57

Lista de tablas

Tabla	Página
1. Longitud de cada de una de las líneas sísmicas y la suma lineal de cada una de ellas.	13
2. Valores de la resolución vertical de acuerdo a frecuencias y velocidades comunes. r_v : resolución vertical. λ : longitud de onda. v : velocidad de las ondas sísmicas en el medio. f : frecuencia dominante.	30
3. Valores de la resolución horizontal de acuerdo con la frecuencias y velocidades comunes. r_h : resolución horizontal. t : tiempo de viaje doble. v : velocidad de las ondas sísmicas en el medio. f : frecuencia dominante.	30

Capítulo 1. Introducción

La actual costa oeste de Baja California ha experimentado diversos procesos geológicos a lo largo del tiempo. Uno de los principales procesos que han tenido influencia en esta zona es la subducción entre la placa tectónica de Farallón con la de Norteamérica durante el Paleógeno y Neógeno (Spencer y Normark, 1979). Esta subducción generó varias estructuras geológicas, como el arco volcánico conocido como: Sierra Madre Occidental (en adelante SMO) (Alquiza et al., 2010). Así mismo, dio lugar a la formación de estructuras conocidas como cuencas de antearco, las cuales se formaron en el mismo régimen tectónico cerca del margen occidental de la península de Baja California (Lonsdale, 1991; González-Escobar et al., 2016).

La detención del proceso de subducción, que se cree terminó hace 12 millones de años, provocó el movimiento entre las placas Pacífico-Norteamérica y generó un límite transformante con uno de los sistemas de falla más importante de esta región conocido como Tosco-Abreojos (SFTA, de ahora en adelante) (Fig.1) (Stock y Hodges, 1989; Michaud et al., 2004). Este sistema de fallas es relevante porque controla el régimen tectónico de la región, y a su vez se cree que parte del movimiento de la placa del Pacífico en relación con la placa de Norteamérica se produce sobre esta zona (Michaud et al., 2011). Aunque se han realizado diversas investigaciones sobre el SFTA y acerca de la estructura conocida como Plataforma Magdalena (Fig. 1) (que se encuentra mar adentro), como las llevadas a cabo por Spencer y Normark (1979), Michaud et al. (2005), Mastache-Román y González-Escobar (2020) y Gómez-Ávila et al. (2021), existen escasos trabajos que abordan la situación geológica en la zona costera, tal como el estudio realizado por García-Domínguez (1976).

Las cuencas de antearco son estructuras que se forman a lo largo de zonas de subducción asociadas a zonas oceánicas-continenciales o continenciales-continenciales y se desarrollan principalmente entre una zona de subducción y un arco volcánico (Noda, 2016). La figura 2 es una representación gráfica de una cuenca de antearco. En nuestro caso de estudio, algunas de las cuencas de antearco de esta región se formaron entre el STFA (antes zona de convergencia) y la SMO. De acuerdo con Dickinson y Seely (1979) las cuencas antearco tienen cierto potencial petrolero debido a su configuración estructural. Por esto mismo, en los años 70, Petróleos Mexicanos (PEMEX) realizó una campaña de adquisición de datos sísmicos de reflexión en la zona de la península de Baja California, en el prospecto Constitución (Fig. 1), para explorar el potencial petrolero que pudiera existir en la cuenca. Es a partir del uso de estos datos con los que se pretende realizar la investigación de este trabajo.

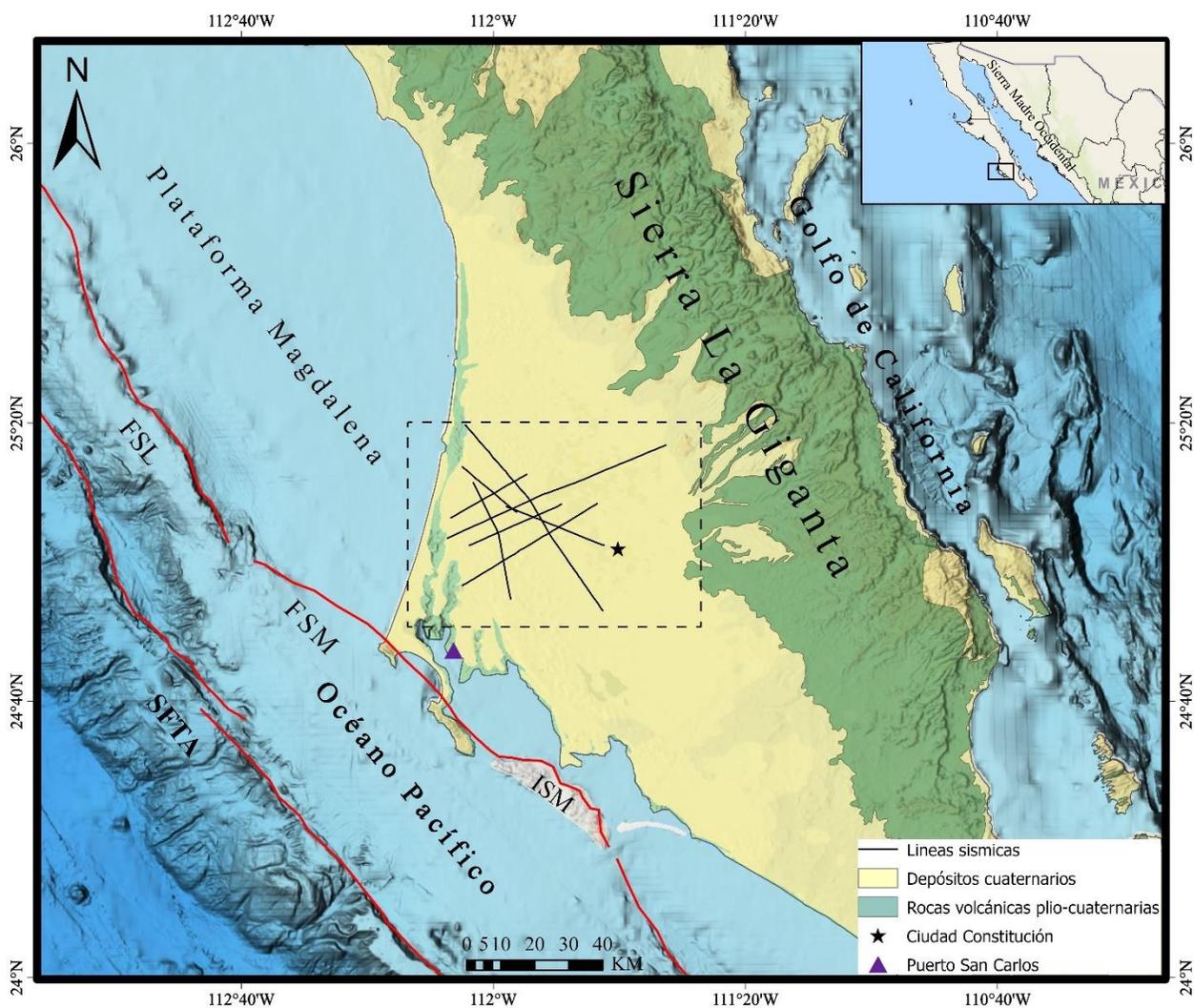


Figura 1. Región de estudio donde se muestran los perfiles sísmicos y los principales rasgos tectónicos. El mapa insertado muestra la Sierra Madre Occidental. El recuadro negro punteado indica el área de estudio (prospecto constitución). SFTA Sistema de falla Tosco-Abreojos. FSL Falla San Lázaro. FSM Falla Santa Margarita. ISM Isla Santa Margarita. Las fallas fueron tomadas y modificadas de Stock y Hodges (1989) y Michaud et al. (2004).

El objetivo principal de este trabajo es caracterizar las diferentes estructuras presentes en la región mediante la interpretación de ocho líneas sísmicas, la incorporación de información a partir de registros de pozos, datos gravimétricos y líneas sísmicas adicionales en la región. Los datos sísmicos serán procesados siguiendo la metodología de Yilmaz (2001) e interpretados de acuerdo con Badley (1987). A partir de los resultados se identifica la presencia de fallas, la geometría de la cuenca que está presente en la región y las capas sedimentarias en profundidad. La sísmica de reflexión es un método eficaz para poder obtener información detallada del subsuelo debido a su alta penetración y resolución. El acceso a la información de este prospecto nos permite conocer las características geológicas en detalle, lo que abonará a incrementar el conocimiento en la evolución tectónica de la región, entre otras cosas.

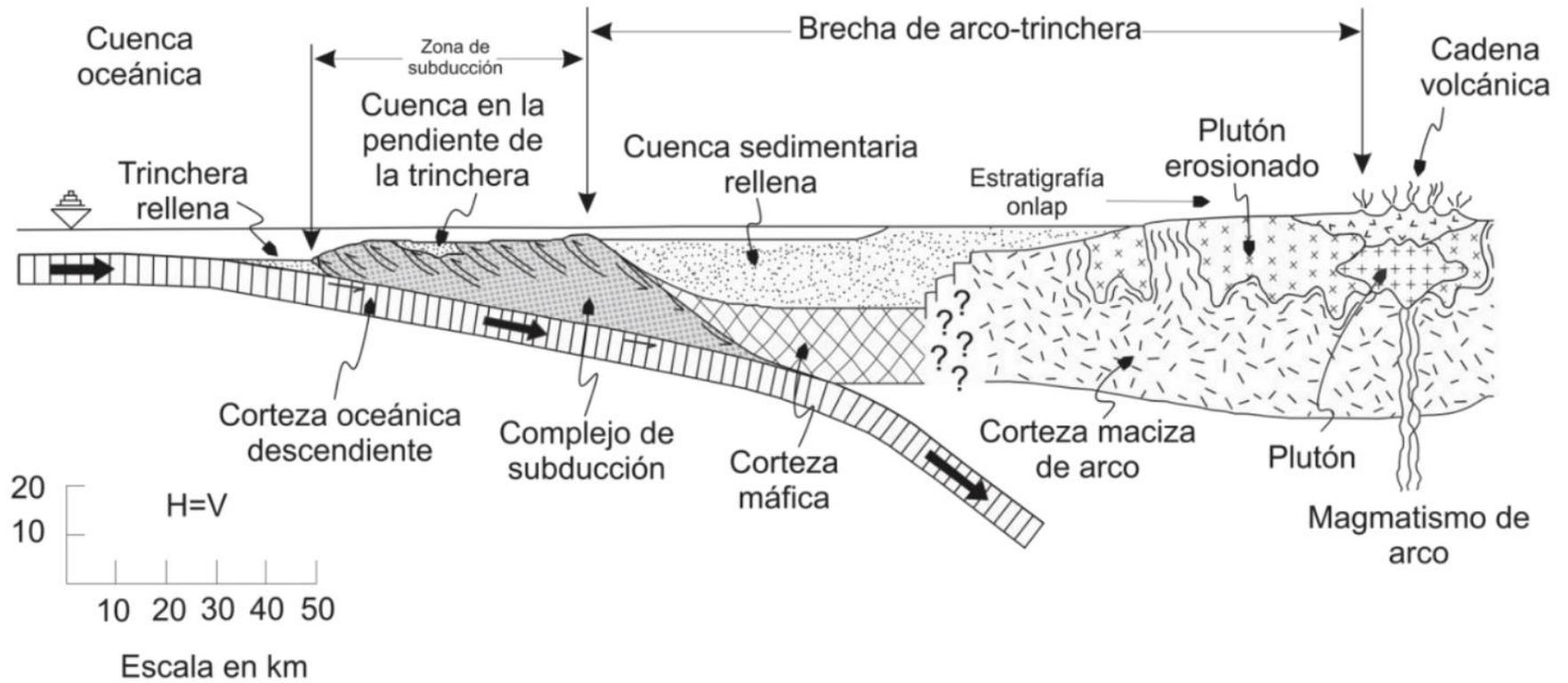


Figura 2. Representación gráfica de una cuenca de ante arco y sus componentes. Tomado y modificado de Dickinson (1995)

1.1 Área de estudio

Los perfiles sísmicos procesados e interpretados se sitúan en la zona centro-sur de la Península de Baja California. Están ubicados en la región Magdalena, en la planicie de Ciudad Constitución, limitando al oeste con el océano Pacífico y al este con la sierra La Giganta. La figura 3 muestra claramente el área de estudio, así como la posición geográfica de las líneas sísmicas y los pozos utilizados de donde se obtuvieron los registros de pozos. Estos registros han sido una valiosa fuente de información complementaria para nuestra investigación.

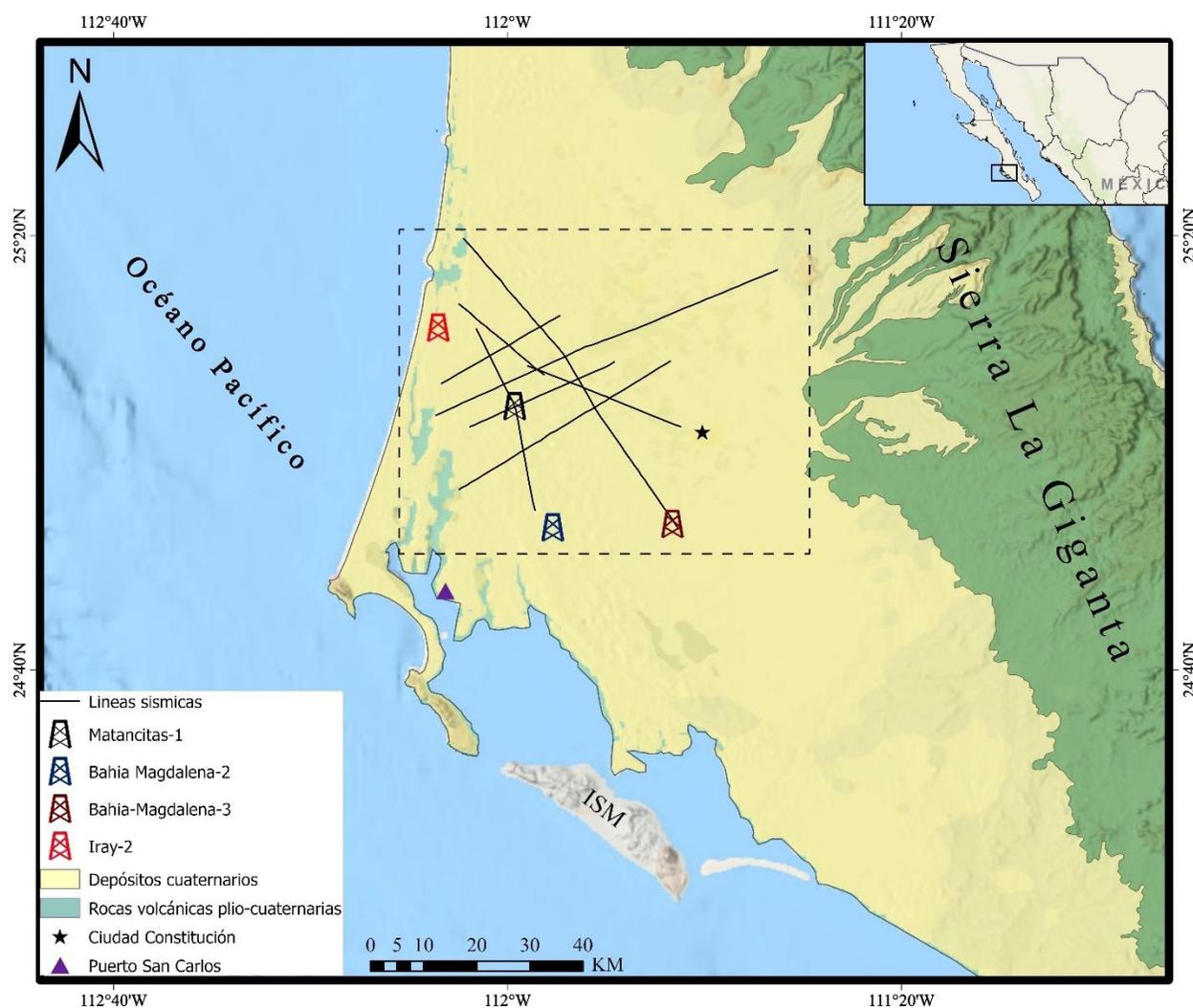


Figura 3. Ubicación geográfica de las líneas y pozos utilizados en nuestro estudio. Isla Santa Margarita (ISM).

1.2 Antecedentes

1.2.1 Marco tectónico

En el contexto geológico, la costa oeste de Baja California cambió de ser un régimen de subducción a uno transformante; durante el tiempo en que fue una zona convergente se llevó a cabo la formación de diferentes cuencas de tipo antearco. El margen convergente que se encontraba en la península de Baja California sirvió como ejemplo para representar la evolución de una cuenca oceánica que se encuentra entre un arco interoceánico. La evolución de la cuenca en la península se llevó a cabo en el Mesozoico y se representa de acuerdo con Busby et al. (1998) con tres fases tectónicas, durante las cuales, la subducción se llevó a cabo entre una litósfera oceánica muy antigua y fría y el arco interoceánico.

La **primera fase tectónica** reportada por Busby et al. (1998) empezó entre el Triásico Tardío y el Jurásico Tardío (220-130 Ma). Durante esta etapa se formaron sistemas de arco intra-oceánico y cuencas de tipo trasarco con características altamente extensionales. Las rocas encontradas en las islas de Bahía Magdalena representan una secuencia ofiolítica que formaba parte del piso oceánico y representa la generación de nuevas estructuras (arco insular) frente a estructuras más antiguas (margen continental). La **segunda fase** tuvo lugar durante el Cretácico Temprano (130-100 Ma) durante el cual un arco de islas creado al oeste de la actual península fue separado del margen continental por una cuenca de trasarco y generando a su vez una cuenca de antearco. La **tercera fase** se caracterizó por un cambio en el régimen de deformación, pasando a un régimen de subducción durante el Cretácico y el Paleoceno Temprano (100-50 Ma). Este cambio de régimen resultó en el cierre de la cuenca de trasarco y el levantamiento del arco continental, lo que provocó la erosión de este y sirviendo como fuente de sedimentos para la cuenca de antearco. Las etapas mencionadas por Busby et al. (1998) se representan en la figura 4.

Según los hallazgos de Bohannon y Parsons (1995), el cese de la subducción ocurrió con el acercamiento de la dorsal Pacífico-Farallón a la antigua trinchera, lo cual provocó un cambio tectónico transformante en el límite de las placas. Este cambio tectónico dio lugar al desarrollo del SFTA, el cual permitió el acomodo de la cizalla entre las placas Pacífico y de Norteamérica (Michaud et al., 2004). El SFTA es uno de los rasgos estructurales más importantes de la región ya que se considera que controla la geomorfología y los rasgos estructurales a lo largo del margen continental actual (Michaud et al., 2006). Es una estructura con una longitud de 500 km que corta la plataforma Magdalena y actualmente se considera activa. Además, absorbe parte del movimiento entre las placas del Pacífico y la placa de Norteamérica (Michaud et al., 2011). A una distancia de 40 km al este del SFTA se encuentra otro sistema de fallas conocido como Santa

Margarita-San Lázaro que se extiende ~500 km y discurre paralelo a la Bahía Magdalena. Este sistema de fallas corta a la isla Santa Margarita y funcionó como el principal responsable del levantamiento de las islas durante el Plioceno-Cuaternario (Fletcher et al., 2007).

El entorno geológico de la península de Baja California desde el Neógeno ha experimentado múltiples fases tectónicas que han dejado una notable influencia en la evolución de la región. Estas fases incluyen la formación de arcos insulares, cuencas de antearco, cuencas de trasarco y cordilleras volcánicas. Cada una de las diferentes etapas han desempeñado un papel significativo en la configuración geológica actual de la península y ha contribuido a la diversidad de características y fenómenos observados de la región.

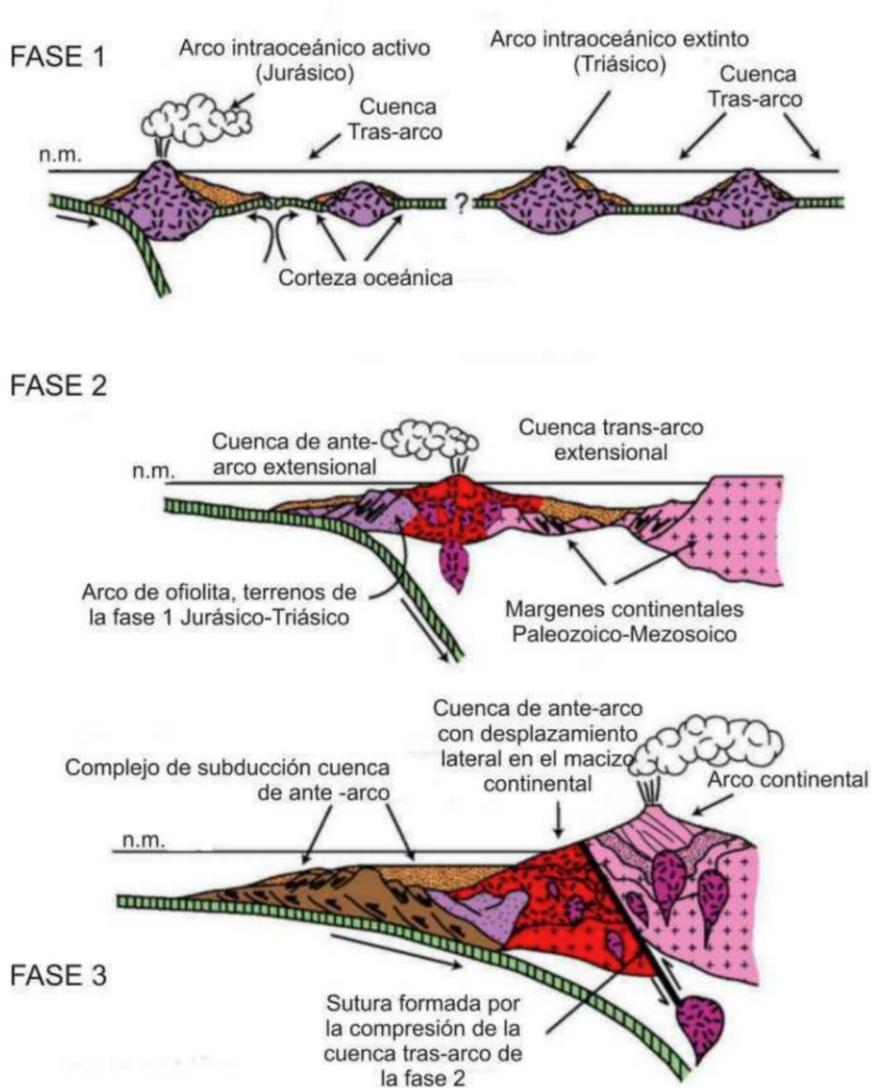


Figura 4. Modelo de la evolución tectónica de la actual península de Baja California, México, durante el Mesozoico. Tomado y modificado de Busby et al. (1998).

1.2.2 Estudios previos

Existen diferentes publicaciones acerca de la región que abarca la península de Baja California, donde se han estado reportando entre otras cosas, los cambios geológicos que ha sufrido. Mammerickx y Klitgord (1982), a través del análisis de anomalías magnéticas y batimétricas, han identificado que, durante el Mioceno medio a tardío, el cizallamiento entre las placas de Norteamérica y Pacífico afectó a la región, coincidiendo con el cese de la subducción de la placa de Farallón. Este fenómeno condujo a la formación de dos microplacas denominadas Guadalupe y Magdalena. Además, el cambio del régimen tectónico dominante, anteriormente de subducción, evolucionó hacia uno transformante de movimiento lateral derecho entre las placas Pacífico y Norteamérica. En este contexto, el sistema de fallas Tosco-Abrejos (STFA) que se extiende a lo largo de este margen (Fig. 1), se presenta como el factor más relevante para justificar este cambio de régimen tectónico (Stock y Hodges, 1989). Con base en el trabajo de Lonsdale (1991), se estima que el proceso de subducción finalizó aproximadamente hace 12.5 millones de años. Estas conclusiones se apoyan en las anomalías magnéticas que se identificaron en su estudio, y como resultado del cese de la subducción, las microplacas Guadalupe y Magdalena fueron capturadas por la placa del Pacífico. EL STFA se presenta en la figura 1 y se clasifica, de acuerdo con sísmica de reflexión hecha por Spencer y Normark (1979), como una estructura de ~500 km de longitud que se distribuye a lo largo del margen de la península de Baja California; el segmento norte es conocido “Abrejos” y el segmento sur es conocido como “Tosco”.

Los estudios de batimetría y sísmica de reflexión de Michaud et al. (2005) permitieron definir esta zona de falla como actualmente activa y que tiene un desplazamiento lateral derecho entre la península de Baja California y la placa del Pacífico. Brothers et al. (2012) a través de sísmica de reflexión obtuvieron como resultado que la subducción de la placa de Farallón por debajo de la placa de Norteamérica generó cuencas antearco en la región. García-Domínguez (1976) llevó a cabo una prospección geológica a partir de sísmica de reflexión y la información de registros de pozos, de la cual a partir de sus resultados propuso un modelo conceptual de la cuenca presente en la región costa adentro.

González-Escobar et al. (2016) realizó un estudio geofísico en la zona de la península de Baja California (la figura 5 muestra con detalle la zona de estudio) y obtuvo como resultados a partir de sísmica de reflexión, la presencia de diferentes cuencas en la zona cercana al SFTA, estas cuencas están estrechamente asociadas con la zona de deformación que se asocia con el sistema de fallas. Mastache-Román y González-Escobar (2020), llevaron a cabo la interpretación de imágenes sísmicas 2D para obtener una descripción más detallada de la geometría de una de las cuencas de antearco en la zona de estudio. A través de este

análisis, lograron identificar nuevos reflectores que no habían sido previamente observados en estudios anteriores. La configuración de la cuenca está principalmente controlada por la presencia de dos sistemas de falla prominentes: el sistema de falla Tosco-Abreojos y el sistema de falla San Lázaro. En la figura 6 se presentan los resultados obtenidos por los autores en su investigación.

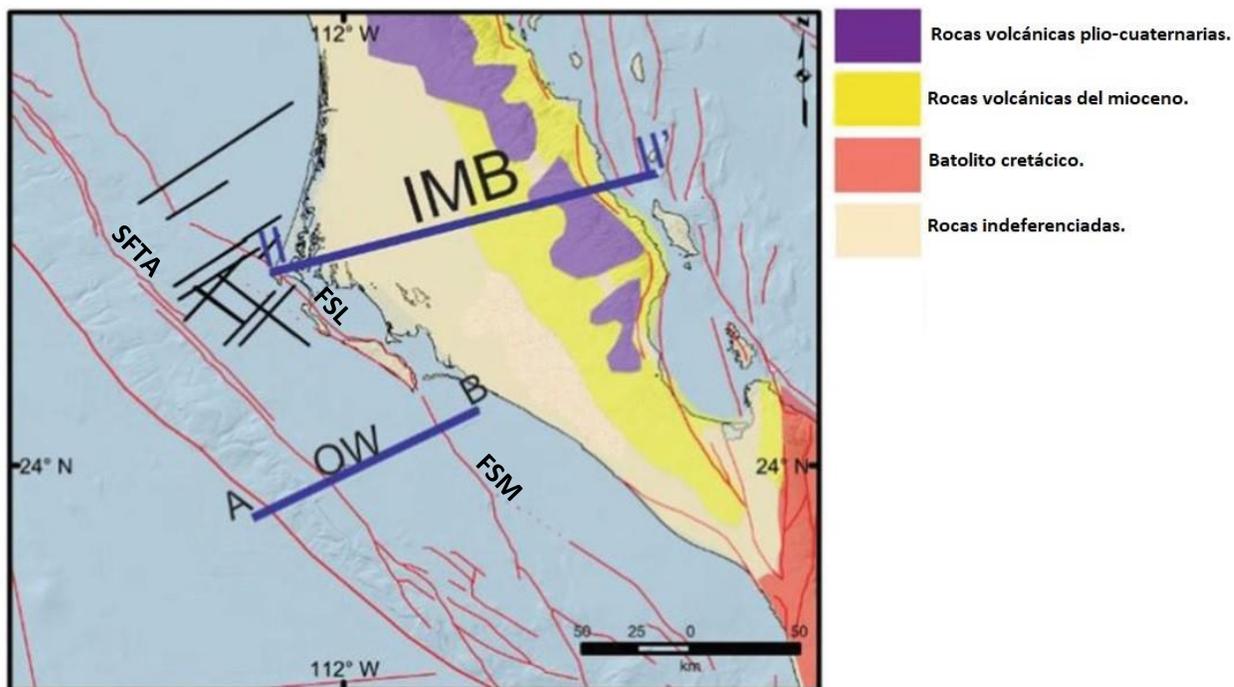


Figura 5. Mapa del área de estudio de González-Escobar et al. (2016). Las líneas negras indican los perfiles geofísicos. Se muestran también el sistema de fallas Tosco-Abreojos (SFTA), la falla San Lázaro (FSL) y la falla Santa Margarita (FSM). Se muestra el perfil II-II' utilizado para generar el modelo que atraviesa una parte de la cuenca Iray-Magdalena (IMB por sus siglas en inglés) y el perfil sísmico OW trabajado por Brothers et al. (2012). Imagen tomada y modificada de González-Escobar et al. (2016). Las fallas fueron tomadas y modificadas de Stock y Hodges (1989) y Michaud et al. (2004).

El estudio más reciente, publicado por Gómez-Ávila et al. (2021), se enfocó en la zona cercana a la bahía y proporcionó valiosa información sobre la evolución de las cuencas de antearco en la región. Entre los resultados destacados de este trabajo se encuentra la identificación de una discordancia que aporta una mejor comprensión de la historia evolutiva de estas cuencas. Según los autores, esta discordancia representa una superficie de abrasión que estuvo activa durante el período de subducción de la placa de Farallón. En la figura 7 se presentan los resultados obtenidos en este estudio.

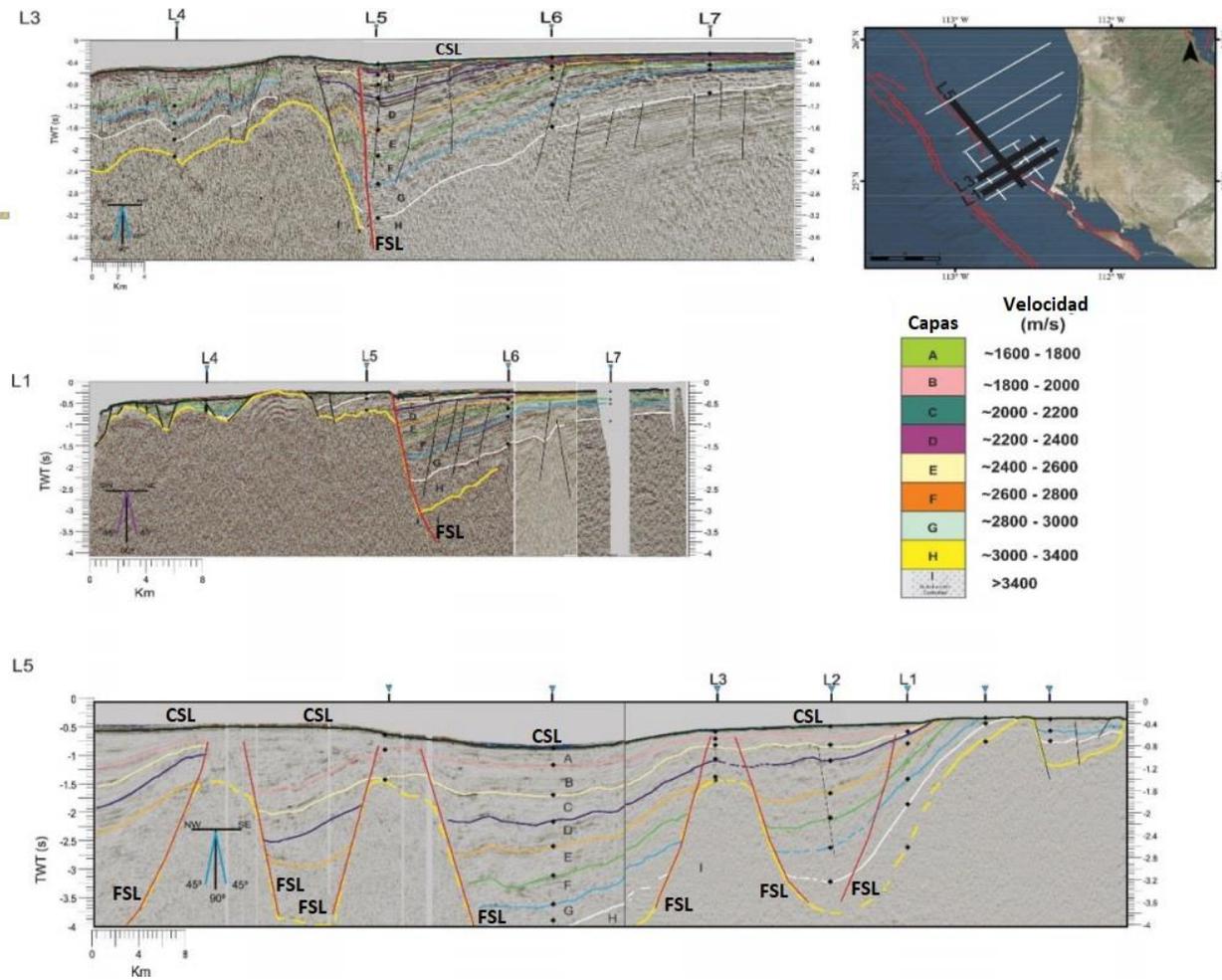


Figura 6. Imágenes sísmicas interpretadas. En el mapa insertado se muestra la ubicación de los perfiles L3, L1 y L5. Imágenes sísmicas en tiempo de viaje doble (TWT, por sus siglas en inglés) de los perfiles L3, L1 y L5 ya interpretados, de donde se hace presente la cuenca San Lázaro (CSL) la cual es principalmente controlada por la falla San Lázaro (FSL). Tomado y modificado de Mastache-Román y González-Escobar (2020).

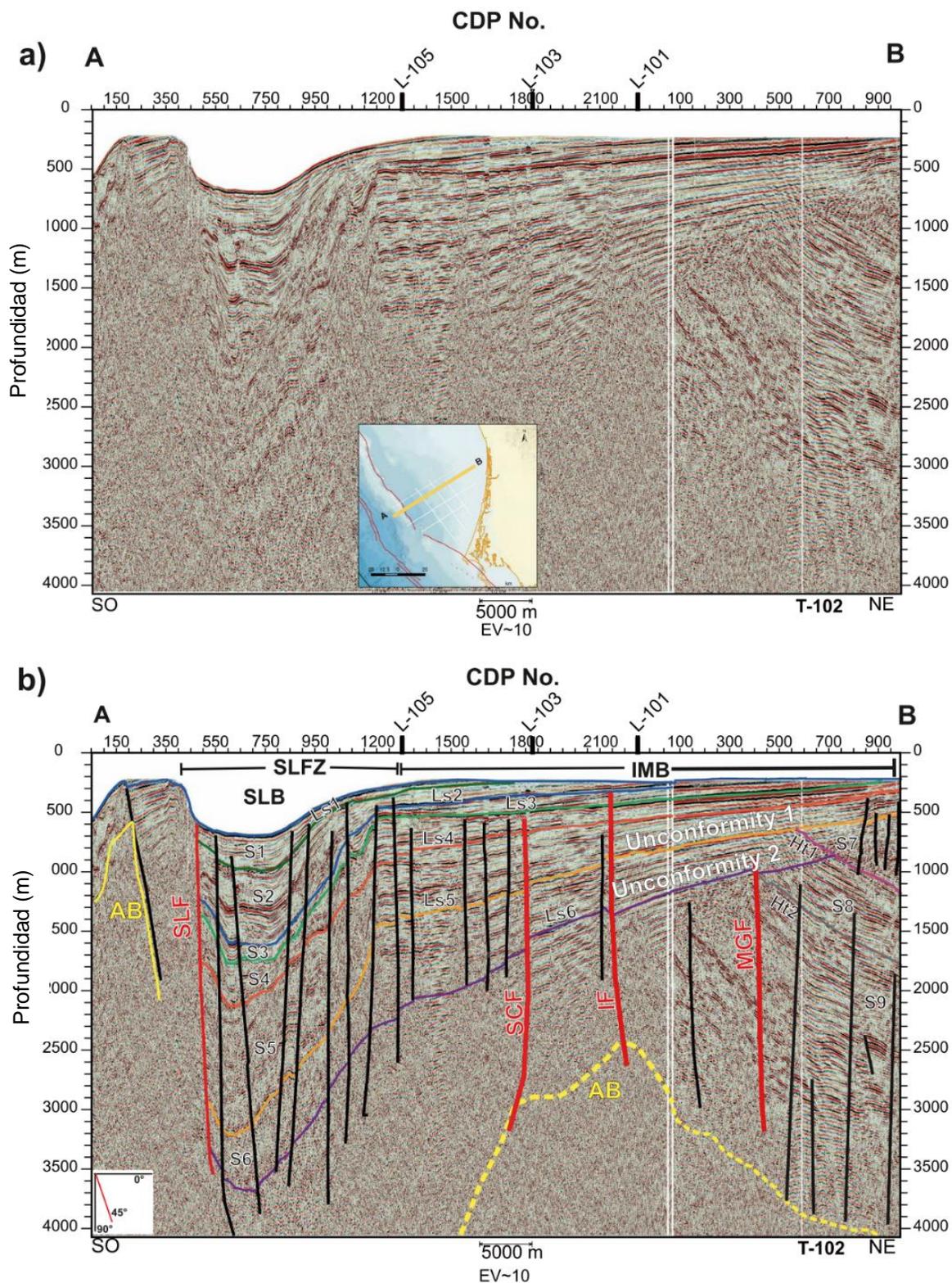


Figura 7. Resultados obtenidos por Gómez-Ávila et al. (2021). Se puede observar la presencia de lo que se interpreta como dos discordancias (unconformity 1 y 2, por su traducción en inglés), así como las diferentes secuencias sedimentarias. Cuenca San Lázaro (SLB por sus siglas en inglés), Cuenca Iray-Magdalena (IMB por sus siglas en inglés), Basamento Acústico (AB por sus siglas en inglés), Falla San Lázaro (SLF por sus siglas en inglés), Falla San Carlos (SCF por sus siglas en inglés), Falla Iray (IF por sus siglas en inglés), Falla Magdalena (MGF por sus siglas en inglés).

1.3 Hipótesis

La región mar adentro de la península de Baja California Sur ha sido estudiada por diferentes investigadores tales como: González-Escobar et al. (2016), Mastache-Román y González-Escobar (2020) y Gómez-Ávila et al. (2021); estos han presentado resultados, utilizando sísmica de reflexión, acerca de las estructuras que se encuentran en esa zona. Sin embargo, hay muy poca información acerca de las estructuras que se encuentran en la región costa adentro. Esto lleva a establecer el supuesto de que:

“En la región continental de la actual península de Baja California, se postula la presencia de estructuras sepultadas por sedimentos, como fallas y cuencas de antearco, que se formaron durante un periodo de subducción como régimen tectónico dominante. Estas estructuras aún no han sido caracterizadas ni documentadas en la literatura científica debido a la escasez de datos geofísicos, especialmente de sísmica de reflexión, en esta zona.”

Disponer de información sísmica del área antes mencionada nos da la oportunidad de poder caracterizar las estructuras que ahí se encuentran y así entender mejor los rasgos estructurales que la conforman. La sísmica de reflexión, será un método que nos ayudará a completar los objetivos planteados en este trabajo.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Caracterizar las estructuras en la región costa adentro de la península de Baja California, específicamente en la planicie de Ciudad Constitución, ubicada en la región Magdalena, mediante el procesamiento e interpretación de datos de sísmica de reflexión.

1.4.2 Objetivos específicos

- Interpretar las diferentes estructuras encontradas.
- Correlacionar las estructuras y sismoestratos con los diferentes perfiles utilizados.
- Conocer la geometría de las estructuras encontradas a través de la generación de un modelo 3D y auxiliado a través de datos gravimétricos y registros de pozos.

Capítulo 2. Metodología

La prospección sísmica a través de la sísmica de reflexión es un método del cual se han obtenido excelentes resultados para la exploración de zonas de hidrocarburos, así como para la caracterización de diferentes estructuras en diferentes regiones. A través de este capítulo se explicará la metodología utilizada para obtener los resultados de esta tesis; se explicará la adquisición y el procesamiento de los datos sísmicos, así como la incorporación de datos de registros de pozos, un mapa gravimétrico y la incorporación de múltiples líneas sísmicas procesadas previamente por PEMEX para su interpretación.

2.1 Sísmica de reflexión

Los métodos geofísicos se basan principalmente en medir las propiedades físicas del subsuelo para poder obtener las características de este. La sísmica de reflexión tiene como base la generación de ondas que se propagan a través del interior de la Tierra (zona de estudio de interés) y que son registradas en superficies (a través de los *geófonos*). La generación de las ondas se realiza a través de una fuente de energía inducida (pueden ser explosiones, golpes con martillos y para el caso marino, pistolas de aire) o a través de fuentes de energía controladas como lo son los *vibroseis* (para el caso terrestre).

En el proceso de adquisición de datos sísmicos, las ondas sísmicas generadas se propagan a través del subsuelo y son captadas en la superficie por una red de receptores llamados geófonos. Estos geófonos están dispuestos estratégicamente en la superficie terrestre a una distancia predeterminada entre ellos. En un caso ideal, los receptores medirían el tiempo de arribo de la onda reflejada (la cual es la de nuestro interés), sin embargo, se registra también el ruido sísmico, las ondas refractadas y las superficiales. Es por esto por lo que es necesario aplicar una serie de procesos y filtros para atenuar toda la información irrelevante en nuestros datos (ruido sísmico, ondas superficiales, errores del sensor, etc.) y resaltar la información de interés.

Este proceso de filtrado y mejora de los datos se lleva a cabo mediante diversas técnicas de procesamiento sísmico, incluyendo filtrado digital, eliminación de ruido coherente e incoherente, entre otros. Una vez que se ha realizado la corrección y procesamiento de los datos, se obtiene una imagen sísmica que representa las propiedades del subsuelo y que, como resultado final, es interpretada para darle un sentido geológico.

2.1.1 Base de datos

Los datos que se utilizaron en el presente trabajo fueron obtenidos a través de una campaña que realizó PEMEX (Petróleos Mexicanos) en la década de los 80's. Para la recolección de los datos se utilizaron 24 canales con 10 geófonos cada uno, 4 vibroseis con una frecuencia de barrido de 12-48 Hz y una longitud de barrido de 7 segundos. La frecuencia de muestreo fue de 4 ms para obtener una longitud de grabación de 4996 ms. Para las diferentes líneas sísmicas se utilizaron patrones de tiro lateral, aunque es importante decir que, para ciertas líneas, en ciertos disparos, el tendido fue diferente (bilateral o cambio de sentido) esto con la finalidad de seguir ciertos reflectores; las estaciones que contenían una fuente y receptores tenían un espaciamiento de 100 metros, en donde la ubicación de la fuente era paralela a los receptores.

Cada línea cuenta con un offset mínimo de 350 metros y un offset máximo de 2650 metros, cubriendo así 2300 metros de terreno. Con este arreglo se obtuvo un *fold* (apilamiento nominal) de 12, permitiendo mejorar la relación señal-ruido. En la tabla 1 se muestra la longitud que cubre cada línea, así como la suma lineal de los kilómetros obtenidos en total.

Tabla 1 Longitud de cada de una de las líneas sísmicas y la suma lineal de cada una de ellas.

Perfiles	Longitud lineal
Línea L-40	27 km
Línea L-17	61.5 km
Línea L1-DC	32 km
Línea L-28	42 km
Línea L-26A	25.5 km
Línea L-10	70 km
Línea L-9	31 km
L-9A	20.90 km
Total	309.9 km

Las líneas L-17 y L1-DC disponen de una orientación NE-SW al igual que las líneas L-9A y L-9. Por otro lado, las líneas L-40, L-28, L-26A y L-10 se ven orientadas con dirección SO-NE. La representación cartográfica del tendido sísmico en los mapas se generó utilizando las coordenadas de cada punto de disparo y estación, obtenidas (algunas) a través de las hojas del observador, asegurando así su correcta ubicación geográfica.

2.1.2 Procesado de los datos

El procesamiento de los datos se llevó a cabo con el software ProMax© (propiedad de LandMarkTM) en el laboratorio de procesamiento de datos sísmicos del CICESE. A través del programa ProMax© se pueden crear diferentes flujos de trabajo. En el flujo de trabajo se pueden ir agregando tareas que van seguidas de otras y que no empiezan hasta que la primera tarea es terminada; un flujo de trabajo fue creado para cada línea. Se siguió la metodología propuesta por Yilmaz (2001), siguiendo así cada una de las etapas que el autor propone, es decir: Pre-Apilamiento, Apilamiento y Post Apilamiento. En la figura 8 se puede observar el flujo de trabajo seguido para obtener las imágenes sísmicas.

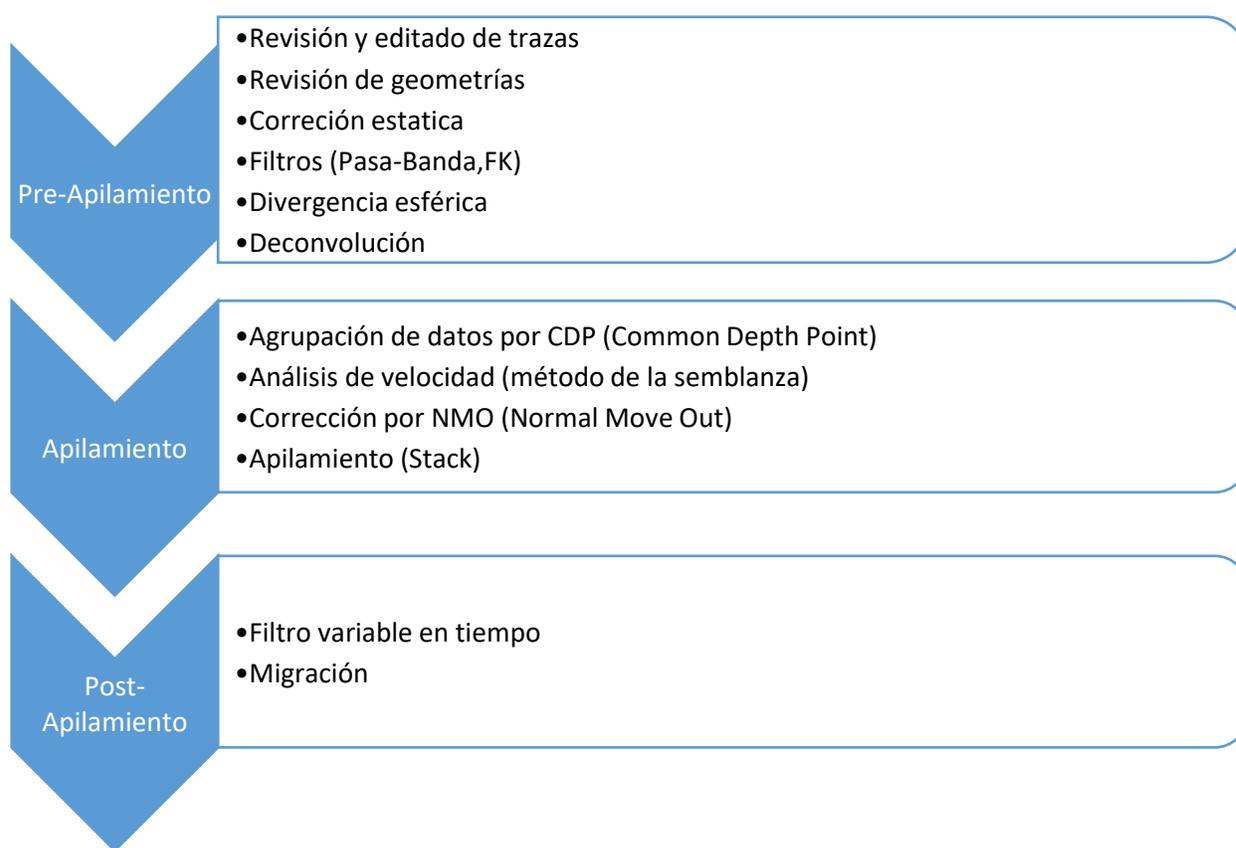


Figura 8 Flujo de trabajo para el procesamiento de datos sísmicos de acuerdo con Yilmaz (2001).

2.1.3 Pre-apilamiento

La primera fase del flujo de trabajo se denomina "Pre-Apilamiento" y comprende una serie de procesos destinados a revisar y editar los datos sísmicos antes de la etapa de apilamiento propiamente dicha. Durante esta fase, se realiza una minuciosa revisión de los datos para identificar y corregir posibles errores o anomalías que podrían afectar la calidad de la imagen sísmica final. El objetivo principal es asegurar que

los datos a apilar estén limpios y libres de ruido que puedan comprometer la interpretación y el análisis subsiguiente. Por lo tanto, es crucial realizar una exhaustiva revisión y edición de los datos antes del apilamiento para así, al asegurar que los datos estén limpios y de calidad óptima, se maximice la resolución y la fidelidad de la imagen sísmica resultante, lo que a su vez mejora la capacidad de identificar y caracterizar las estructuras subsuperficiales de interés geológico.

2.1.3.1 Revisión y editado de trazas

Previo al procesado, los datos fueron revisados. Los datos que se obtuvieron estaban grabados en el formato SEG-Y, el cual es un formato que propuso la Sociedad Geofísica de Exploración (SEG). Estos datos contienen en sus cabeceras cierta información (como la fecha de adquisición, coordenadas, frecuencia de muestreo, etc.). Una vez cargado los datos dentro del programa se procede a revisar las trazas, es decir, que toda la información sea legible, que no haya trazas dañadas (con alto contenido de ruido o incluso que la información no haya sido bien grabada), ya que, durante la adquisición de los datos, es normal que ocurran ciertos problemas técnicos. Durante la adquisición algunos de los problemas técnicos que pueden ocurrir son:

- Mal colocación de los geófonos
- Falla de algún geófono
- Humedad en el cableado
- Contaminación por ruidos rurales o urbanos

Una vez que la información es revisada con cautela se procede a identificar las trazas que contienen ruido o información que no es relevante y se aplican ciertos procesos como lo son: Trace Kill y Trace Mute.

- Trace Kill: Este proceso nos permite eliminar ciertas trazas que consideremos son irrelevantes o no ayudaran a obtener una imagen clara del subsuelo.
- Trace Mute: Con este proceso se puede generar un polígono que nos permita eliminar desde un punto hacia arriba, o desde un punto hacia abajo, cierta información.

La figura 9 nos muestra el ejemplo de cómo algunas trazas incluyen información irrelevante (ruido) para el estudio. Al identificar las trazas que no contienen información relevante para nuestro estudio se procede a aplicar los procesos de *Trace Kill* y *Trace Mute*.

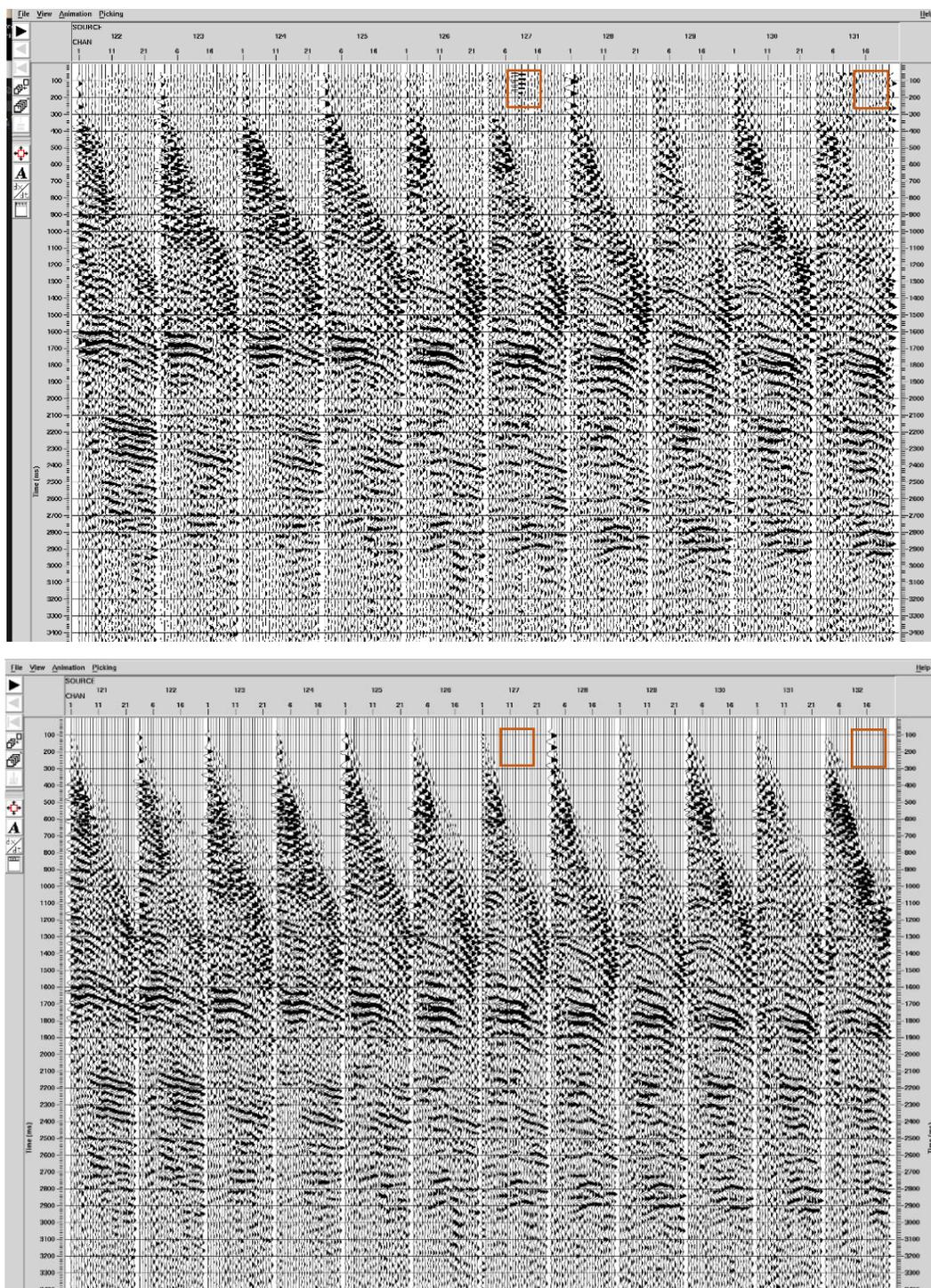


Figura 9. Trazas de la línea L-40. Se puede observar que las trazas con las fuentes número 127 y 131 contienen información innecesaria, esta información necesita ser removida para evitar problemas con pasos posteriores en el flujo de trabajo.

2.1.3.2 Asignación de geometría

El proceso de asignación de geometría consiste en ubicar cada disparo y cada geófono en su lugar correcto geográficamente. La asignación de geometría se considera un paso muy importante durante todo el procesado ya que para el proceso de apilamiento se necesita el CDP (Common Depth Point), el cual es el punto medio de las reflexiones generadas por diferentes tiros y que corresponden a un mismo punto en el terreno, y este se obtiene de la correcta asignación de la geometría.

En este trabajo la geometría se asignó a través del apoyo de las hojas del observador (aquellas hojas en las que se hacen anotaciones en tiempo real durante la adquisición de los datos) y a través de un mapa georreferenciado proporcionado por PEMEX. Las hojas del observador de las líneas L1-DC, L-9, L-28 y L-40 tenían los datos de altura, así como la correcta numeración y coordenadas en UTM de cada tiro y cada receptor. Para el caso de las líneas restantes (L-9A, L-10, L-17, L-26A) la información que venía en las hojas del observador era casi nula y muy complicada de interpretar, sin embargo, tenían referencias de un mapa hecho a mano con la ubicación de algunos puntos de tiro que permitió darnos una idea del tendido sísmico.

Para las líneas en las que la hoja del observador no fue útil se utilizó el mapa proporcionado por PEMEX, el cual incluía la ubicación general de las líneas en un archivo .shp en formato de líneas. Posteriormente se procedió, a través del uso del programa ArcGIS PRO, a convertir las líneas a puntos, los cuales se espaciaron cada 100 m y a partir de un modelo de elevación digital con una resolución de 5 metros se obtuvieron sus coordenadas y sus datos de elevación para así asignar la geometría.

La geometría para cada línea se generó a través del algoritmo del programa proMAX© llamado "2D Land Geometry Spreadsheet" en el cual es necesario definir ciertos parámetros como: el tipo de fuente que se utilizó, el offset, el espaciamiento entre fuentes y cargar una tabla con los datos de las coordenadas y los datos de altura de cada línea. Una vez agregado estos datos, se procede a realizar un "binado" de los datos, el cual no es más que el cálculo de las coordenadas del CDP para cada disparo y receptor; esto se graba en una base de datos que contiene esta información y que se utilizará más adelante para realizar el apilamiento. Al terminar la asignación de la geometría en la gráfica de las trazas aparece una bandera pequeña (Fig. 10) que indica que el proceso se realizó correctamente.

2.1.3.3 Corrección estática

Mediante la asignación de la geometría en los datos sísmicos, es posible identificar los cambios de elevación en las fuentes y estaciones debido a la topografía irregular del terreno en el que se encuentran ubicadas. Estas variaciones de altura pueden ocasionar diferencias en los tiempos de llegada de las reflexiones (Yilmaz, 2001). Con el objetivo de corregir este efecto, se realiza la corrección estática que busca alinear verticalmente la posición de las estaciones. Tras aplicar esta corrección, se considera que tanto las fuentes como los receptores se encuentran referenciados en un mismo punto, lo que permite corregir el desfase en los tiempos de llegada de las reflexiones

2.1.3.4 Aplicación de filtros

Una vez que los datos han sido revisados, corregidos y asignados con una geometría se procede a realizar la aplicación de ciertos filtros para mejorar la señal de interés. El objetivo principal de aplicar los filtros es atenuar el ruido y resaltar las reflexiones. Primero se procede a obtener un espectro de frecuencia, el cual nos indica el rango de frecuencias en que se encuentra nuestra señal de interés, para nuestro caso, el rango de frecuencias de la mayoría de nuestros datos sísmicos se encontraba entre los 10-55 Hz.

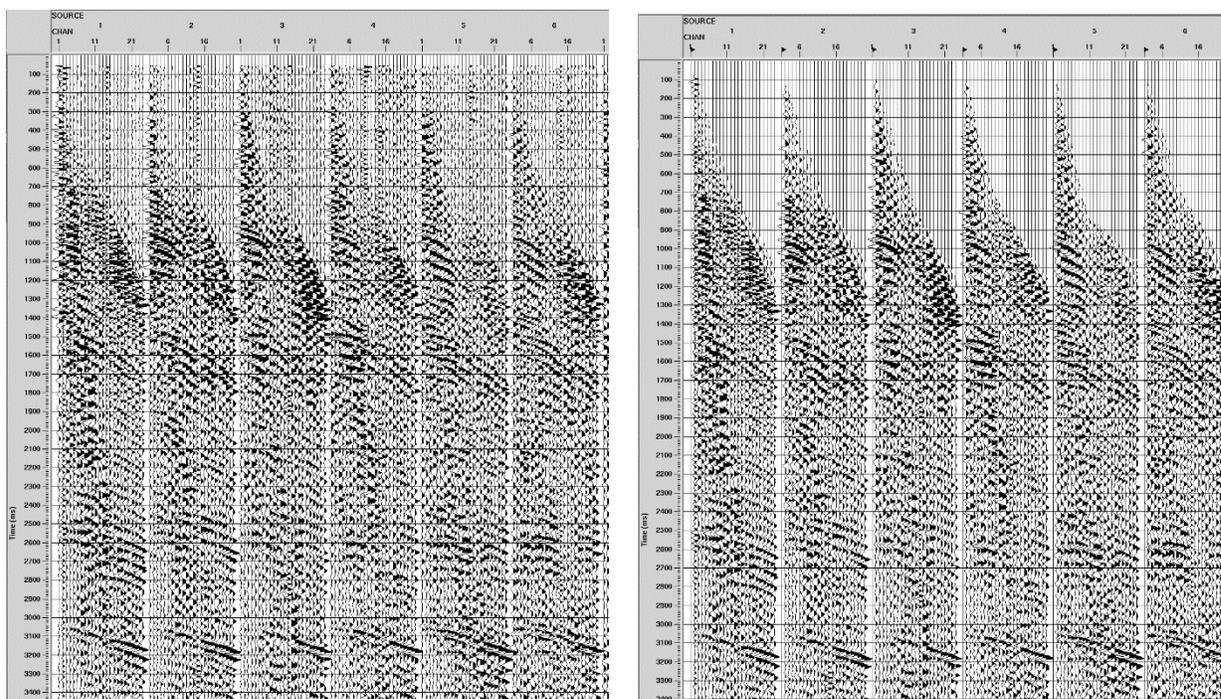


Figura 10. Filtrado de datos. La figura de la izquierda representa los datos originales, sin la aplicación de algún proceso. En la figura de la derecha se puede observar el registro sísmico con el filtro pasa banda aplicado, así como los procesos de top mute y trace kill, así mismo aparece la bandera pequeña que indica que la asignación de la geometría fue correcta.

Se procedió a aplicar un filtro pasa banda, el cual permite pasar la señal que se encuentra definido en nuestro ancho de banda y son rechazadas aquellas frecuencias que no estén en este rango y que principalmente puedan provenir del ruido sísmico, las ondas superficiales o algún defecto del aparato. La figura 10 muestra un ejemplo de cómo se ven las trazas antes y después de aplicar un filtro. Una vez aplicado el filtro se vuelve a producir un espectro de frecuencias, para confirmar que esta vez se resaltan más las frecuencias de interés y por último se aplica un filtro F-K, este filtro permite eliminar el ruido coherente que se presenta a su vez con una tendencia lineal.

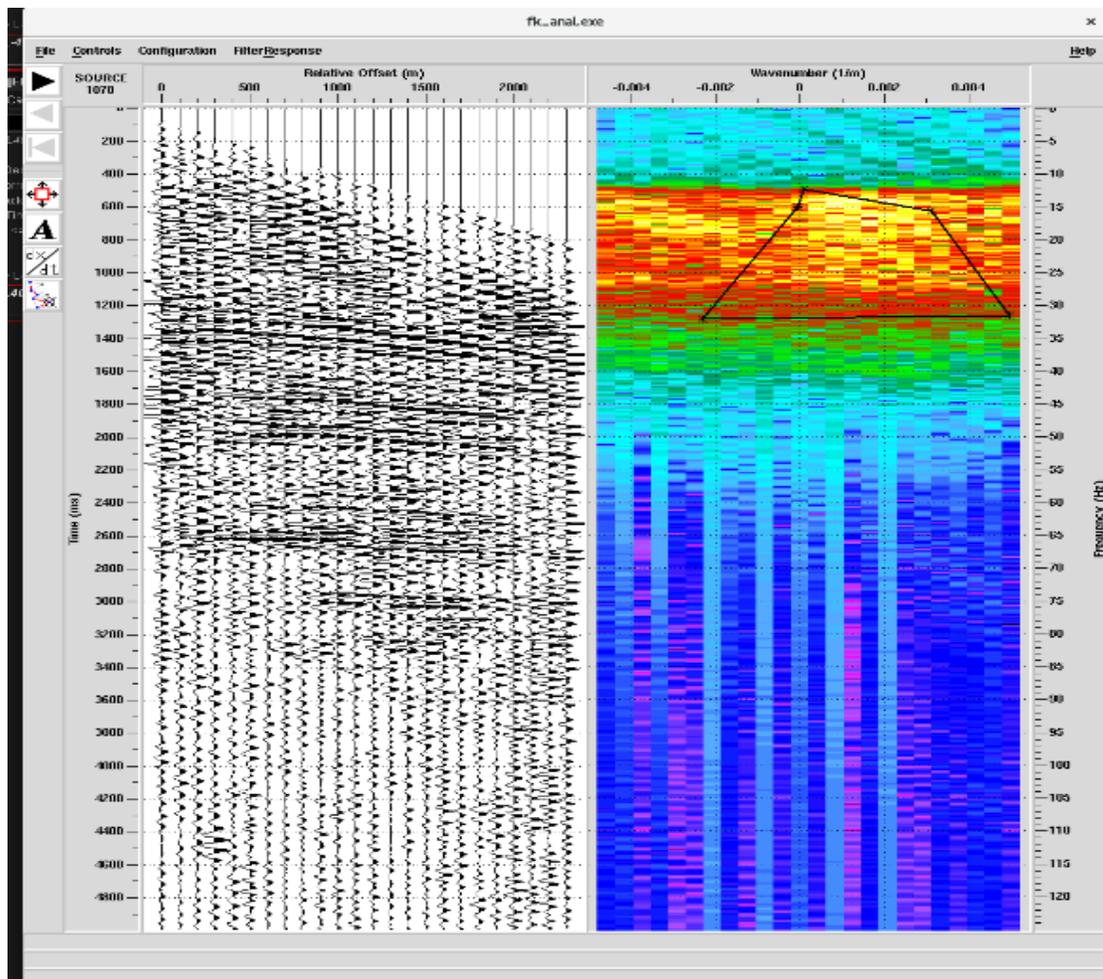


Figura 11. Representación del proceso de filtrado a través del filtro F-K, en el cual se puede generar un polígono para seleccionar el área que contiene las ondas con número de onda de nuestro interés.

El filtro F-K opera en el espacio del número de onda k y la frecuencia, en el que las ondas se representan con cierta pendiente. Las ondas superficiales (o ground roll) se representan con ángulos menores, asociadas a la baja velocidad y las reflexiones tienen ángulos mayores. En la figura 11 se puede observar cómo opera el algoritmo del programa utilizando el filtro F-K, el cual permite generar un polígono en el

que se selecciona un área en la cual se permite dejar pasar las frecuencias y número de ondas que se encuentran dentro del polígono. El filtro F-K permite también atenuar el aliasing espacial y las ondas superficiales, mejorando la resolución de los datos.

2.1.3.5 Divergencia esférica

A medida que las ondas sísmicas se van propagando a través del medio, la energía de estas se ve afectada por la atenuación, principalmente por el fenómeno de la *divergencia esférica*. La *divergencia esférica* se presenta en el frente de ondas por suponer que la fuente es puntual y genera ondas esféricas.

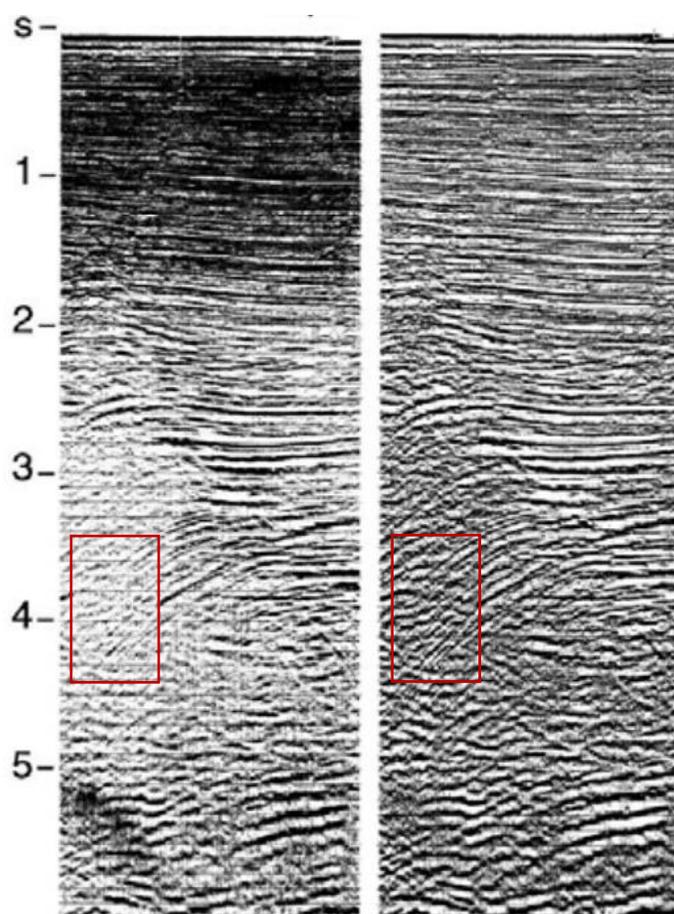


Figura 12. Representación gráfica de una sección sísmica antes y después de aplicar la corrección por divergencia esférica. Tomado de Yilmaz (2001).

En el caso de un medio homogéneo la amplitud de las ondas decae con la relación $\frac{1}{r}$, en donde r es el radio del frente de ondas (Stein y Wysession, 2005). Para reducir estos efectos se aplican diferentes algoritmos,

en nuestro caso utilizamos la función llamada *control automático de ganancia* (*automatic gain control*, por sus siglas en inglés AGC), el cual toma el valor medio de las amplitudes en una ventana de tiempo antes definida y se obtiene la relación entre el RMS de las amplitudes deseado y el valor promedio antes obtenido. Este valor se asigna a la función de ganancia, la cual se aplica a cada traza dentro de la ventana de tiempo definida. En la figura 12 se puede observar la diferencia entre una imagen sísmica antes del filtro y después del filtro.

2.1.4 Deconvolución

El proceso de deconvolución puede ser aplicado en diferentes etapas del procesamiento, es un paso que se utiliza para restaurar la señal a su forma original, es decir, sin que se vea afectada por los efectos de la fuente y el medio por donde se propaga. La figura 13 ilustra una imagen sísmica antes y después de la deconvolución. Ya que la Tierra está compuesta por diferentes estratos con diferentes densidades y las velocidades de las ondas varían conforme estas densidades, se podría decir que la señal que se registra es el resultado de la convolución de la señal con el medio. Esta relación se puede expresar de la siguiente manera:

$$x(t) = w(t) * e(t) + n(t) \quad (1)$$

en donde:

$x(t)$ es la señal que se presenta en el sismograma

$w(t)$ es la fuente que genera la energía

$e(t)$ es la respuesta del medio

$n(t)$ es el ruido aleatorio.

2.1.5 Apilamiento

La etapa del apilamiento es la etapa en la que las trazas previamente procesadas se suman para mejorar la relación señal-ruido y así mejorar la calidad de los datos sísmicos. En esta etapa se incluyen los procesos de agrupar los datos por CDP (Common Depth Point, por sus siglas en inglés) y realizar un análisis de velocidad para realizar la corrección por normal move-out (NMO, por sus siglas en inglés).

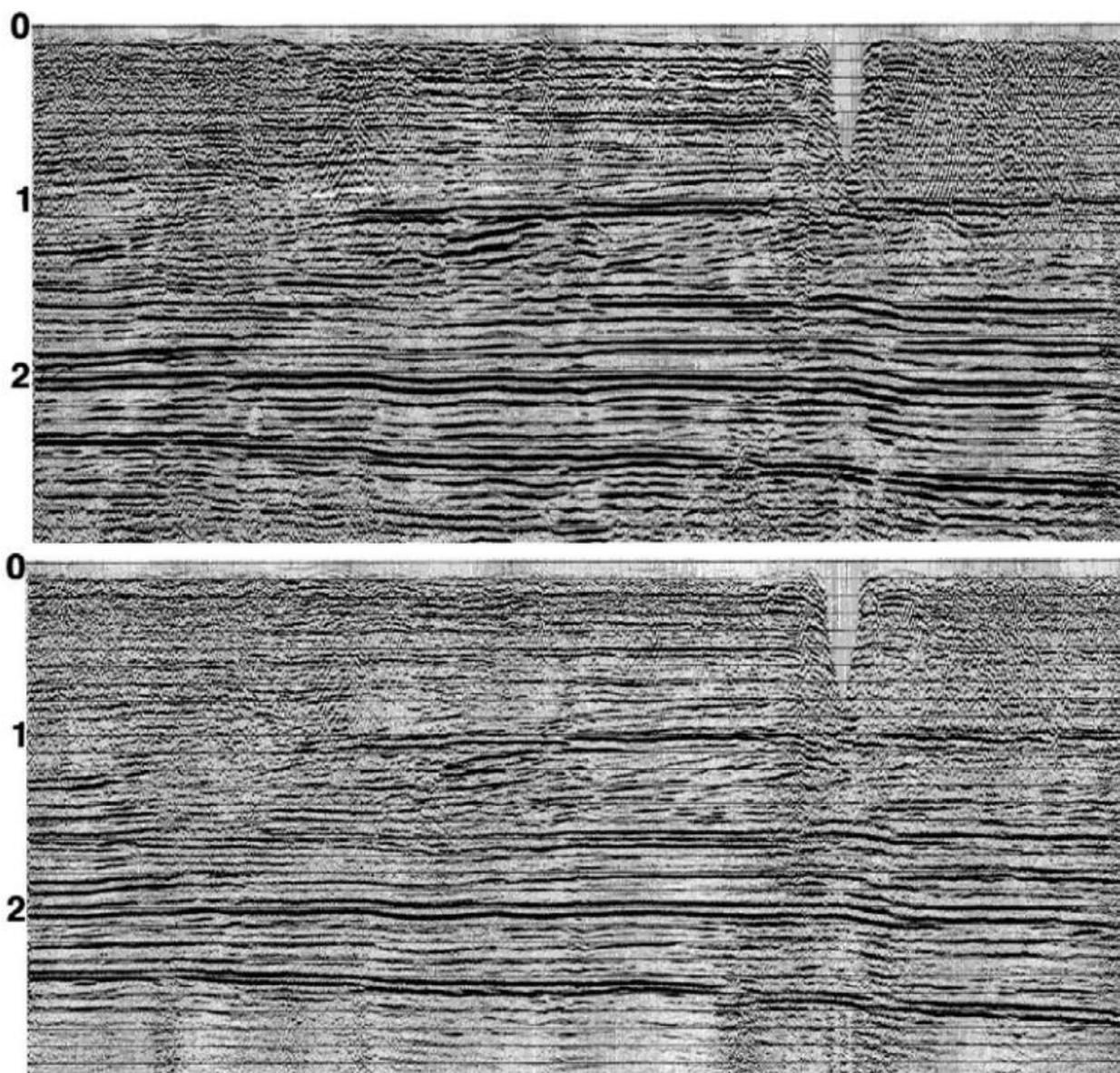


Figura 13. Sección sísmica antes y después de aplicar la deconvolución. La imagen superior muestra la sección sísmica sin el proceso de la deconvolución y la imagen inferior muestra la misma sección, pero ahora deconvolucionada. Las unidades de la imagen son segundos (s). Tomado de Yilmaz (2001).

2.1.5.1 Agrupamiento por CDP

Antes de realizar la suma de las trazas (apilamiento) es necesario agrupar los diferentes registros sísmicos de acuerdo con el punto en profundidad común en donde se generó la reflexión, este proceso es conocido como agrupamiento por CDP (Common Depth Point) y su proyección en superficie se conoce como CMP (Common Mid Point). Geométricamente el CDP se encuentra en un punto medio entre la fuente y el receptor. La figura 14 es una representación gráfica del CDP. El propósito de este paso es mejorar la relación señal-ruido, sin embargo, el agrupar los datos por CDP no es lo único que se necesita hacer para

poder sumar las trazas. Antes de sumar las trazas, a los grupos de CMP es necesario corregirles los tiempos de arribo de las reflexiones ya que estas presentan variaciones debido al aumento en la distancia entre la fuente y los diferentes receptores. Las variaciones en los tiempos de arribo que se presentan en los grupos de CMP se representan con una trayectoria hiperbólica y para corregir estas trayectorias es necesario conocer la velocidad con la que se propagan través los estratos.

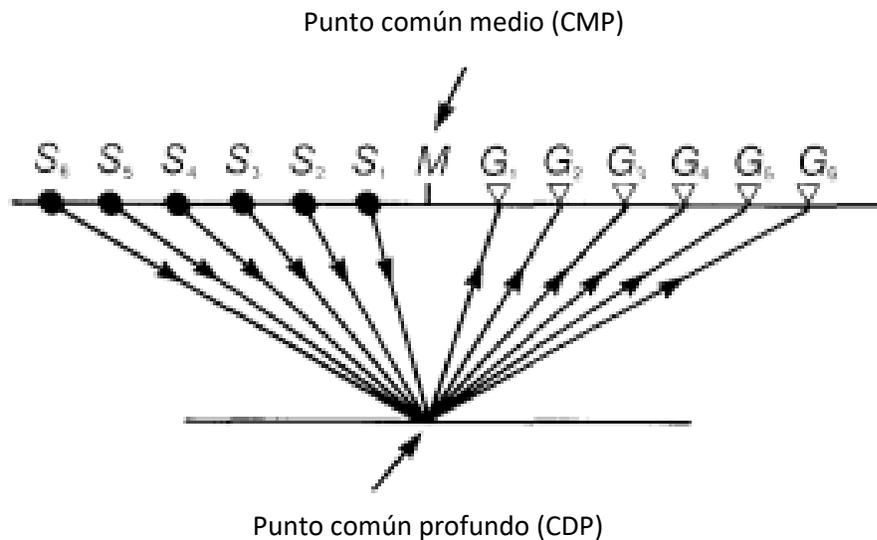


Figura 14. Ubicación geométrica de los CMP y CDP. El procesamiento de los datos en la etapa del apilamiento se produce principalmente en estos grupos. Tomado y modificado de Yilmaz (2001).

2.1.5.2 Análisis de velocidad

El análisis de velocidad es el preámbulo para realizar la corrección a las trayectorias hiperbólicas que se generan en las diferentes reflexiones debido al desfasamiento del tiempo de arribo por el aumento en la distancia entre los pares fuentes-geófonos. Las velocidades obtenidas a través del análisis de velocidad se utilizan para generar la mejor imagen sísmica posible. En este estudio, se llevó a cabo el análisis de velocidad a partir del método conocido como *método de la semblanza*. Este método se basa en obtener la mejor coherencia entre las señales a lo largo de las trayectorias hiperbólicas y se representa en un espectro de velocidades, donde la coherencia máxima se muestra como altos valores de energía, lo cual indica una velocidad de propagación aproximada a través del medio (Yilmaz, 2001). Este proceso se aplica a los grupos de CDP previamente generados, lo que permite mejorar la calidad de los datos sísmicos y determinar la velocidad existente entre las diferentes capas del subsuelo. La Figura 15 exhibe un ejemplo del espectro

de velocidades resultante, donde se efectúa un muestreo de las velocidades en función de los altos valores de energía, los cuales indican una mayor coherencia entre las hipérbolas. Estos valores de velocidad se utilizan para crear un modelo de velocidades (Fig. 16), el cual se utilizará posteriormente para la corrección de NMO. El modelo de velocidades obtenido a partir del método de la semblanza es el que se utilizará para realizar la corrección por NMO, lo cual permite eliminar el carácter hiperbólico de las reflexiones sísmicas.

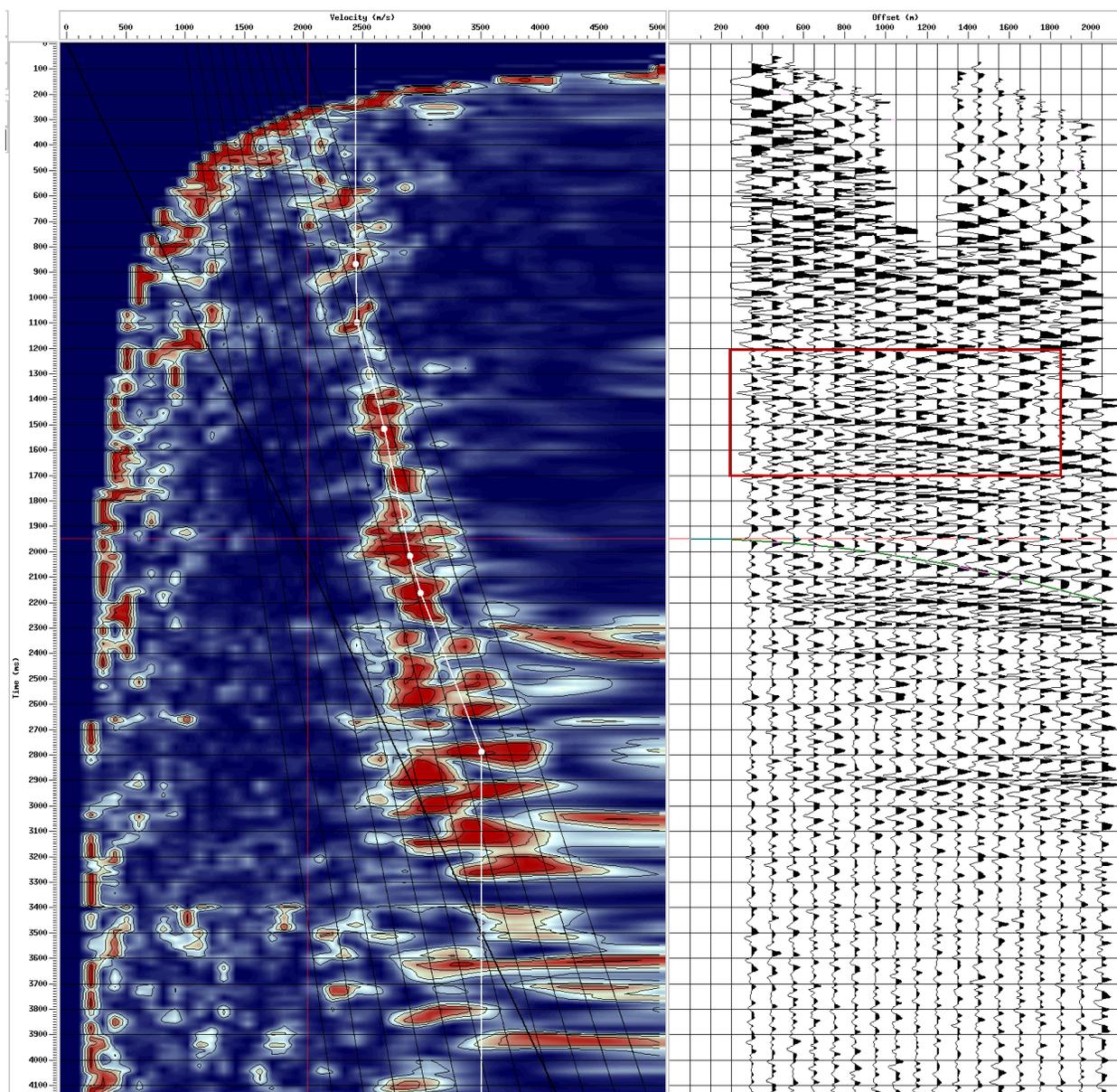


Figura 15. Espectro de velocidades de la línea L-17 generado a partir del método de la semblanza. Los colores rojos representan los altos valores de energía que indican reflexiones. Del lado derecho de la imagen, en el recuadro rojo, se pueden observar los diferentes arribos de las ondas antes de ser corregidos por NMO.

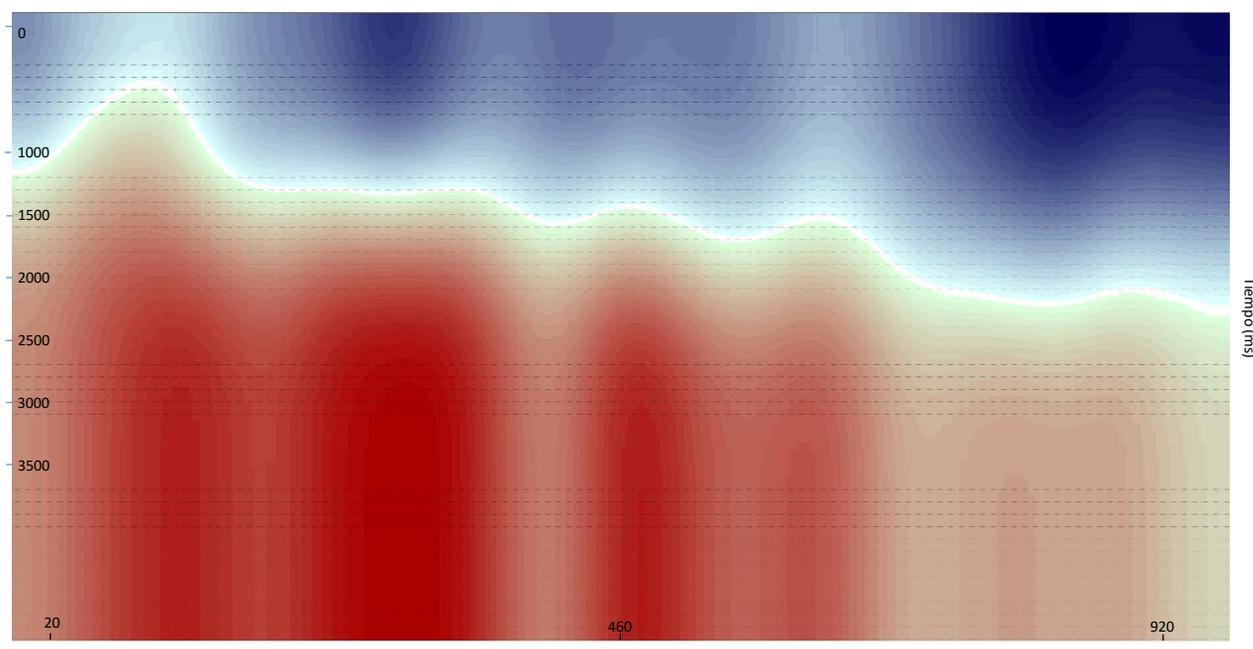


Figura 16. Modelo de velocidades de la línea L1-DC generado a partir de las velocidades obtenidas por el método de la semblanza.

2.1.5.3 Corrección por NMO (Normal Move Out)

Como se ha mencionado previamente, los tiempos de arribo de las reflexiones sísmicas experimentan un desplazamiento debido a la distancia (offset) entre la fuente sísmica y los receptores en superficie. Este fenómeno es conocido como "Normal Move Out" (NMO) y se manifiesta en los registros sísmicos mediante la aparición de curvas en forma de hipérbolas. Para corregir esta distorsión causada por el NMO, es esencial aplicar una la corrección por NMO, cuyo propósito es compensar el efecto provocado por la separación espacial entre la fuente sísmica y los receptores (Yilmaz, 2001).

La corrección por NMO requiere de un modelo de velocidades que permita transformar las reflexiones hiperbólicas a una forma horizontal, lo que posibilita su correcta superposición. La obtención de este modelo de velocidades se logra mediante el análisis de velocidad. Una vez aplicada la corrección por NMO, las reflexiones sísmicas son ajustadas y apiladas, lo que resulta en una imagen sísmica más precisa y coherente. La figura 17 ejemplifica el resultado obtenido después de la aplicación de la corrección por NMO. La corrección por NMO es una etapa esencial en el procesamiento de datos sísmicos, ya que permite obtener imágenes más fidedignas del subsuelo y facilita la interpretación geológica.

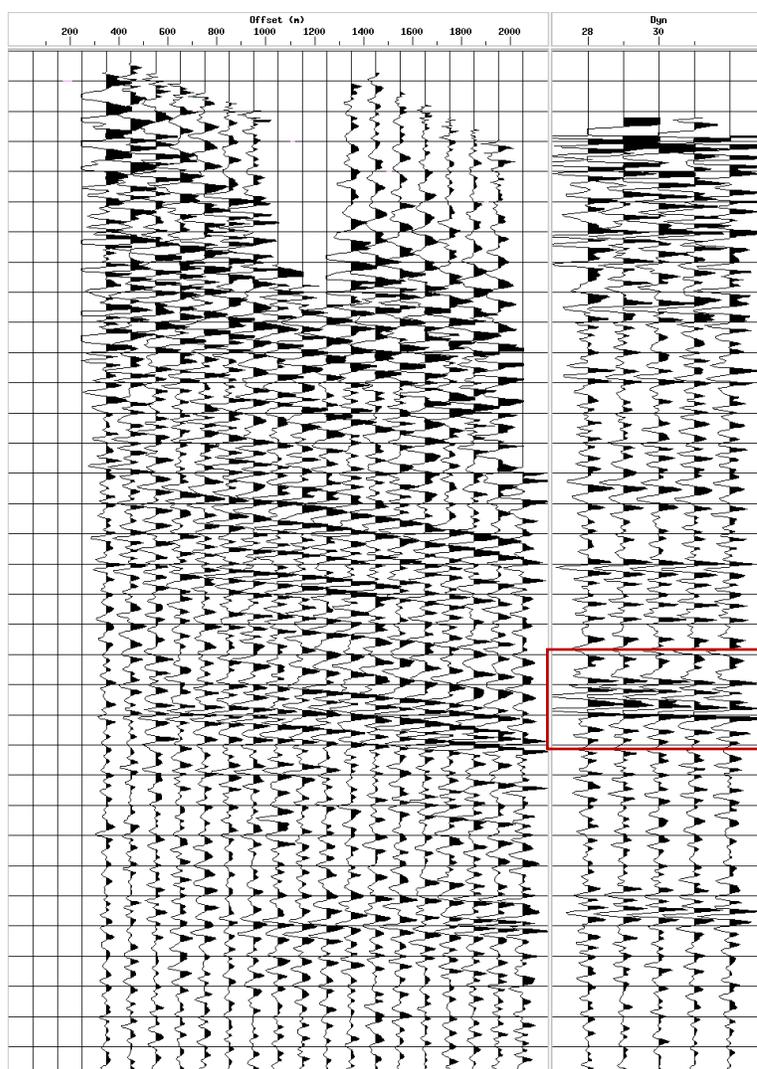


Figura 17. Corrección por NMO. Se puede observar del lado derecho la figura, en el recuadro de color rojo, como se corrigen las reflexiones hiperbólicas a una manera horizontal.

2.1.5.4 Apilamiento

El apilamiento constituye la parte final de la etapa central del procesado, cuyo objetivo principal es mejorar la relación señal-ruido. Este proceso se basa en la suma de las trazas corregidas por NMO, lo que resulta en una mejora significativa en la calidad de los datos. Como resultado del apilamiento, se obtiene una sección apilada (Fig. 18) que proporciona una representación visual preliminar del subsuelo. Esta sección apilada permite realizar una interpretación geológica inicial, facilitando la visualización de los reflectores y estructuras de interés.

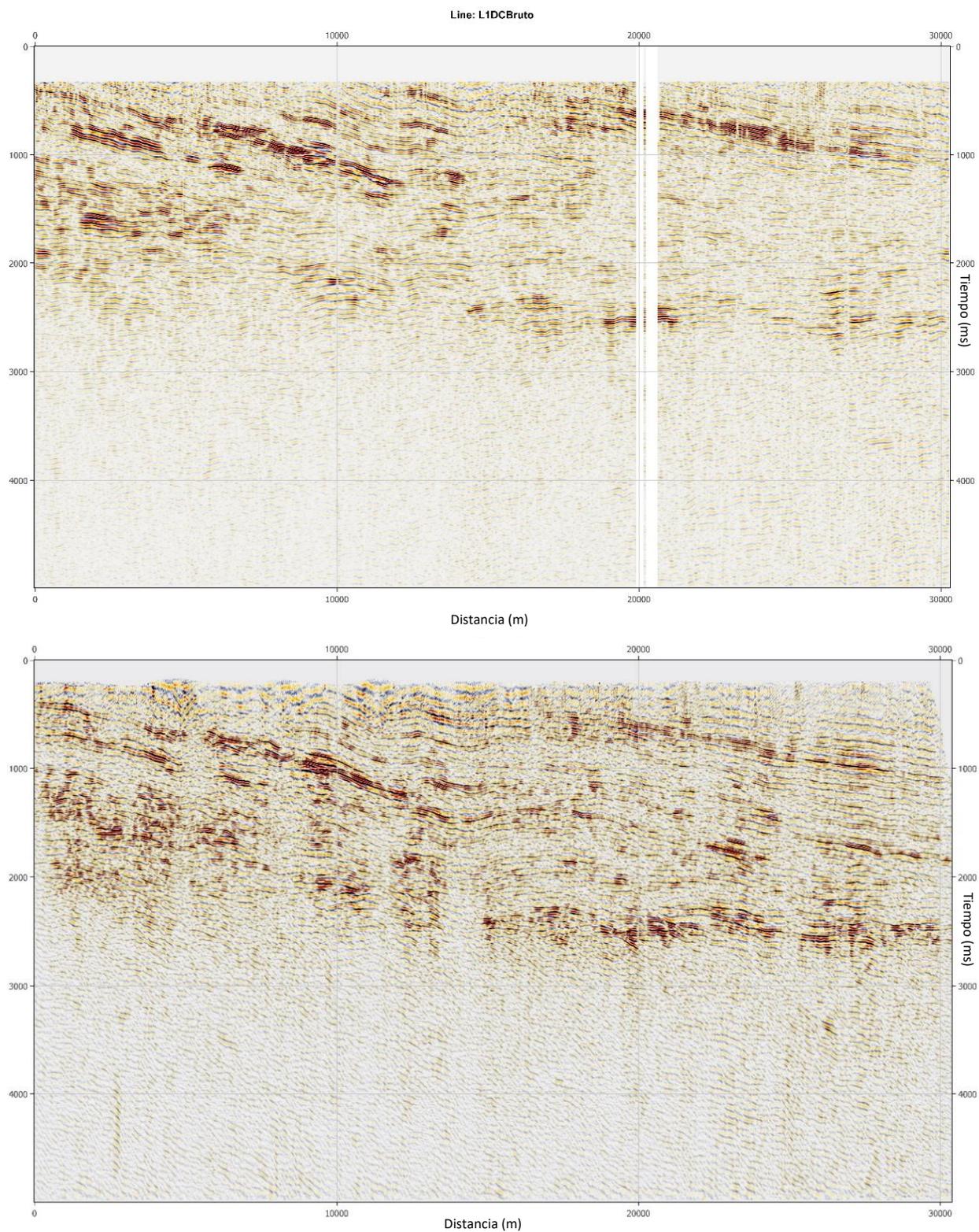


Figura 18. Comparación entre la sección apilada obtenida de la línea L1-DC, antes con un modelo de velocidades propuesto (sin análisis de velocidad) figura superior) y después (figura inferior) de la aplicación del modelo de velocidades obtenido a partir del análisis de velocidades. En la imagen inferior, se pueden apreciar de manera más clara los reflectores y sus variaciones laterales y verticales. Esta mejora en la visualización permite una mejor identificación y caracterización de las estructuras geológicas presentes en el subsuelo.

2.1.6 Post-Apilamiento

La etapa final del procesamiento de datos permite mejorar la imagen sísmica obtenida previamente, de manera que, los reflectores de interés se asemejen lo más posible a su ubicación real en profundidad. La aplicación de un filtro variable en el tiempo y el proceso de migración son fundamentales en esta etapa. La migración permite corregir los rayos que no se propagan verticalmente debido a la presencia de discontinuidades inclinadas ya que, durante el apilamiento, pueden aparecer inclinaciones ficticias que se pueden corregir mediante este proceso. Además, la migración mejora la resolución horizontal y suprime las difracciones generadas por la presencia de cuerpos pequeños.

2.1.6.1 Filtro variable en tiempo

El espectro sísmico, especialmente en la gama de altas frecuencias, se ve afectado por el fenómeno de absorción causado por la atenuación intrínseca de la Tierra (Yilmaz, 2001). El filtro variable en tiempo suprime bandas de frecuencias ruidosas que se producen durante el apilado y mejoran la calidad de los datos sísmicos.

2.1.6.2 Migración

El objetivo principal del proceso de migración es obtener una sección apilada que se asemeje a la estructura geológica original debajo de las líneas sísmicas. Las difracciones en la sección apilada pueden surgir debido a cambios en la inclinación de los reflectores, lo cual puede complicar la interpretación de las imágenes sísmicas. La migración colapsa estas difracciones, permitiendo una interpretación geológica más clara y precisa de las imágenes resultantes. Por lo general, se busca obtener una representación de la imagen sísmica en términos de profundidad; sin embargo, debido a las limitaciones en la precisión de los datos de velocidad obtenidos, es común utilizar la escala de tiempo como una alternativa, tal como se ha hecho en el presente estudio de investigación. Se han desarrollado diversos algoritmos con el fin de obtener una representación precisa de las estructuras subsuperficiales. Uno que destaca es el algoritmo conocido como *Migración de Kirchhoff*, el cual permite migrar las secciones apiladas a partir de la suma de las difracciones presentes en las mismas (Yilmaz, 2001).

2.2 Interpretación sísmica

La interpretación sísmica desempeña un papel fundamental en la extracción de información geológica a partir de datos indirectos obtenidos mediante métodos geofísicos. Mediante el análisis de las características sismoestratigráficas y los rasgos estructurales presentes en las imágenes sísmicas resultantes del procesamiento de los datos, es posible otorgar un significado geológico a las observaciones realizadas. En el presente estudio, se llevó a cabo la interpretación siguiendo la metodología propuesta por Badley (1987) así como el uso del programa OpendTect propiedad de dGB Earth Sciences. Este enfoque metodológico proporciona una base sólida para el análisis y la interpretación de los datos sísmicos, permitiendo así una comprensión más profunda de los aspectos geológicos involucrados.

2.2.1 Resolución sísmica

Según Yilmaz (2001), la resolución sísmica, tanto en términos verticales como horizontales, se refiere a la capacidad de discernir entre dos horizontes sísmicos con características distintas. La resolución sísmica vertical se define como la mínima separación vertical requerida para que dos reflexiones sean diferenciables, mientras que la resolución sísmica horizontal determina la mínima proximidad horizontal entre dos puntos para que puedan ser reconocidos como entidades separadas. De acuerdo con Yilmaz (2001) la resolución vertical (tabla 2) está relacionado con la longitud de onda dominante (λ) y se describe a partir de la siguiente formula:

$$rv = \frac{\lambda}{4} = \frac{v}{4f} \quad (2)$$

Mientras que la resolución horizontal (tabla 3) está en función de la velocidad de las ondas sísmicas (v), el tiempo de viaje doble (t) y la frecuencia dominante (f), la siguiente ecuación describe cómo se calcula:

$$rh = \frac{v}{2} \sqrt{\frac{t}{f}} \quad (3)$$

La calidad de las secciones sísmicas a ser interpretadas está directamente asociada con la resolución sísmica. En el caso de nuestro estudio, la resolución vertical obtenida a partir de nuestros modelos de velocidades nos ha permitido identificar reflectores hasta una profundidad de 4 segundos de tiempo doble de viaje. Las tablas 2 y 3 pueden funcionar para calcular la resolución vertical y horizontal de acuerdo con diferentes combinaciones de frecuencia y velocidad comunes.

Tabla 2 Valores de la resolución vertical de acuerdo con frecuencias y velocidades comunes. rv : resolución vertical. λ : longitud de onda. v : velocidad de las ondas sísmicas en el medio. f : frecuencia dominante.

Resolución vertical		
$rv = \frac{\lambda}{4} = \frac{v}{4f}$		
$v(\text{m/s})$	$f(\text{Hz})$	$rv(\text{m})$
2000	50	10
3000	40	18
4000	30	33
5000	20	62

Tabla 3 Valores de la resolución horizontal de acuerdo con las frecuencias y velocidades comunes. rh : resolución horizontal. t : tiempo de viaje doble. v : velocidad de las ondas sísmicas en el medio. f : frecuencia dominante.

Resolución horizontal			
$rh = \frac{v}{2} \sqrt{\frac{t}{f}}$			
$t(\text{s})$	$v(\text{m/s})$	$f(\text{Hz})$	$rh(\text{m})$
1	2000	50	141
2	3000	40	335
3	4000	30	632
4	5000	20	1118

2.2.2 Discordancia

La discordancia es una discontinuidad estratigráfica caracterizada por una relación geométrica no paralela entre dos unidades estratigráficas adyacentes. En esta relación, los estratos inferiores y superiores presentan una falta de continuidad y la superficie de contacto entre ellos corresponde a una superficie de erosión, indicando un período de erosión y remoción selectiva de sedimentos antes de la deposición de los estratos suprayacentes (Tarbuck y Lutgens, 2005). Existen diferentes tipos de discordancias, por mencionar algunas de acuerdo con Tarbuck y Lutgens (2005), existen:

- Discordancia angular: Discordancia en la que los estratos más viejos se inclinan con un ángulo diferente al de los más jóvenes.
- Discordancia paralela erosional: Aquella en la que los estratos se mantienen de manera paralela por debajo y encima de una superficie de erosión.

La figura 19 ilustra la formación de una discordancia angular.

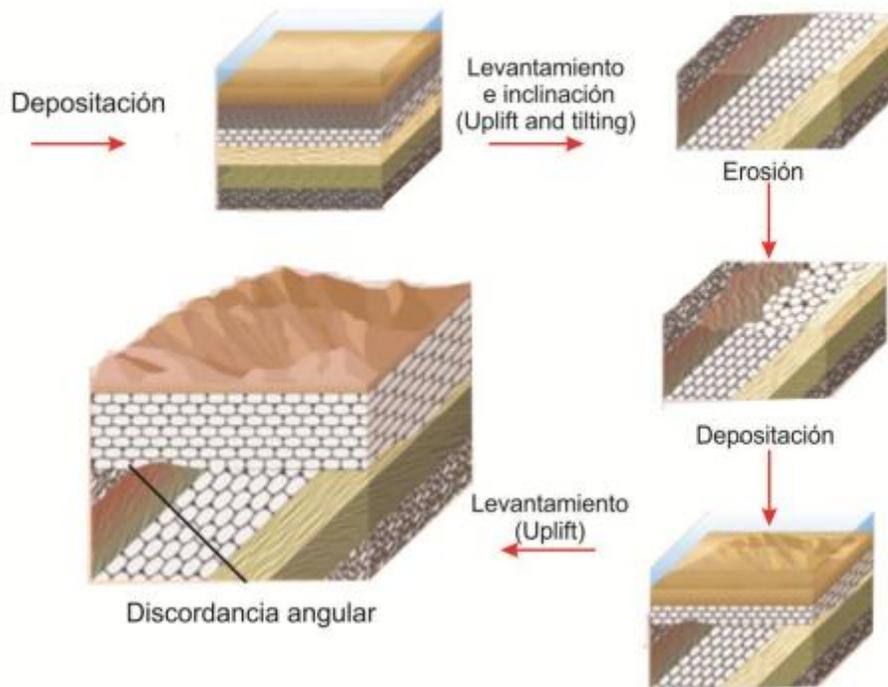


Figura 19 Generación de una discordancia angular. Tomada de Caldwell (1997)

2.2.3 Interpretación de horizontes y fallas

La interpretación de los rasgos estructurales observados en las imágenes sísmicas obtenidas se fundamentó en la identificación de horizontes sísmicos y la detección de fallas. La interpretación de las fallas implica la observación de discontinuidades o cambios bruscos en los horizontes, mientras que la interpretación de los horizontes se basa en la evaluación de su continuidad (Badley, 1987).

Además de evaluar la continuidad de los horizontes para su interpretación, se utilizó la estratigrafía de secuencias y el análisis de facies sísmicas. La estratigrafía de secuencias permitió la definición de horizontes en función de superficies de discontinuidad que agrupan reflexiones que son relativamente

concordantes y poseen características similares. Por otro lado, el análisis de facies sísmicas se basó en la descripción de los horizontes a partir de características sísmicas de las reflexiones, como amplitud, frecuencia, continuidad y velocidad de intervalo, que conforman una secuencia sísmica (Vera-Torres, 1994). La figura 20 ilustra diferentes patrones de secuencias sísmicas.

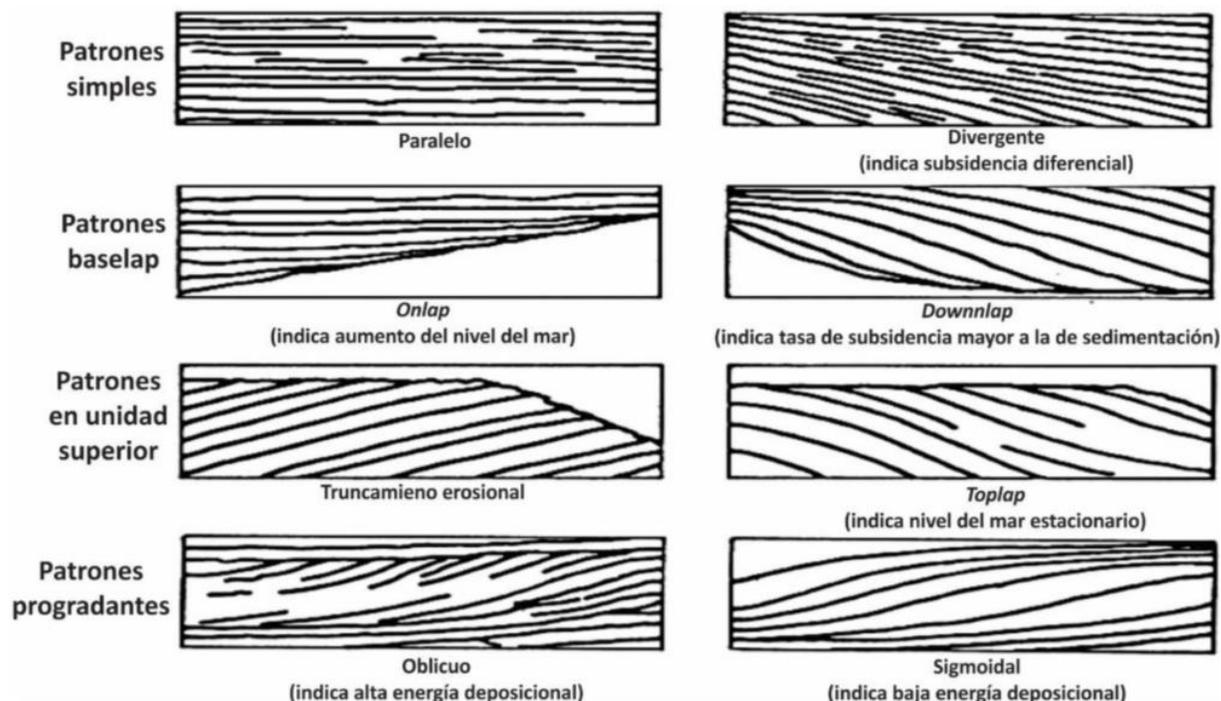


Figura 20. Patrones de secuencias sísmicas. Modificado de Sheriff (2002)

2.3 Mapa gravimétrico

Además del procesamiento de los datos sísmicos para la obtención de las imágenes sísmicas se elaboró un mapa de gravedad para correlacionar los datos. El mapa de gravedad represente la anomalía de Bouguer que permite ver la diferencia de densidades entre un cuerpo y el área que lo rodea, despreciando los efectos de la altura por el relieve de la zona.

El mapa se realizó a partir de una anomalía de Aire Libre tomada de Sandwell et al. (2014) la cual se procesó en el software *Oasis Montaj* propiedad de *Geosoft 2003*, el cual permite generar la anomalía de Bouguer. En la siguiente sección se muestran los resultados obtenidos y cómo están correlacionadas las anomalías con nuestros datos.

2.4 Registros de pozos

Los registros de pozos proporcionan información fundamental a la hora de caracterizar geológicamente una región. Para este estudio se contó con la información de 4 pozos (Fig. 21) (propiedad de PEMEX) que cercanos a nuestra zona de adquisición. Los registros de pozos presentan información de resistividad, potencial espontáneo y rayos gamma (sólo 1 de los 4). A partir de estos registros se puede obtener información litológica, así como los cambios entre horizontes. En la figura 21 se muestran los registros utilizados para este estudio.

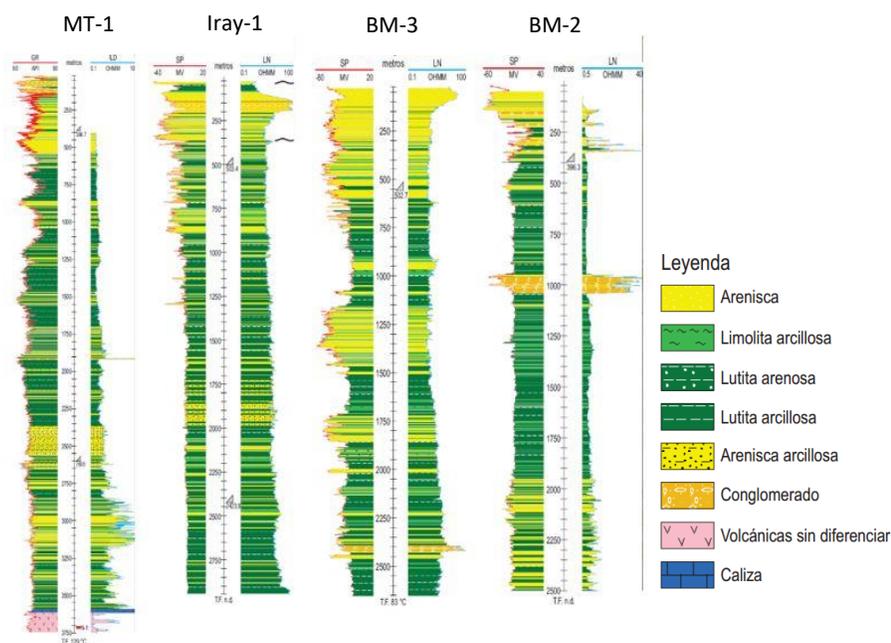


Figura 21. Registros de los pozos utilizados en el presente trabajo. Su localización geográfica se encuentra en la figura 22. MT-1 Matancitas-1. BM-3 Bahía Magdalena-3. BM-2 Bahía Magdalena-2.

2.5 Perfiles complementarios procesados

De manera similar a la información derivada de los registros de pozos, se obtuvieron 7 líneas sísmicas proporcionadas por PEMEX, las cuales ya habían sido sometidas a procesamiento previo y se encuentran dentro del área de estudio. Estas líneas sísmicas no habían sido interpretadas previamente, por lo que este paso se realizó en el presente trabajo. La interpretación de estas líneas permitió una mejor correlación con los datos de las 8 líneas sísmicas procesadas en este trabajo, lo que condujo a la generación de un modelo tridimensional más robusto de las características geológicas de la región. La figura 22 muestra un mapa que ilustra la ubicación de las líneas sísmicas proporcionadas por PEMEX.

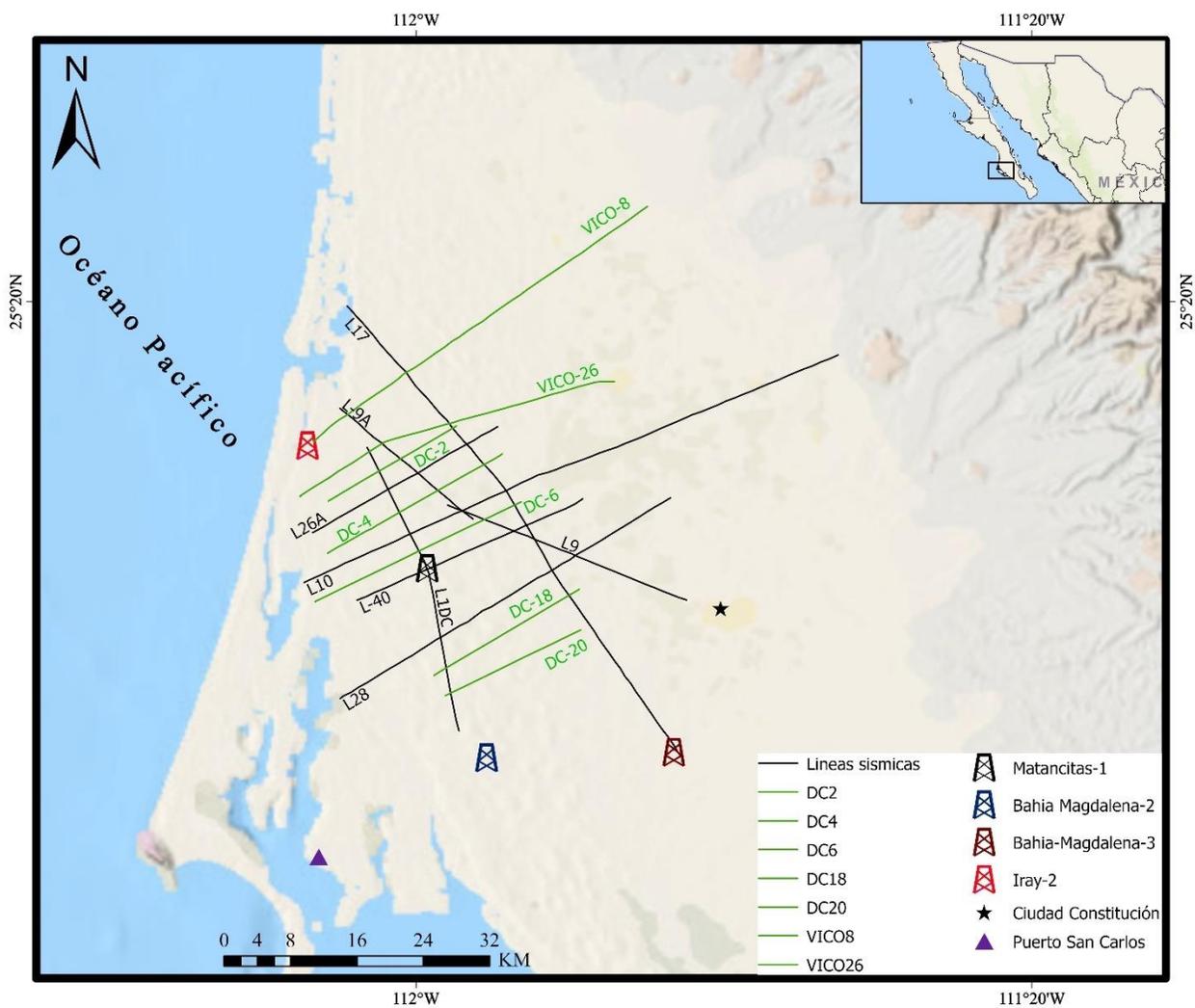


Figura 22. Ubicación de las líneas proporcionadas por PEMEX (líneas verdes).

Capítulo 3. Resultados

En este capítulo se exponen los resultados derivados del procesamiento y la interpretación sísmica, así como del mapa gravimétrico que facilitó la correlación de la información obtenida en los pasos anteriores. Además, se presenta un modelo tridimensional (Fig. 31 y 32) que se generó a partir de la integración de toda la información obtenida lo cual permitió obtener una visión más detallada de la geometría de los horizontes interpretados.

3.1 Perfiles sísmicos

Como se menciona en el capítulo 1, nuestra área de estudio abarca una región de Ciudad Constitución en Baja California Sur (figura 1) y está cubierta por perfiles sísmicos que abarcan una superficie lineal de aproximadamente 310 km. En este capítulo se hablará primero de los perfiles que tienen una orientación principal *Suroeste-Noreste* (L-40, L-28, L-26A y L-10) y después de las líneas que tienen una orientación preferencial *Noreste-Sureste* (L-17, L-10, L-9, L-9A). En este capítulo se presentan las imágenes sísmicas que resultan del procesado y sus interpretaciones correspondientes.

3.1.1 Perfiles con orientación Suroeste-Noreste

3.1.1.1 Perfil L-40

El perfil L-40 (Figura 22) posee una extensión de 27 kilómetros y se encuentra alineado hacia la dirección de la sierra La Giganta. Transversalmente, cruza los perfiles L1-DC, L-17 y L-19, y en su intersección con el perfil L1-DC se ubica el pozo Matancitas-1, el cual penetra el basamento en esta zona de la región. Tanto el perfil L-40 como el L1-DC fueron fundamentales para llevar a cabo la interpretación, ya que disponen del registro de rayos gamma, el cual permite la identificación de cambios litológicos y la propia litología. El rasgo estructural más importante de esta sección sísmica es la presencia de una falla tipo inversa, esta falla se encuentra entre los CDP 1140 y 1115, se extiende desde los 1000 ms hasta los 3000 ms y cuenta con un buzamiento aparente de 39° NE. Esta falla controla lo que se infiere es el depocentro de una cuenca y por lo tanto la subsidencia de los sedimentos hacia el mismo.

Además de la presencia de la falla, se interpretaron 5 límites de secuencias que permitieron definir 6 horizontes (incluyendo el basamento). Los límites se definieron de acuerdo con la amplitud de los reflectores sísmicos y a la correlación con el registro de pozos sísmicos. La resolución de la imagen sísmica en la porción occidental del perfil, entre los CDPs 1277-1215, muestra una reducción en la amplitud de las reflexiones. Esta disminución puede deberse a la falta de contrastes en la impedancia acústica causada por los sedimentos en esta región. Esta situación dificultó la identificación precisa de la continuidad de las secuencias sísmicas en dicho segmento del perfil. No obstante, mediante la correlación con los demás perfiles interpretados, fue posible inferir esta continuidad.

El horizonte H-1 representa al basamento, el cual por el registro de pozos se sabe que es un basamento cristalino. Este horizonte se ve cortado por la falla, la cual generó un levantamiento de los sedimentos hacia la parte oeste. Entre los CDPs 1190-1177 se presenta un ligero levantamiento estructural que deformó parte de la secuencia sedimentaria y que genera una configuración interna caótica, interrumpida y discontinua en las facies sísmicas.

En el capítulo siguiente se discutirá el origen de este levantamiento. Las unidades H-2 a H-6 se interpretaron con base a la continuidad y amplitud de las facies sísmicas en los límites de las secuencias, así como la correlación con la identificación de los mismos horizontes en las líneas sísmicas que se interceptan. En el límite entre H-2 y H-3, a partir de los CDP 1227-1215, no hay continuidad en la secuencia estratigráfica, esto se interpretó como una discordancia angular (discordancia 1).

Se interpretó también, al tener una terminación "onlap" en la interacción entre la cima de H-4 y la base de H-5, en los CDP's 1202-1190, una discordancia (discordancia 2) del mismo tipo que la discordancia 1, esto se pudo correlacionar con base a la información del registro de pozos (Fig. 23 a). Los horizontes presentan una configuración interna paralela, semicontinuos y de amplitud moderada hacia el este de la cuenca, donde la depositación fue uniforme. Se sabe por el registro de pozos de esta sección que H-1 y H2 son del Cretácico inferior, los horizontes H-3, H-4 y H-5 pertenecen al Cretácico superior, mientras que H-6 es de edad cenozoica, del Paleoceno.

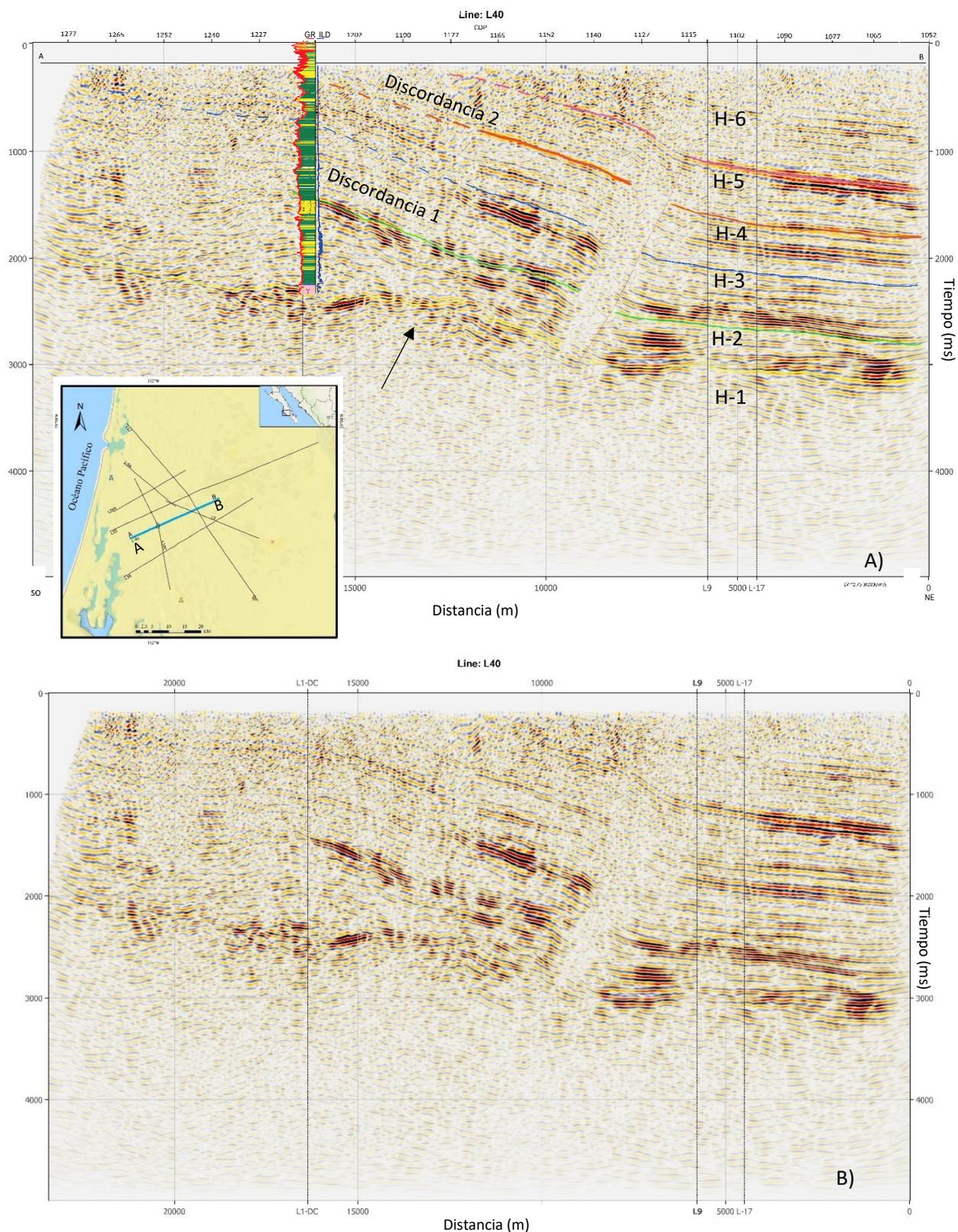


Figura 23. Línea sísmica L-40. El mapa insertado indica su ubicación. A) Se presentan los horizontes interpretados, así como el registro de pozos de la zona (ajustado a la escala de la imagen sísmica), la presencia de la falla y las discordancias presentes en esta sección. B) Imagen sísmica sin interpretar.

3.1.1.2 Perfil L-28

El perfil L-28 tiene una longitud de 48 kilómetros y está ubicado paralelamente a L-40 hacia el sur, tiene intersecciones con L1-DC, L-17 y L-9. Para esta línea el pozo más cercano es el mismo que para L-40 sin embargo, desde la intersección con L1-DC hacia el sur, a una distancia de 15.5 kilómetros se encuentra el pozo Bahía Magdalena-2, los cuales sirvieron como complemento para la interpretación. La figura 24 muestra la interpretación realizada, así como un mapa con su ubicación geográfica. En esta sección sísmica se hace presente también la falla de tipo inversa que controla el depocentro de la cuenca y la acumulación de los sedimentos hacia el este. Esta falla se encuentra entre los CDP 208-169 y tiene una longitud que va desde los 1000 ms a los 2800 ms (TVD).

Al igual que en L-40, se interpretaron 5 límites de secuencias que permitieron definir 6 horizontes (incluyendo al basamento). El límite de secuencia de color amarillo, el cual representa a la cima del basamento (H-1), presenta una configuración interna caótica y de baja amplitud entre los CDP 377-221. Se infirió la continuidad de este horizonte a partir de la intersección con L1-DC y la correlación con la línea paralela (L-40).

Se puede notar que se hace presente el levantamiento y la falla que se encuentra en la parte oeste del perfil antes mencionado, permitiendo correlacionar este rasgo estructural. Hacia el final del perfil, a partir del CDP 195, todas las unidades presentan inclinación y buzamiento hacia el noroeste, causado por la falla presente en la región. Se mantiene una configuración interna paralela, semicontinua y de alta amplitud en todos los horizontes entre los CDP 182-1.

El horizonte H-2, definido por el límite de secuencia de color verde (cima) y color amarillo (base), presenta un espesor semi constante entre los CDP 156-1 y va aumentando entre los CDP 302-178. Entre los CDP's 325-312, el horizonte H-2 presenta un cambio en la dirección de las reflexiones y truncamiento con las facies sísmicas que están por encima de la cima, lo cual se interpreta como la discordancia 1.

En la base (color naranja) del horizonte H-5, entre los CDP's 286-221, hubo pérdida de amplitud y se genera una terminación "onlap" al igual que en la línea previa, interpretando esto como la discordancia 2. Los horizontes H-3 hasta H-6 mantienen un mismo espesor a lo largo de toda la sección sísmica, así como alta amplitud y semi continuidad (la cual se ve afectada por la intercalación de diferentes litologías de acuerdo con los registros de pozos).

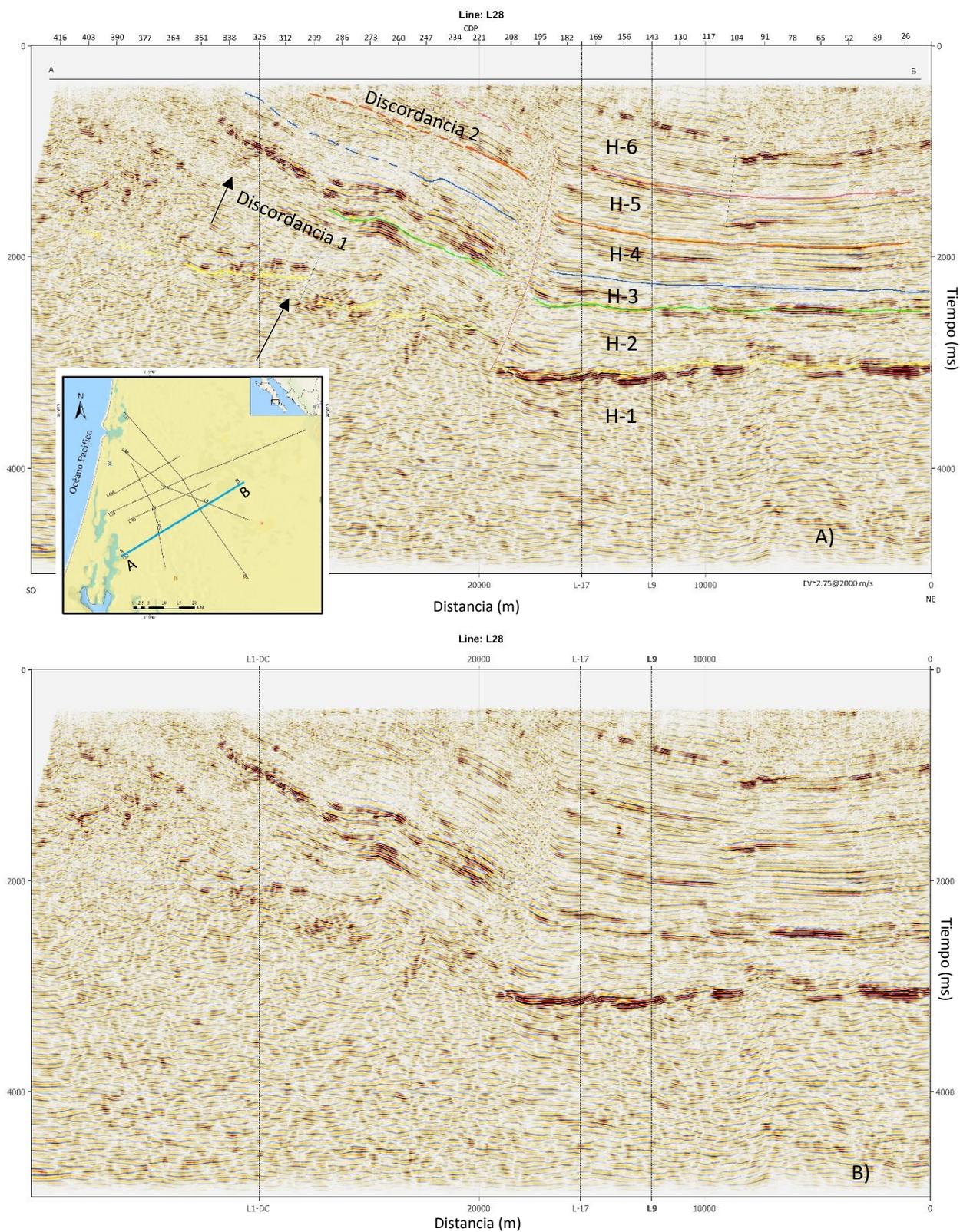


Figura 24. Imagen sísmica de L-28. El mapa insertado muestra su ubicación. A) Se presentan los horizontes interpretados, así como la falla y las discordancias presentes en esta sección. B) Sección sísmica sin interpretar.

3.1.1.3 Perfil L-26A

La sección sísmica del perfil L26-A se presenta en la figura 25. El perfil tiene una longitud de 25.5 kilómetros, es paralelo a L-10, L-28 y L-40. Se encuentra en la sección más al norte de nuestra región de estudio. Está orientada hacia el este, al igual que los perfiles mencionados previamente y sólo se ve interceptado por las líneas L-9A y L-17.

Este perfil se muestra de manera difusa y con baja amplitud, posiblemente por la adquisición de los datos en campo y las propiedades del subsuelo en esa región. Las líneas blancas que se observan entre los CDP 114-138 representan la falta de datos en esta parte del perfil, así como lo es en los CDP 258-270.

A pesar del carácter difuso de esta sección, se pudo interpretar la falla que aparece en los perfiles L-40 y L-28, confirmando la presencia de esta falla a través de todos los perfiles que tienen orientación Suroeste-Noroeste, también se identificaron los 5 límites de secuencias que aparecen en los demás perfiles.

Entre los CDPs 258-294 la configuración de los horizontes mantiene un espesor constante y con las mismas características sismo-estratigráficas que se observan en los perfiles anteriores. A partir del CDP 222 hacia el CDP 114 la amplitud de la sección sísmica es baja y las facies sísmicas presentan un patrón caótico y discontinuo.

A partir de la intercepción con L1-DC y L9A se infirió la continuidad de los límites de secuencias sísmicas. No se pudo interpretar la falla que se encuentra hacia el oeste en los perfiles L-40 y L-28, pero sí se pudo identificar la discordancia 1, de acuerdo con el cambio en la dirección y la discontinuidad de las secuencias de las reflexiones en la cima del horizonte H-2. Así mismo se interpretó la discordancia 2 al identificar una terminación “onlap” en la base del horizonte 5, tal como se había identificado en los perfiles anteriores.

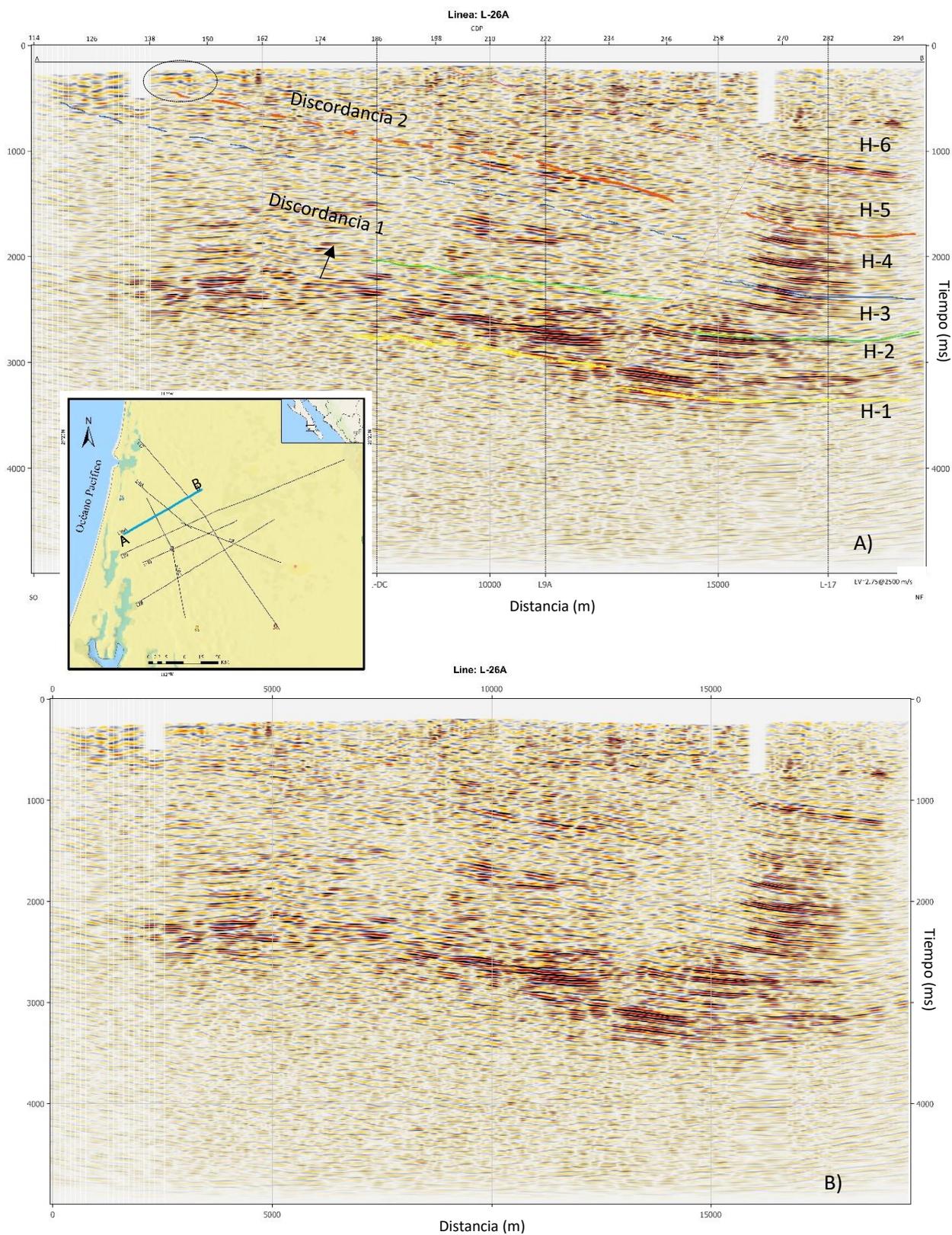


Figura 25. Imagen sísmica de L-26A. El mapa insertado indica su ubicación (línea marcada en azul). A) Se presentan los horizontes interpretados, la falla y las discordancias presentes en esta sección. B) Imagen sísmica sin interpretación.

3.1.1.4 Perfil L-10

El perfil sísmico L-10 presenta una extensión de 70 kilómetros, lo que lo convierte en el más extenso de nuestra área de estudio, proporcionándonos una visión más profunda de la geología interna del continente y definiendo el límite oriental de la cuenca. Se encuentra alineado de forma paralela a otras líneas sísmicas de orientación Suroeste-Noroeste, con la sierra La Giganta como su límite oriental y el inicio de la costa del océano Pacífico como límite occidental. La figura 26 muestra la interpretación realizada y la ubicación geográfica con respecto a otras líneas sísmicas.

Hacia el oeste de esta línea, específicamente entre los CDPs 226-394, se observa una baja amplitud en la sección sísmica desde los 1000 ms hacia abajo, lo que dificulta la interpretación en esa región. No obstante, gracias a la intersección de L1-DC, L9 y L9-A, fue posible inferir la ubicación y continuidad de los límites de secuencias en esa zona. El cambio en el buzamiento de los estratos se interpreta como resultado del movimiento del bloque debido a la presencia de la falla identificada en otras secciones sísmicas, la cual se estima con una longitud aproximada de 2000 ms.

Hacia el centro de la sección sísmica, específicamente entre los CDPs 478-534, se observó una falta de datos representada por los espacios en blanco en la sección. Sin embargo, esta carencia de información no afectó significativamente la calidad general de la sección. En esta misma región, el espesor de los horizontes se mantuvo constante, conservando las mismas características sismoestratigráficas que se observaron en las secciones previas.

Hacia el suroeste de esta sección, mediante la correlación con las demás líneas sísmicas y basándonos en el cambio en la dirección de las secuencias sísmicas sobre la cima de H-2, se pudo interpretar la presencia de la Discordancia 1. Además, se identificó el acuñamiento y un cambio en las facies sísmicas, que pasaron de ser semi paralelas continuas a facies subparalelas interrumpidas sobre la base de H-5, representando la Discordancia 2.

A partir del CDP 730 hacia el final de la línea, se observó un levantamiento de los horizontes y una disminución en el espesor, atribuido al efecto del levantamiento estructural causado por la presencia de la sierra La Giganta. La geometría del basamento en esta sección mostró ser irregular y difícil de interpretar debido a la baja amplitud y continuidad de las secuencias sísmicas en H-1, por lo cual fue necesario inferir esta información a partir de la intersección con las demás líneas sísmicas.

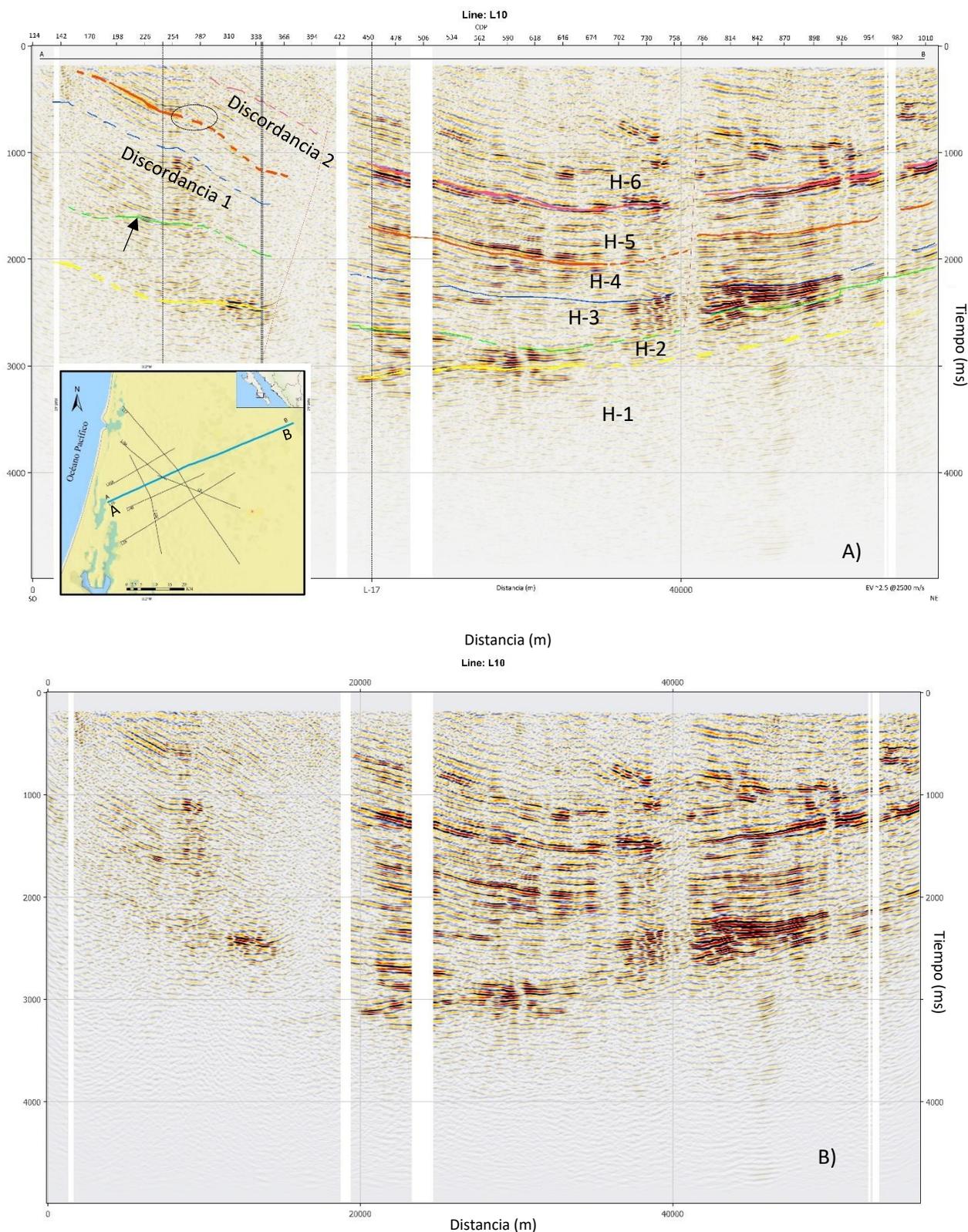


Figura 26. Imagen sísmica interpretada de L-10. El mapa insertado indica su ubicación (línea marcada en azul). A) Se presentan los horizontes interpretados, así como la presencia de la falla. El círculo remarca el cambio en el patrón de reflexión que indica la presencia de la discordancia 2 y la flecha negra indica la discordancia 1. B) Imagen sísmica sin interpretar.

3.1.2 Perfiles con orientación Noroeste-Sureste

3.1.2.1 Perfil L1-DC

El perfil L1-DC, con una extensión de 32 kilómetros, se encuentra orientado hacia el suroeste y es el más próximo a la costa en nuestra zona de estudio. Es atravesado por la mayoría de los perfiles, a excepción de L-9, L-9A y L-10. En la intersección con L-40, se presenta un quiebre que modifica ligeramente la dirección del tendido sísmico. Este perfil dispone de información del pozo Mantancitas-1, lo que permitió obtener datos litológicos de esta sección.

A través de la correlación e interpretación basada en la continuidad y amplitud de los sismorefltores, se identificaron 4 límites de secuencias que definen 5 horizontes (Fig. 27), los cuales ya han sido presentados en perfiles anteriores (H-1 a H-5). Entre los CDP 842-556, se observa una disminución de los espesores hacia el noroeste, indicando la profundización de los sedimentos en esa dirección. Los horizontes presentan una semi continuidad con pequeñas discontinuidades, cambios sutiles de amplitud y configuración interna semi paralela.

Estos rasgos, de acuerdo con el registro de pozos, son atribuidos a la intercalación de diferentes litologías dentro de los mismos horizontes. La discordancia 1 se ubica en el límite entre los horizontes H-2 y H-3, donde se evidencia un patrón de reflexión similar (onlap) al observado en perfiles anteriores. El horizonte H-1, que indica la base del basamento, muestra un lineamiento irregular con pequeños levantamientos, los cuales podrían indicar la presencia de cuerpos intrusivos, aunque la anomalía gravimétrica no lo sugiera de manera explícita.

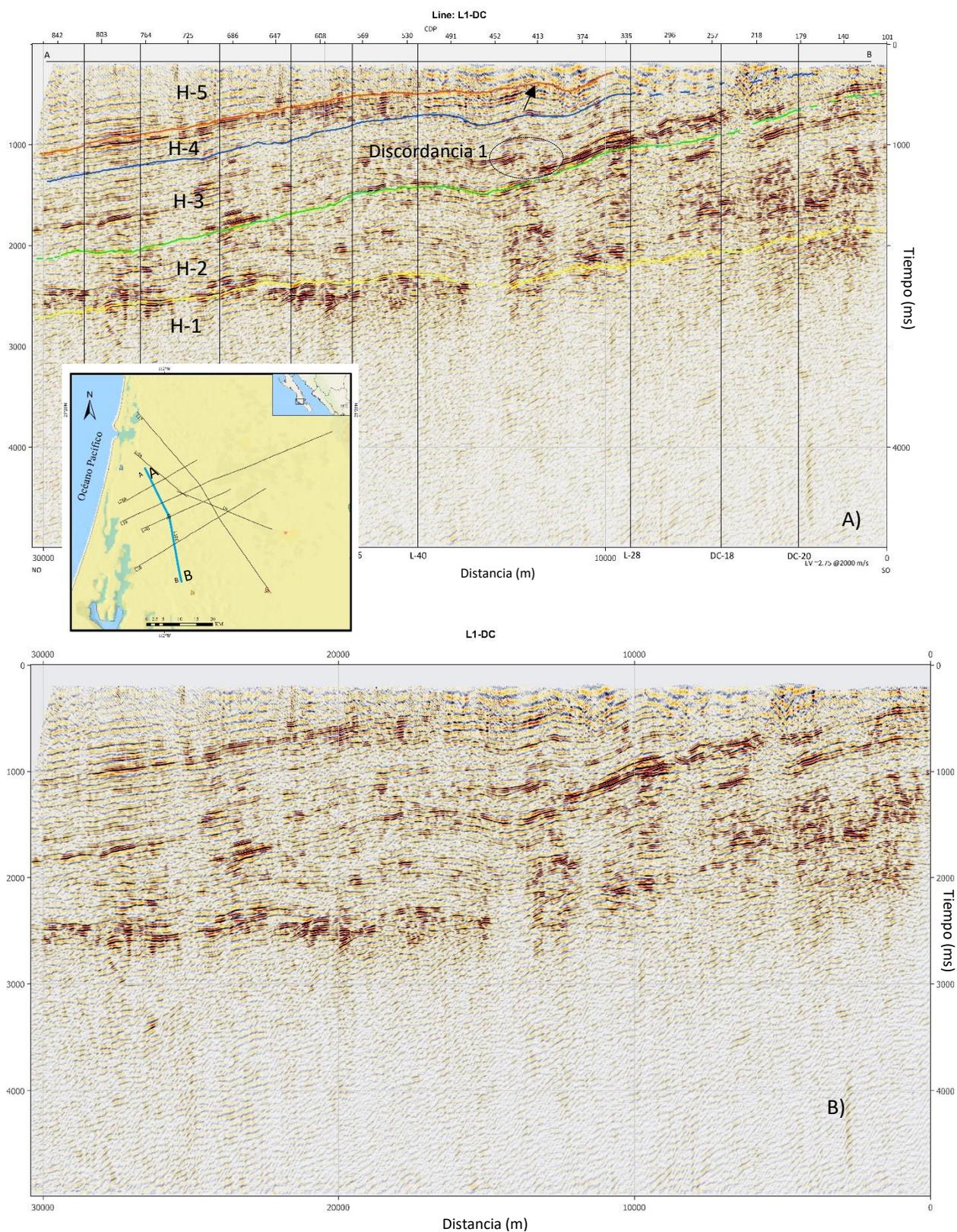


Figura 27. Línea sísmica L1-DC. El mapa insertado indica su ubicación (línea marcada en azul). A) Se presentan los horizontes interpretados y la discordancia presentes en esta sección. B) Línea L1-DC sin interpretar.

3.1.2.2 Perfil L-9A

La sección sísmica (Fig. 28) obtenida del perfil L-9A atraviesa de manera perpendicular las secciones L-26A, L-10, L-9 y las líneas proporcionadas por PEMEX (VICO-26, DC-2, DC-4). Este perfil tiene una longitud aproximada de 21 km. Se correlacionaron 6 horizontes con patrón de reflexión continua y alta amplitud. Estos horizontes presentan una configuración interna paralela y un espesor constante, con una disminución hacia la parte sureste entre los CDPs 139-103, lo que indica un aumento en la profundidad de los sedimentos.

Entre los CDPs 151-115 se observó una falta de datos posiblemente debido a la complejidad en la adquisición de los registros. Sin embargo, esta falta de datos no afectó significativamente la interpretación ni el procesamiento de los datos. La parte superior del basamento H-1 (representada en color amarillo) exhibe una geometría irregular, aunque con una alta amplitud y continuidad en el rango de CDPs 223-187.

Hacia la zona noroeste del perfil, entre los CDPs 247-235, se observa una notable disminución en la amplitud y continuidad, así como una curvatura en las secuencias sísmicas, similar a lo observado cerca de la intersección con DC-4. Esto sugiere la presencia de un cuerpo intrusivo y se correlaciona de manera consistente con lo observado en el perfil L1-DC.

La presencia de una discordancia, denominada discordancia 1, se interpreta entre los CDPs 163-127. En este intervalo, la facies sísmica correspondiente a la cima de H-2 se ve interrumpida por una facies sísmica de diferente amplitud y configuración interna. El horizonte H-6 fue interpretado mediante la correlación de los diversos perfiles que intercepta el perfil L-9A, y su máxima profundidad se estima en aproximadamente 500 ms.

3.1.2.3 Perfil L-9

El perfil L-9 atraviesa diagonalmente el centro de la zona de estudio, abarcando una longitud de 31 kilómetros e interceptando los perfiles DC-4, L-9A, L-10, L-17, L-28 y L-40. A lo largo de la sección sísmica (Fig. 29), se observaron áreas con falta de datos debido a la complejidad en la adquisición sísmica en campo, no obstante, esto no afectó negativamente el adecuado procesamiento de los datos. Mediante la correlación con los demás perfiles, se logró interpretar los diferentes horizontes presentes en las secciones sísmicas adicionales.

El límite superior del basamento (H-1) muestra una geometría irregular en todos los perfiles y se sitúa a una profundidad de 2500 ms entre los CDPs 101-137, profundizando hacia el suroeste, lo que indica la subsidencia de los sedimentos hacia el centro de la región. Entre los CDPs 149-173, se identifica la presencia de una falla inversa que ya había sido identificada en líneas anteriores, y que controla la deformación de los sedimentos.

En la dirección noreste, los límites de secuencias exhiben alta amplitud y una continuidad parcial, con una tendencia a disminuir el espesor de los horizontes (H-1 a H-6) hacia el suroeste, donde se observa un adelgazamiento notable de los sedimentos. La interpretación de la discordancia 1 se basó en el análisis del cambio en la configuración interna de las facies sísmicas que se encuentran entre la cima del horizonte H-1 y la base del horizonte H-2. Estas facies sísmicas muestran una interrupción debido a la presencia del horizonte H-1, lo que indica la presencia de una discordancia. Sin embargo, no pudo ser identificada la discordancia 2.

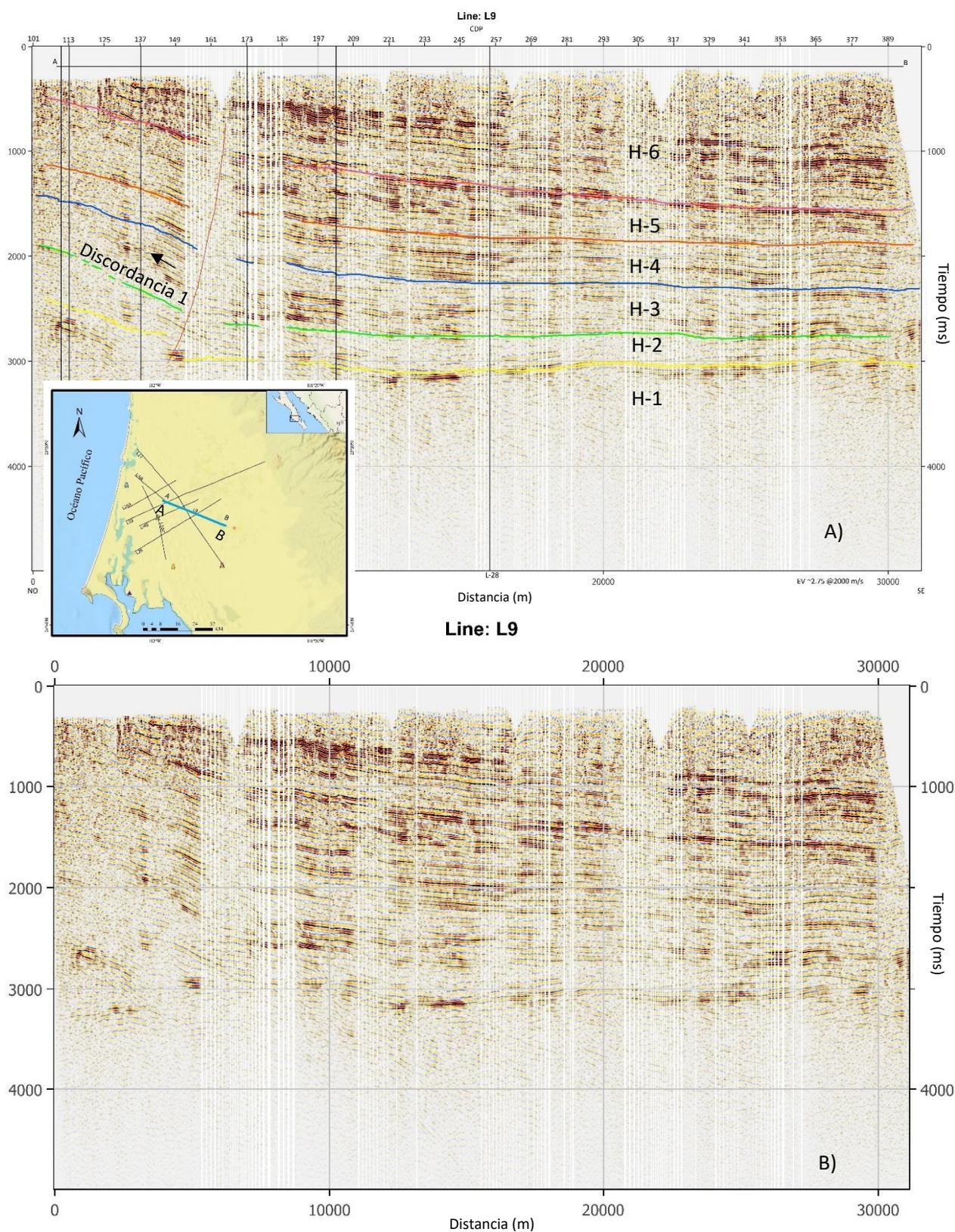


Figura 29. Interpretación de L-9. El mapa insertado indica su ubicación (línea marcada en azul). A) Se presentan los horizontes interpretados, la falla y la discordancia 1 (marcada con la flecha negra). B) Sección sísmica sin interpretar.

3.1.2.4 Perfil L-17

El perfil sísmico L-17 (Fig. 30) está situado en el centro del área de estudio y tiene una longitud de 61.5 kilómetros, siendo el segundo perfil más largo después de L-10. Este perfil nos brindó información sobre el comportamiento geológico en los extremos del área de estudio. Dado que la mayoría de los perfiles descritos previamente, así como los proporcionados por PEMEX, interceptan esta línea, fue posible correlacionar los diferentes horizontes interpretados a lo largo de las demás líneas de manera fácil.

Entre el CDP 688 y el CDP 548, se observa un cambio en la dirección de las secuencias sísmicas, mostrando un levantamiento. Desde el CDP 688 hasta el CDP 744, se produce una disminución de los reflectores, indicando un mayor hundimiento de estos. En general, los horizontes mantienen un espesor constante y las facies sísmicas exhiben alta amplitud, alta continuidad y una configuración interna subparalelas.

La cima del basamento (indicada en color amarillo) exhibe una geometría irregular, al igual que se evidencia en las secciones precedentes. Asimismo, se observa un leve levantamiento que no es discernible en L-10 debido a la ausencia de amplitud y frecuencia en esa parte específica de ese perfil. Se sitúa a una profundidad aproximada de 3000 ms, y su facie sísmica se distingue por su alta amplitud y una continuidad parcial.

La discordancia 1 se interpreta específicamente en la sección donde se produce el levantamiento debajo de la cima de H-1. Los cambios en la dirección y la continuidad de las facies sísmicas por encima de base de H-3, así como el truncamiento que se genera por encima de la cima de H-2, nos brindaron la base para su interpretación.

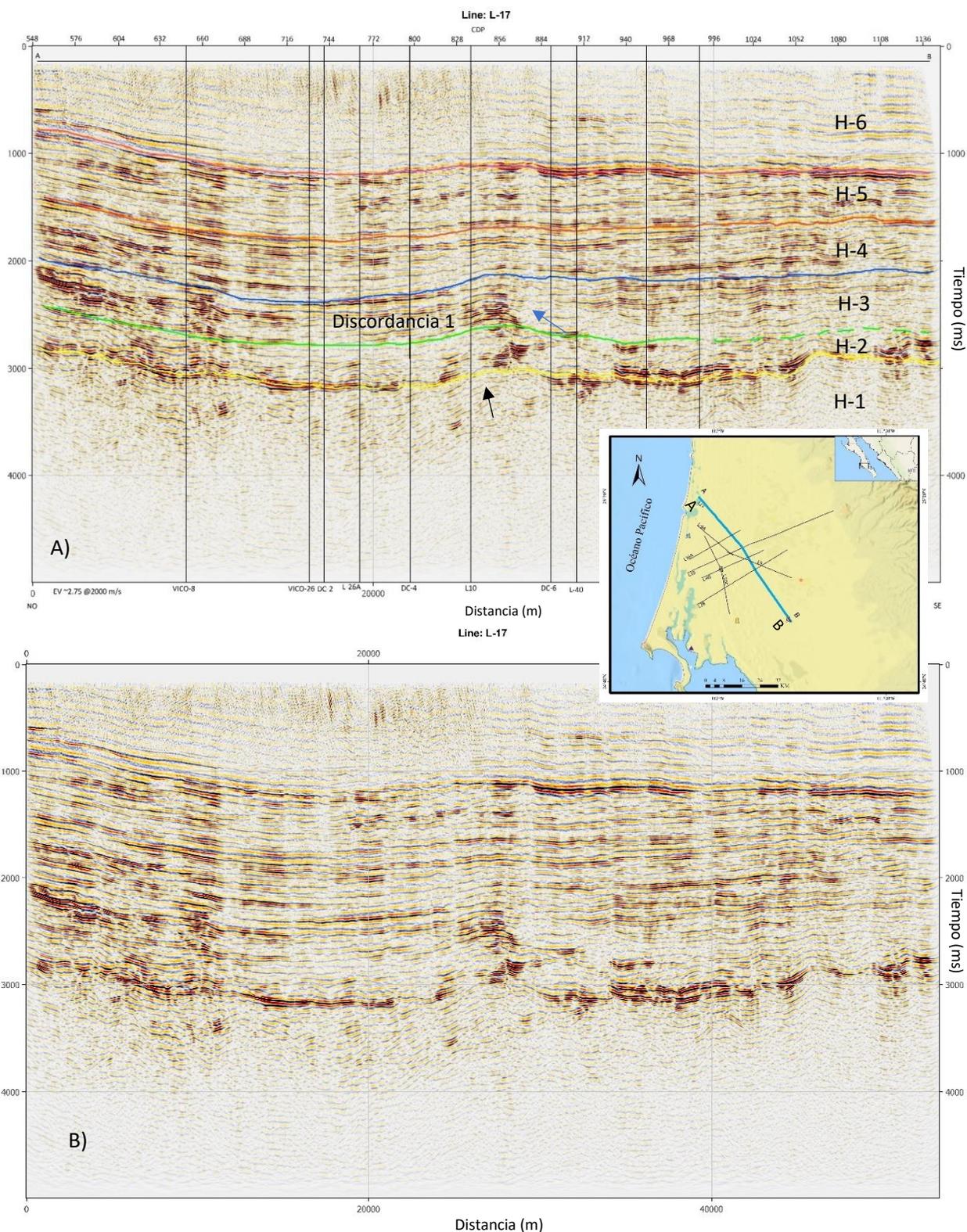


Figura 30. Imagen sísmica interpretada de L-17. El mapa insertado indica su ubicación (línea marcada en azul). A) Se presentan los horizontes interpretados, así como la presencia de la discordancia de esta sección, las flechas negras marcan el levantamiento presente en esta zona y la flecha azul indica la discordancia 1. B) Sección sísmica sin interpretar.

3.2 Integración de resultados

El análisis de los perfiles sísmicos permitió correlacionar las diferentes estructuras presentes en la zona. Los resultados fueron respaldados con información de registros de pozos en la zona, datos gravimétricos y la incorporación de 7 líneas sísmicas adicionales presentes en nuestra zona.

3.2.1 Horizontes y falla geológica.

A partir de la interpretación de las imágenes sísmica, junto con la información de los pozos y el mapa gravimétrico (Fig. 31) se confirmó la presencia de una cuenca (Fig. 32) en la región.

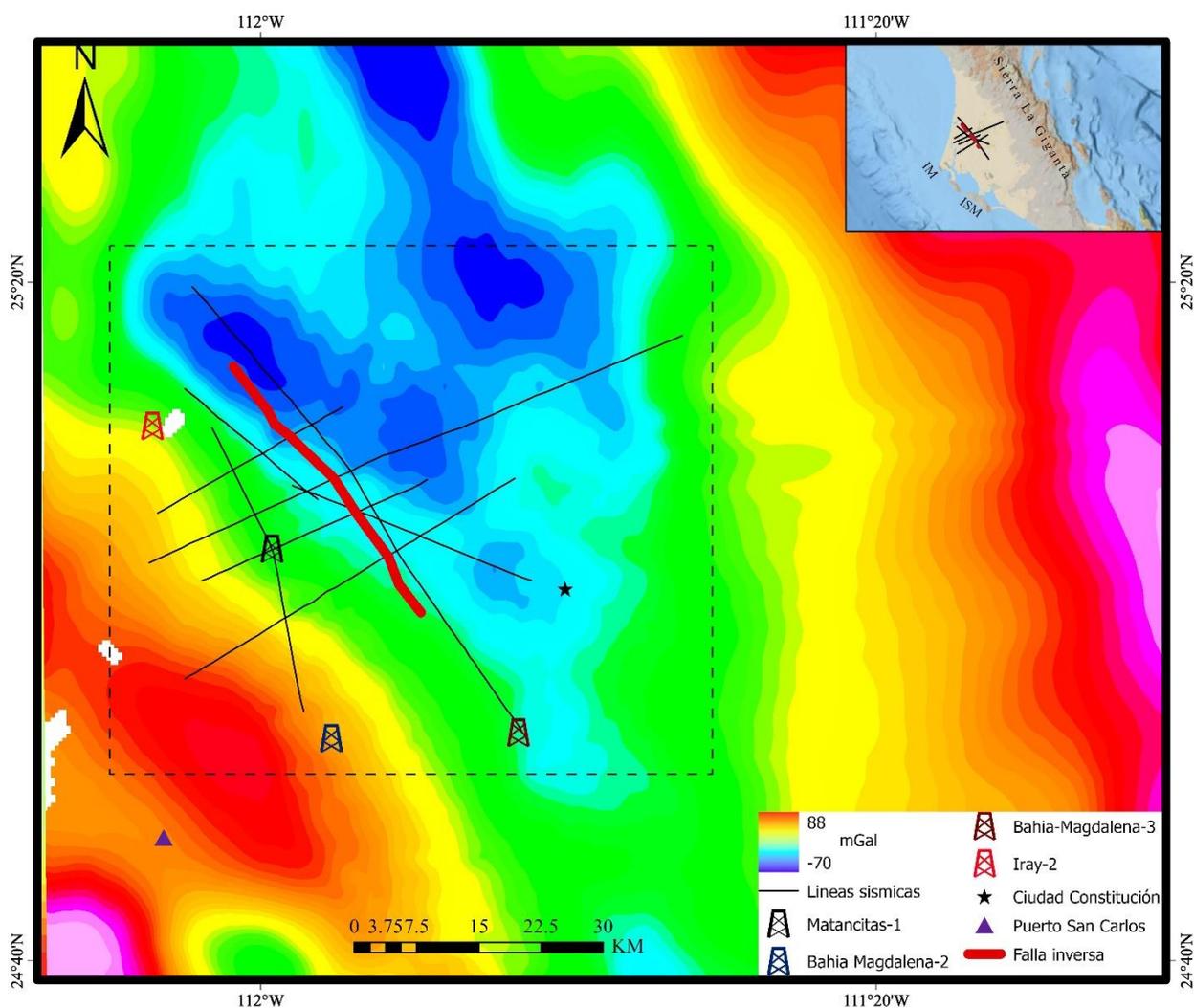


Figura 31. Mapa de anomalía de Bouguer en la región cercana a la Ciudad Constitución. En el mapa insertado IM: Isla Magdalena. ISM: Isla Santa Margarita. Se puede correlacionar (valores más bajos de gravedad) el depocentro de la cuenca .

Con base en los contrastes de impedancia acústica y el seguimiento de las facies sísmicas se identificaron 5 límites de secuencia sísmicas permitiendo interpretar 6 horizontes sísmicos que conforman a la cuenca. Estos horizontes mantienen un espesor regular hacia el oeste del área de estudio y va disminuyendo hacia el depocentro de la cuenca, en dirección este del área de estudio. Entre la base de H-2 y la cima de H-3, en todas las secciones sísmicas, se interpretó e identificó una discordancia angular que ha sido definida como discordancia 1. El límite de secuencias que definen la cima de H-4 y la base de H-5, en las líneas que tienen una dirección SO-NE y la línea L1-DC, se definió una discordancia erosional, la cual está orientada más hacia la bahía y no fue posible identificarla hacia el centro de la cuenca.

Una falla de tipo inversa fue identificada a lo largo de la sección transversal que atraviesa los perfiles que tienen orientación preferencial Oeste-Este. Esta falla con buzamiento aparente de 39° NE, controla la subsidencia de los sedimentos hacia el depocentro de la cuenca. En la figura 33 se presenta una representación de los perfiles en planta junto con un mapa gravimétrico de la anomalía de Bouguer el cual permitió confirmar el depocentro de la cuenca (que se indica con los valores más bajos de gravedad), así como el lineamiento que va siguiendo la falla a lo largo de un cambio de valores bajos hacia valores altos de gravedad.

Al sur oeste del área de estudio, en las Islas Santa Margarita y Magdalena, afloran rocas asociadas al complejo ofiolítico que sobreyace a esquistos azules (Sedlock, 1993). El complejo ofiolítico incluye un melange con bloques de rocas ultramáficas, gabros, diabasas, y rocas volcánicas máficas, pedernal y rocas sedimentarias clásticas, en conjunto deformadas y metamorfizadas. La edad de protolito y la deformación es desconocido, pero edades de anfíbol en varios bloques reportadas por Baldwin y Harrison (1992) son de 103 a 94 m.a. y representan la edad del metamorfismo.

El mapa de anomalía de Bouguer muestra la presencia del alto estructural, con valores comprendidos entre 88- 70 mGal. Además, las alineaciones de las anomalías gravimétricas muestran la presencia de la cuenca en la región de Ciudad Constitución, para posteriormente tener altos gravimétricos en la Sierra La Giganta. Es importante destacar que en el mapa de anomalía gravimétrica la cuenca se identifica con valores bajos de gravedad, denotando una depresión como la observada en los perfiles sísmicos procesados e interpretados en este trabajo.

3.3 Modelo tridimensional

A partir de la correlación e integración de todos los datos obtenidos, se generó un modelo tridimensional que permite observar de mejor manera los rasgos estructurales de nuestra zona de estudio tales como el límite oeste de la cuenca, la dirección de la subsidencia de los sedimentos y el depocentro de la cuenca. La figura 32 muestra de manera gráfica el modelo creado a partir de los datos.

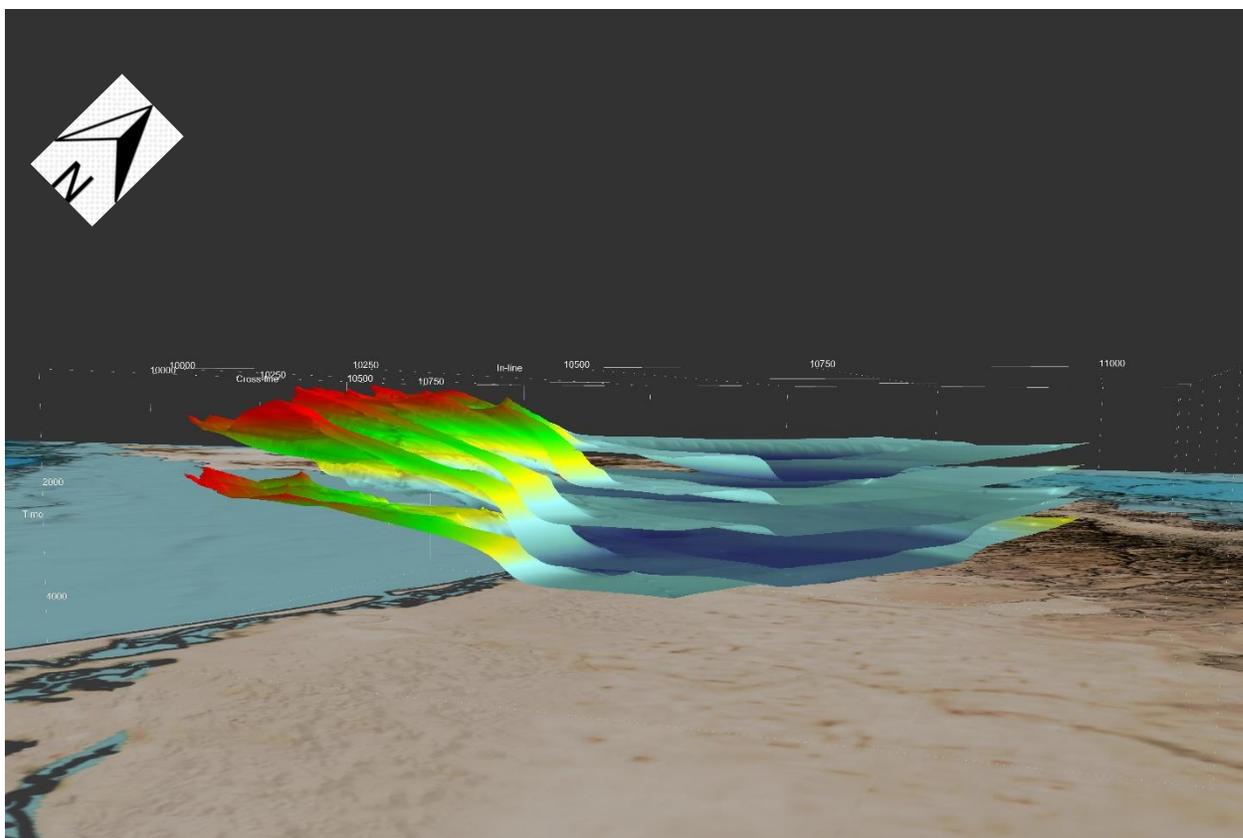


Figura 32. Modelo 3D de la cuenca interpretada.

La figura 33 muestra el modelo 3D, pero visto desde otro ángulo, así como la correlación con los datos gravimétricos los cuales tienen coherencia con el depocentro de la cuenca y así como con el levantamiento estructural que fue generada por la falla de la zona.

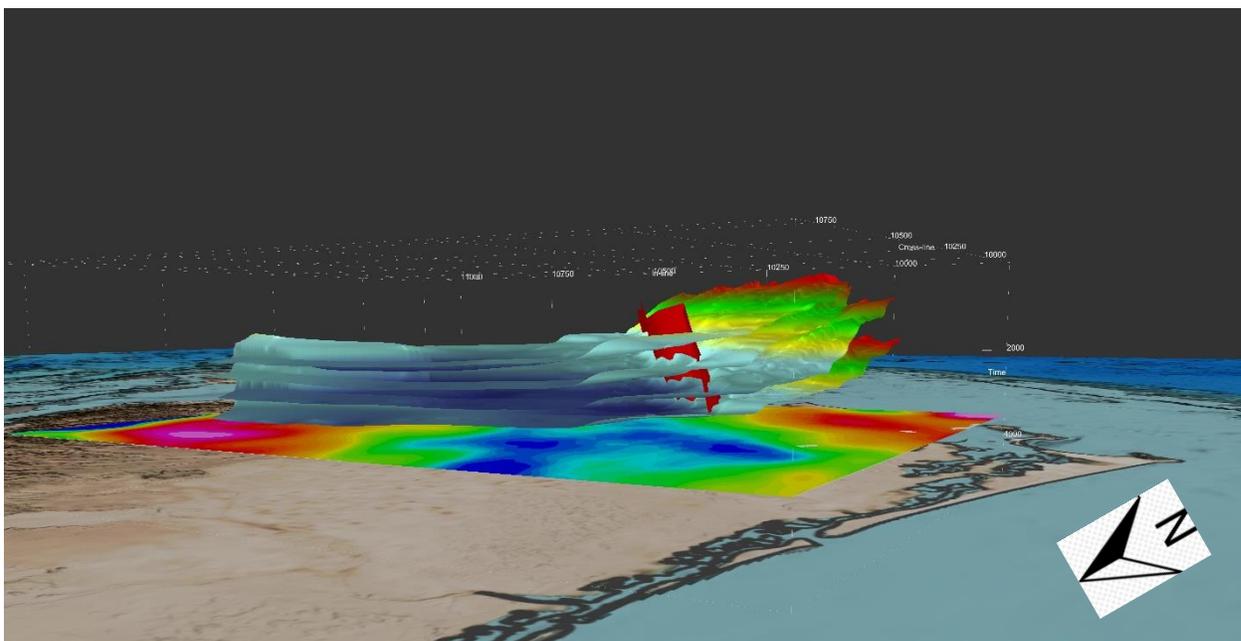


Figura 33. Modelo 3D correlacionado con el mapa de anomalía de Bouguer. Se puede observar la falla que corta 4 de los horizontes descritos en este trabajo.

Capítulo 4. Discusión

En este trabajo se estudiaron y caracterizaron los rasgos estructurales cercanos a la Ciudad Constitución y en este capítulo se discutirán dichos resultados comparados con otros estudios en la región.

4.1 Características estructurales

La presencia de una cuenca en esta región está descrita por el proceso de subducción que tuvo lugar durante el Paleógeno y el Neógeno de acuerdo con Spencer y Normark (1979). Al igual que en los trabajos descritos por: González-Escobar et al. (2016), Mastache-Román y González-Escobar, (2020) y Gómez-Ávila et al. (2021), en el que describen la presencia de cuencas en la región mar adentro.

En la cuenca reportada en este trabajo se identificaron 5 sismorelectores con base en los contrastes de impedancia acústica y las propiedades de las facies sísmicas. Los 5 sismorelectores marcaron los límites para definir 6 horizontes sísmicos que rellenan la cuenca. De acuerdo con la información de los registros de pozos, el horizonte H-1 pertenece a un basamento porfídico de edad Cretácico, los horizontes H-2 a H-4 que rellenan a la cuenca pertenecen a la edad del Paleoceno y mientras que los horizontes H-5 y H-6, los cuales son lo más superficiales pertenecen a edades más reciente (Mioceno-Plioceno), esto puede ser comparado con los trabajos de Mastache-Román y González-Escobar (2020) y Gómez-Ávila et al. (2021), en los cuales reportan que la edad de las unidades sedimentarias mar adentro pertenecen a las mismas edades aquí reportadas.

Los horizontes de edad Paleoceno, que yacen sobre el basamento porfídico, forman una unidad sedimentaria de ancho espesor (1500 ms, TVD) que va disminuyendo hacia el noroeste al igual que la unidad más superficial, esto se asocia a la dirección del depocentro, el cual se puede confirmar con los datos de gravedad. En el depocentro de la cuenca por carga litostática los paquetes sedimentarios se hacen más compactos y delgados. Hacia el suroeste, las unidades sedimentarias presentan un levantamiento que marca el límite oeste de la cuenca, este levantamiento se sugiere fue en parte ocasionado por el movimiento del bloque de techo por la falla inversa presente en la región. El límite este de la cuenca se ve marcado por el alto estructural generado por la sierra La Giganta.

La falla inversa que está presente en la región se atribuye a los esfuerzos compresivos que tuvieron suceso durante la subducción de la placa de farallón por debajo de la placa de Norteamérica en el Paleógeno y Neógeno (Spencer y Normark, 1979). Esta falla tiene un buzamiento aparente de 39° y tiene una longitud en profundidad de 2500 ms (TVD). Ya que la falla corta todas las unidades sedimentarias hasta la más reciente, se infiere que esta se creó después de gran parte de la sedimentación y se confirma la actividad compresional que tuvo suceso durante gran parte del Eoceno y el Mioceno. Se sugiere que esta falla continúa tanto hacia el norte como el sur, extendiéndose paralela a la línea de costa.

La presencia de terminaciones “onlap” y truncamientos en diferentes límites de las secuencias sedimentarias se asocian a la presencia de discordancias en la región tales como las presentadas en el modelo conceptual (Fig. 34) descrito por García-Domínguez (1976). La discordancia 1 que ocurre en el límite del Cretácico superior y el Paleoceno se asocia a los levantamientos que se ven en las imágenes sísmicas (ver figuras 28 a, 27 a, 24 a, 23 a); estos levantamientos se pueden asociar a cuerpos intrusivos que generaron una exposición de los paquetes sedimentarios y que a su vez fueron erosionados durante el Paleoceno (esto se confirma con los datos de los registros de pozos). Aunque la presencia de los cuerpos intrusivos no se puede comprobar con los datos gravimétricos se puede correlacionar con la presencia de rocas ofiolíticas en las inmediaciones de la región (Castro-Leyva et al., 1975; Kimbrough y Moore, 2003) aun así se sugiere el uso de métodos eléctricos o magnetotelúricos para confirmar la presencia de estos cuerpos.

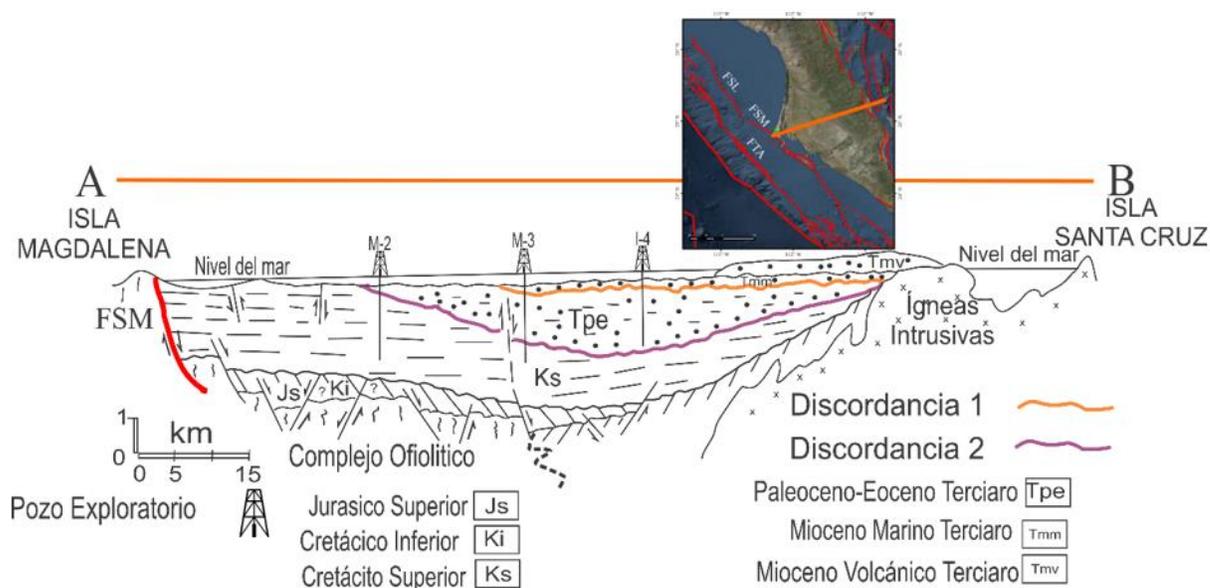


Figura 34 Modelo Conceptual de la cuenca Iray-Magdalena. Tomado de García-Domínguez (1976). El mapa insertado muestra la ubicación del perfil A-B propuesto por Garcia-Dominguez (1976). Las fallas del mapa insertado fueron tomadas y modificadas de Stock y Hodges (1989) y Michaud et al. (2004)

La discordancia 2, que separa edades del Paleógeno y Mioceno se propone se generó a partir de una exposición de la cuenca que produjo un hiato deposicional, esto se relaciona con lo presentado por Fletcher et al. (2007) y Gómez-Ávila et al. (2021); en el caso de Gómez-Ávila et al. (2021) ellos reportan la discordancia con dirección preferencial Este-Oeste al igual que en este trabajo, lo que sugiere que gran parte de la plataforma continental estuvo expuesta durante el Mioceno. La presencia de esta cuenca indica que es posible que haya más cuencas en las zonas continentales de la península de Baja California y que la región estuvo expuesta a erosión por largos periodos de tiempo. A pesar del cambio de régimen a uno transformante, la zona continental no ha sufrido cambios tan remarcables ya que no hay presencia de fallas normales ni fallas de movimiento lateral, tampoco se presenta extensión en las estructuras aquí reportadas.

Capítulo 5. Conclusiones

Mediante el procesamiento de 8 perfiles sísmicos terrestres en un área adyacente a Ciudad Constitución, se logró llevar a cabo la interpretación y caracterización de los rasgos estructurales presentes en el subsuelo. La metodología empleada en este estudio permitió alcanzar los objetivos propuestos en esta tesis. A continuación, se presentan los principales hallazgos y resultados obtenidos:

Se ha identificado la existencia de una cuenca de antearco en la región cercana a la ciudad de Constitución. Esta cuenca se caracteriza por la presencia de una falla inversa, cuyo buzamiento aparente es de 39° NE, la cual desempeña un papel fundamental en la subsidencia de los sedimentos hacia el interior de la cuenca. Se infiere que esta falla se formó como resultado del régimen tectónico de subducción que prevaleció durante los periodos Paleógeno y Neógeno. Además, se postula que dicha falla tiene una extensión paralela a la línea de costa, lo que confiere un mayor entendimiento de su configuración espacial.

Mediante la interpretación de los límites de secuencias sísmicas, basada en su amplitud y continuidad, se logró identificar un total de seis horizontes. Estos horizontes, a su vez, fueron correlacionados con la información obtenida de los registros de pozos de la región, lo cual permitió determinar que pertenecen a tres unidades sedimentarias de diferentes edades. Los límites estratigráficos entre los horizontes H-3 y H-4 en la porción occidental de la cuenca revelan la existencia de una discontinuidad conocida como Discordancia 1, la cual se formó durante el período Cretácico-Paleoceno. Por otro lado, los límites entre los horizontes H-4 y H-5 indican la presencia de otra discordancia importante, denominada Discordancia 2, que se desarrolló durante el Mioceno, en la etapa final del proceso de subducción de la placa de Farallón.

A través del procesamiento de datos sísmicos y su posterior interpretación, se logró generar un modelo tridimensional que, en conjunto con el mapa gravimétrico, ha permitido obtener una representación más precisa de la geometría de la cuenca en la región de estudio. Este modelo tridimensional nos proporciona la capacidad de visualizar de manera detallada la distribución espacial de la cuenca, así como identificar los 5 horizontes sísmicos que la componen y la geometría de la falla inversa presente en la zona.

En resumen, en el área de estudio, se logró identificar la presencia de una cuenca de antearco. Esta cuenca se formó como resultado del proceso de subducción y alberga una considerable cantidad de sedimentos. Se logró identificar y cartografiar una falla, esta falla representa una deformación estructural significativa y juega un papel importante en la evolución geológica de la región. A partir de la interpretación de los límites de secuencia sísmica se proporciona una comprensión más detallada de la estratigrafía y evolución

temporal de la región estudiada. Los resultados obtenidos en este trabajo proporcionan información valiosa sobre la evolución geológica de la región y contribuyen al conocimiento científico existente. Estos hallazgos pueden ser de utilidad para futuros estudios geológicos y geofísicos en la zona, así como para aplicaciones relacionadas con la exploración de recursos naturales y la gestión del subsuelo. Así mismo, sirve como complemento al proporcionar un análisis sísmico detallado y un modelo tridimensional invaluable para futuras investigaciones y comparaciones con regiones análogas.

Literatura citada

- Alquiza, M. J. P., Avilés, R. M., & Martínez, M. L. (2010). Revisión estratigráfica de Punta Coyote (Baja California Sur, México) e implicaciones para el volcanismo de la Sierra Madre Occidental y el arco Comondú. *Estudios Geológicos*, 66(2), 193–208. <https://doi.org/10.3989/egeol.39993.079>
- Badley, M. E. (1987). Practical Seismic Interpretation (Vol. 1). *Badley, Ashton & Associates Limited*.
- Baldwin, S. L., and Harrison, T. M. (1992). The P-T-t history of blocks in serpentinite-matrix mélange, west-central Baja California. *GSA Bulletin*, 104 (1): 18–31. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1992\)104<0018:TPTTHO>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1992)104<0018:TPTTHO>2.3.CO;2)
- Bohannon, R. G., & Parsons, T. (1995). Tectonic implications of post-30 Ma Pacific and North American relative plate motions. *GSA Bulletin*, 107 (8): 937–959 [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1995\)107<0937:TIOPMP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1995)107<0937:TIOPMP>2.3.CO;2)
- Brothers, D., Harding, A., González-Fernández, A., Holbrook, W. S., Kent, G., Driscoll, N., Fletcher, J., Lizarralde, D., Umhoefer, P., & Axen, G. (2012). Farallon slab detachment and deformation of the Magdalena Shelf, southern Baja California. *Geophysical Research Letters*, 39(9). <https://doi.org/10.1029/2011GL050828>
- Busby, C., Smith, D., Morris, W., & Fackler-Adams, B. (1998). Evolutionary model for convergent margins facing large ocean basins: Mesozoic Baja California, Mexico. *Geological Society of America*, 26(3), 227–230. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1998\)026<0227:EMFCMF>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1998)026<0227:EMFCMF>2.3.CO;2)
- Caldwell, J., Chowdhury, A., Bemmell, P.V., Engelmark, F., Sonneland, y L., Neidell, N.S. (1997). Exploring for Stratigraphic Traps. *Oilfield Review*, 9(4), 48-61.
- Castro-Leyva, T. de J., Delgado-Argote, L. A., & Garcia-Abdeslem, J. (1975). Geología y magnetometría del complejo máfico-ultramáfico Puerto Nuevo en el área de San Miguel, península de Vizcaíno, Baja California Sur. *Geos*, 21, 3–21.
- Dickinson, W. (1995). Forearc basins. In Ingersoll & Busby (eds). *Tectonics of Sedimentary Basins*.
- Dickinson, W. R., & Seely, D. R. (1979). Structure and Stratigraphy of Forearc Regions. *AAPG Bulletin*, 63 (1): 2–31. <https://doi.org/10.1306/C1EA55AD-16C9-11D7-8645000102C1865D>
- Fletcher, J. M., Grove, M., Kimbrough, D., Lovera, O., & Gehrels, G. E. (2007). Ridge-trench interactions and the Neogene tectonic evolution of the Magdalena shelf and southern Gulf of California: Insights from detrital zircon U-Pb ages from the Magdalena fan and adjacent areas. *GSA Bulletin*, 119 (11-12): 1313–1336. <https://doi.org/10.1130/B26067.1>
- García-Domínguez, G. (1976). Prospección Geológica en Baja California III Simposium de geología de subsuelo. Superintendencia General de Exploración Pemex
- Gómez-Ávila, M., González-Escobar, M., & Mastache-Román, E. A. (2021). Structural and seismographic characteristics of a sector of the Magdalena Shelf, western margin of Baja California, Mexico, from 2D seismic reflection profiles. *Geo-Mar Lett*, 41(25). <https://doi.org/10.1007/s00367-021-00697-5>

- González-Escobar, M., Salazar-Cárdenas, R. M., Munguía, L., Martín, A., & Suárez-Vidal, F. (2016). Structural and Seismic Stratigraphic study in the Center of the Magdalena Shelf in the Western Margin of Baja California Based on Seismic Reflection Data. *Geodynamics of the Latin American Pacific Margin*, 173(10), 433–449. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51529-8>
- Kimbrough, D. L., & Moore, T. E. (2003). Ophiolite and volcanic arc assemblages on the Vizcaino Peninsula and Cedros Island, Baja California Sur, México: Mesozoic forearc lithosphere of the Cordilleran magmatic arc. *Special Paper of the Geological Society of America*, 374, 43–71. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2374-4.43>
- Lonsdale, P. (1991). Structural patterns of the Pacific floor offshore of Peninsular California: Chapter 7: Part III. *Regional geophysics and geology*, 1, 87–125. <https://doi.org/10.1306/M47542C7>
- Mammerickx, J., & Klitgord, K. D. (1982). Northern East Pacific Rise: Evolution from 25 m.y. B.P. to the present. *Journal of Geophysical Research*, 87(B8), 6751–6759. <https://doi.org/10.1029/JB087iB08p06751>
- Mastache-Román, E. A., & González-Escobar, M. (2020). Forearc Basin: Characteristics of the Subsurface in Magdalena Shelf, Baja California, Mexico, from the Interpretation of Seismic-Reflection Profiles. *International Journal of Earth Science and Geophysics*, 6(2). <https://doi.org/10.35840/2631-5033/1841>
- Michaud, F., Calmus, T., Ratzov, G., Royer, J. Y., Sosson, M., Bigot-Cormier, F., Bandy, W., & Gutiérrez, C. M. (2011). Active Deformation along the Southern End of the Tosco-Abrejos Fault System: New Insights from Multibeam Swath Bathymetry. *Pure and Applied Geophysics*, 168(8–9), 1363–1372. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0193-y>
- Michaud, F., Calmus, T., Sosson, M., Royer, J.-Y., Bourgois, J., Chabert, A., Bigot-Cormier, F., Bandy, B., Mortera-Gutiérrez, C., Dymant, J., & Xicana, M. E. (2005). La zona de falla Tosco-Abrejos: un sistema lateral derecho activo entre la placa Pacífico y la península de Baja California. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(1), 53–63. <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n1a3>
- Michaud, F., Royer, J. Y., Bourgois, J., Dymant, J., Calmus, T., Bandy, W., Sosson, M., Mortera-Gutiérrez, C., Sichler, B., Rebolledo-Viera, M., & Pontoise, B. (2006). Oceanic-ridge subduction vs. slab break off: Plate tectonic evolution along the Baja California Sur continental margin since 15 Ma. *Geology*, 34(1), 13–16. <https://doi.org/10.1130/g22050.1>
- Michaud, F., Sosson, M., Royer, J. Y., Chabert, A., Bourgois, J., Calmus, T., Mortera, C., Bigot-Cormier, F., Bandy, W., Dymant, J., Pontoise, B., & Sichler, B. (2004). Motion partitioning between the Pacific plate, Baja California and the North America plate: The Tosco-Abrejos fault revisited. *Geophysical Research Letters*, 31(8). <https://doi.org/10.1029/2004GL019665>
- Noda, A. (2016). Forearc basins: Types, geometries, and relationships to subduction zone dynamics. *Bulletin of the Geological Society of America*, 128(5–6), 879–895. <https://doi.org/10.1130/B31345.1>
- Sedlock, R.L. (1993). Mesozoic geology and tectonics of blueschist and associated oceanic terranes in the Cedros-Vizcaino-San Benito and Magdalena-Santa Margarita regions, Baja California, Mexico. *Society for Sedimentary Geology*, 113-125.

- Spencer, J. E., & Normark, W. R. (1979). Tosco-Abreojos fault zone: A Neogene transform plate boundary within the Pacific margin of southern Baja California, Mexico. *Geology*, 7(11), 554–557 [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1979\)7<554:TFZANT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1979)7<554:TFZANT>2.0.CO;2)
- Stein, S., & Wysession, M. (2005). An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure. *Blackwell Publishing*, 4(6). <https://doi.org/10.1785/gssrl.74.6.824>
- Stock, J. M., & Hodges, K. v. (1989). Pre-pliocene extension around the Gulf of California and the transfer of Baja California to the Pacific plate. *Tectonics*, 8(1).
- Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). Ciencias de la tierra. *Universitario*, 32.
- Vera, J. Antonio. (1994). Estratigrafía. Principios y Métodos. *Rueda*, 1.
- Yilmaz, Ö. (2001). Seismic Data Analysis: Processing, inversion and interpretation of seismic data. *Society of Exploration Geophysicists*, 1. <https://doi.org/10.1190/1.9781560801580.fm>