CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA, BAJA CALIFORNIA

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS EN CIENCIAS DE LA TIERRA

Evidencias estructurales y sismoestratigráficas en la parte central de la plataforma Magdalena, margen occidental de Baja California a partir de sísmica de reflexión.

Tesis

Para cubrir los requisitos necesarios para obtener el grado de

Maestro en ciencias

Presenta:

Rosa Margarita Salazar Cárdenas

Ensenada, Baja California, México

2014

Tesis defendida por

Rosa Margarita Salazar Cárdenas

y aprobada por el siguiente comité

Dr. Mario González Escobar
Director del Comité

Dr. Jesús Arturo Martín Barajas
Miembro del Comité

Dr. Luís Munguía Orozco
Miembro del Comité

MC. José Luís Briseño Cervantes
Miembro del Comité

Dr. Juan García Abdeslem
Coordinador del Posgrado en
Ciencias de la Tierra

Dr. Jesús Favela Vara
Director de Estudios de Posgrado

Noviembre, 2014.

Resumen de la tesis que presenta **Rosa Margarita Salazar Cárdenas** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geofísica Aplicada.

Evidencias estructurales y sismoestratigráficas en la parte central de la plataforma Magdalena, margen occidental de Baja California a partir de sísmica de reflexión.

Resumen elaborado por:

Rosa Margarita Salazar Cárdenas

El proceso e interpretación de perfiles de sísmica de reflexión multicanal revela por primera vez las características estructurales y estratigráficas de un sector de la plataforma Magdalena, localizada en el margen del Pacifico de Baja California Sur. La plataforma Magdalena está asentada en una cuenca antearco del Cretácico Superior y Paleógeno que fue afectada por la deformación neogénica durante el desarrollo de un límite de falla transformante. Este trabajo fue posible por la disponibilidad de datos sísmicos propiedad de Petróleos Mexicanos. Los resultados muestran dos cuencas asimétricas controladas por las fallas Santa Margarita (FSM)-San Lázaro (FSL) y Tosco-Abreojos (FTA). La FSM es de tipo normal con echado al NE y un buzamiento de 40°, se le atribuye que acomoda esfuerzos transtensionales en la plataforma y controla el relieve del fondo y el depocentro de la cuenca Santa Margarita. Las cuencas muestran una gran deformación en su sector oeste, cercano a las fallas mencionadas y contienen fallas menores a lo largo y ancho de sus depocentros. Los mapas de configuración de sismo reflectores (horizontes sísmicos) muestran que uno de los mayores depocentros tiene profundidades de ~4 km. Un horizonte es considerado como una discordancia regional que posiblemente cubre toda la plataforma Magdalena. Se tiene la presencia de un reflector difuso considerado como basamento acústico. Se observan 3 paquetes sedimentarios principales y las secuencias de progradación muestran subsidencia y gran fallamiento en sus sectores cercanos a las FSM-FSL y FTA. Estudios de futuro y el auxilio de pozos que pudieran haber cortado sedimentos pre y syn-rift podrán proporcionar restricciones sobre la evolución de este límite de placas, así como los mecanismos que conducen a la captura de microplacas y riff continental y de la edad de deformación a lo largo de la FTA y FSL, lo cual contribuirá a mejorar el entendimiento de la dinámica y evolución de la microplaca de Baja California y del Golfo de California. La presencia de la FSM se observa en las Islas Santa Margarita y Magdalena y, consideramos que parte de la actividad sísmica reportada para la región es debido a esta falla, por lo que debe de ser considerada en estudios de riesgo, ya que se ubica prácticamente por debajo del Puerto San Carlos, B.C.S.

Palabras clave: Plataforma Magdalena, Cuenca antearco, fallas Tosco-Abre Ojos, fallas Santa Margarita-San Lázaro.

Abstract of the thesis presented by **Rosa Margarita Salazar Cárdenas** a partial requirement to obtain the Master in science degree in Science of the Earth with orientation in Applied Geophysics.

Structural and seismostratigraphic evidence in the center of the Magdalena shelf, western margin of Baja California based on seismic reflection.

Abstract by:

Rosa Margarita Salazar Cárdenas

Processing and interpretation of multichannel seismic reflection profiles from the Magdalena Shelf, located along the Baja California Pacific margin allows us to define for the first time the structural and stratigraphic characteristics of a sector of this shelf. The Magdalena shelf of Upper Cretaceous and Paleogene age, is part of a forearc basin that was affected by Neogene deformation during the development of a transform fault boundary. This work was made possible by the availability of seismic data owned by Petróleos Mexicanos. Two asymmetric basins controlled by the Santa Margarita (SMF)-San Lázaro (SLF) and Tosco-Abreojos (TAF) faults are defined. The SMF is a normal fault dipping 40° NE, accommodate much of the transtensional stress on the shelf and controls the bottom bathymetry as well as the Santa Margarita basin depocenter. These basins show a large deformation along the western sector near the faults mentioned above, and there are minor faults throughout their depocenters. The maps of the reflector configuration (seismic horizons) illustrate that one of the major depocenters reach depths of up to ~ 4 km. A horizon is considered as a regional unconformity that may covers the entire Magdalena shelf. There is the presence of a diffuse reflector considered as the acoustic basement. Three main packages of sediments are observe and the progradation sequence shows subsidence and faulting in the sectors near to SMF-SLF and TAF. In future studies and with the support of data wells that cut pre and syn-rift sediments, this may provide enough information to constraints the evolution of this plate boundary, as well as the mechanisms leading to capture the microplates, continental rift and estimate the age of deformation along the TAF and SLF; this will contribute to have a better understanding of the dynamics and evolution of the Baja California microplate and Gulf of California as well. The presence of the SMF is observed in the Santa Margarita and Magdalena Islands and it may be that part of the seismic activity reported for the region is associated to this fault, so it must be considered in future hazard-risk studies, because there are several towns near the trace of this fault such as Puerto San Carlos, BCS.

Keywords: Shelf Magdalena, forearc basin, Tosco-Abreojos fault, Santa Margarita-San Lazaro faults.

Dedicatorias

Todos podemos tener éxito. Si te dices ésto suficientes veces a ti mismo, puedes tenerlo. No somos mejores que cualquier otro. ¿Qué es el talento? No lo sé ¿Se nace con él? ¿Se descubre después? El talento básico es la confianza de ser capaz de hacer algo.
John Lennon

ℑ a Dios ℑ
Por darme fuerzas y escuchar mis plegarias. Por poner en mí camino personas de buen corazón que me han permitido crear memorias inolvidables.

ℑ a míℑ
Como una prueba de que puedo llegar tan lejos como me lo proponga.

ℑ a mí esposo José Montoyaℑ
Por el apoyo sentimental, tan necesario para lograr la estabilidad emocional y el equilibrio entre la mente y el corazón, con quien comparto muchos sueños, ilusiones y realidades del mañana y de hoy. Gracias amor, por acompañarme en mi travesía por el paso en esta vida.

ℑ a mi familia ℑ
A mi madre María Elena Cárdenas Valdéz, a mi padre Ismael Salazar Robles y a mis hermanas Iliana Sugey Salazar Cárdenas y Erika Yoloxóchilt Cárdenas Valdéz, por simplemente ser mi familia y brindarme su amor y apoyo en cada momento.

Reír a menudo y mucho; ganar el respeto de gente inteligente y el cariño de los niños, conseguir el aprecio de críticos honestos y aguantar la traición de falsos amigos; apreciar la belleza; encontrar lo mejor en los demás; dejar el mundo un poco mejor, sea con un niño saludable, una huerta o una condición social redimida; saber que por lo menos una vida ha respirado mejor porque tú has vivido. Eso, es tener éxito.
Ralph Waldo Emerson

Agradecimientos

- **CONACYT** por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría . . A**PEMEX** por proporcionar los datos que hicieron posible este trabajo.

- **CICESE** por permitirme crecer en el departamento de **Ciencias de la Tierr**a. .

- **HALLIBURTON** , por mantener un convenio y permitir utilizar las herramientas de procesado e interpretación de datos de sísmica.

- **OPENDTECT** por facilitarme la interpretación de mis datos.

- **Google Earth Education Initiative-Google Earth Educators** , por el uso de sus herramientas.

- Gracias a mi director de tesis **Dr. Mario González Escobar** por aceptarme para desarrollar mi trabajo de tesis, por todo el apoyo recibido, por su paciencia y sobre todo por compartir conmigo parte de sus conocimientos.

- A mis sinodales**:**
  - **Dr. Arturo Martín Barajas**
  - **Dr. Luis Munguía Orozco**
  - **MC. José Luis Briseño Cervantes**

  Por brindarme sus valiosas recomendaciones, técnicas y por la disposición para ayudarme.

- **Clemente Germán Gallardo Mata** por compartirme sus conocimientos y aclarar todas mis dudas. Gracias por su amistad. **Sergio Arregui** por mantener el equipo de cómputo trabajando y solucionar aquellos problemitas del software que de vez en cuando nos daban dolor de cabeza. A **Martin Pacheco** por su ayuda en la interpretación geológica de los datos sísmicos, por sus enseñanzas y consejos.

- **Dr. Francisco Suárez Vidal** por su disposición para aclarar mis dudas y rebajarse a mi nivel de conocimiento. Gracias por esas charlas amenas que me hacían olvidar cualquier estrés o presión. Sin duda, una de las personas que difícilmente olvidaré.

Contenido

Página

Resumen en español ..... **I**
Resumen en inglés ..... **II**
Dedicatorias ..... **III**
Agradecimientos ..... **IV**
Lista de figuras ..... **VII**
Lista de tablas ..... **XIV**

Capítulo 1 Introducción **1**
1.1 Introducción 1
1.2 Objetivos y metas 2
1.3 Área de estudio 3
1.4 Cuenca de antearco 4
1.5 Evolución geológica y tectónica del margen occidental de Baja California Sur. 6
1.6 Estructuras en la región de estudio 7

Capítulo 2 Metodología de procesamiento de datos sísmicos **10**
2.1 Sísmica de reflexión marina 10
2.1.1 Parámetros de adquisición 10
2.1.2 Procesamiento de datos sísmicos 12
2.1.2.1 Pre-apilamiento 13
2.1.2.1.1 Definición de geometrías 13
2.1.2.1.2 Edición de trazas 15
2.1.2.1.3 Deconvolución 20
2.1.2.2 Apilamiento 21
2.1.2.2.1 Agrupamiento por CDP 21
2.1.2.2.2 Análisis de velocidad 22
2.1.2.2.3 Corrección NMO 24
2.1.2.2.4 Apilamiento 25
2.1.2.3 Post-apilamiento 25
2.1.2.3.1 Filtro variable en tiempo 26
2.1.2.3.2 Control automático de ganancia AGC 26
2.1.2.3.3 Migración 26
2.2 Interpretación sísmica 28
2.2.1 Estratigrafía sísmica 30
2.2.2 Algunos términos de patrones de reflexión 31

Contenido (continuación)

Página

Capítulo 3 Resultados **33**

3.1 Interpretación de los perfiles sísmicos 33
3.1.1 Perfil 7511. 35
3.1.2 Perfil 7509. 37
3.1.3 Perfiles 7501 y 7503. 39
3.1.4 Perfil 7485. 40
3.1.5 Perfiles7483-7596. 43
3.1.6 Perfil 7550. 45
3.1.7 Perfil 7554. 47
3.1.8 Perfil 7518. 49
3.1.9 Perfil 7514. 51
3.2 Interpretación estructural 53
3.3 Correlación de fallas 54
3.3.1 Fallas Santa Margarita y San Lázaro 55
3.3.2 Falla Tosco- Abreojos 55
3.4 Configuración del basamento acústico 58
3.5 Correlación de reflectores 59

Capítulo 4 Discusión **65**

4.1 Actividad sísmica en el sistema de falla Santa Margarita- San Lázaro 67
4.2 Unidades sismoestratigráficas y delimitación de depocentros 69
4.3 Modelo estructural e implicaciones tectónicas 71

Capítulo 5. Conclusiones **74**

Lista de referencias **76**

Anexo **80**

Lista de figuras

Figura **Página**

1 Baja California, México. Área de estudio (recuadro negro). Líneas sísmicas del prospecto Baja California. En líneas continuas amarillas se muestran las líneas procesadas para este trabajo y en líneas discontinuas se muestran 2 líneas escaneadas por PEMEX. En líneas rojas, fallas en la región. En línea naranja representa la trinchera fósil, en verde los límites de las microplacas Guadalupe y Magdalena. Falla San Benito (FSB), Falla Tosco-Abreojos (FTA), Falla San Lázaro (FSL), Falla Santa Margarita (FSM). Modificado de Fletcher et al., (2007) y Brothers et al., (2012)…… 4

2 Sección esquemática de un margen tipo pacífico mostrando la posición de la cuenca de antearco con respecto a los volcanes y plutones, y el complejo de subducción (cuña acrecionaria) a lo largo del muro interno de la trinchera. Modificada de Dickinson 1995…….. 5

3 Principales fallas en la región sur de Baja California. Se muestra el límite de la Plataforma Magdalena, coincidente con el límite de la microplaca Magdalena (línea verde olivo). La línea naranja representa la trinchera fósil. La línea verde es un perfil de sísmica de refracción y reflexión realizado por Brothers et al. (2012). Los círculos rosas son los receptores marinos y terrestres. Falla San Lázaro (FSL), Falla Santa Margarita (FSM). Falla Tosco-Abreojos (FTA).Modificada de Fletcher et al., (2007) y Brothers et al. (2012)…… 8

4 Perfil sísmico de reflexión 0W (Figura3), tomado de Brothers et al. (2012). (A) la línea 0W (longitud total = 111 km) y la ubicación de los receptores OBS 1-5. (B y C) secciones mostrando la estratigrafía de la paleo-trinchera y de la cuenca Tosco-Abreojos. BSR en B corresponde a un sismoreflector con edades de ~8 Ma (Yeats et al., 1981)…….. 9

5 Adquisición sísmica marina, el barco sísmico va “disparando” las ondas y adquiriendo información del subsuelo. La profundidad del streamer es de 9.1 m y consta de 48 hidrófonos a lo largo de éste. Una vez recolectado los datos, se realiza el procesamiento de los mismos…… 11

6 Secuencia básica de procesamiento de datos sísmicos de reflexión multicanal 2D según Yilmaz, 2001. 1) etapa Pre-apilamiento; donde una de las operaciones más significativas son la geometría y deconvolución. 2) Apilamiento; el punto fundamental es el análisis de velocidad. 3) Post-apilamiento; siendo la migración uno de los algoritmos finales que se aplican. En cada uno de estas etapas intervienen una serie de tratamientos fijos, mientras que hay otros algoritmos que se pueden aplicar en cualquier momento del procesado (filtrado, escalado de amplitud, etc.)……. 13

Lista de figuras (continuación)

Figura **Página**

7 Conjunto de trazas de dos disparos (gathers) con geometría cargada correctamente. La banderita en el receptor más cercano a la fuente está a la derecha. Esta geometría indica que el arreglo fue con disparo lateral y los receptores cercanos a la fuente reciben la señal en menor tiempo. Cada traza de los tiros de campo queda perfectamente ubicada…… 14

8 Filtrado con filtro pasabandas. a) Registro de dos gathers solo con su geometría. b) Los mismos gathers con el filtro aplicado, cuyo objetivo es resaltar los eventos de reflexión y ayudar a identificar y eliminar el ruido. Se aplicó un filtro paso banda de tipo Ormsby……. 16

9 Eliminación de trazas ruidosas. (a) Registros sísmicos antes de la eliminación y (b)después del “matado de traza ruidosas, en dondese excluyen, total o parcialmente, aquellas trazas que presentan ruido o malas conexiones. El malfuncionamiento del hidrófono implica la pérdida de una traza después de su edición para eliminar trazas ruidosas…… 17

10 Análisis de frecuencias espaciales. a) Registro de campo y espectro en el dominio F-k b) Registro en campo atenuado y espectro en el dominio F-k. El filtro aplicado es de tipo trapezoidal (trazo negro) y consiste en dejar pasar las frecuencias y números de onda contenidas dentro del área del trapecio……. 19

11 Geometría del punto de profundidad común (CDP en inglés).El CDP está muestreado por distintas parejas de tiros (S) y receptores (R). De lado izquierdo se observa el registro hiperbólico de las trazas por la diferencia de tiempo y la horizontalidad de las mismas por la corrección NMO (normal move out). Se deduce, por construcción, que el espaciado entre CDP es la mitad del espaciado entre hidrófonos y que las reflexiones en estos conjuntos poseen también trayectorias hiperbólicas…….. 22

12 Análisis de velocidad sobre los CDP utilizando ProMAX. (a) Los colores “calientes” son altos de contraste en el análisis de semblanza, (b) CDP sin corregir, (c) CDP corregido por NMO, (d) conjuntos de CDP con los reflectores que mejor se apilan para una velocidad constante. El resultado es un campo de velocidades que se usa en el apilamiento para obtener la sección sísmica……... 24

Lista de figuras (continuación)

Figura **Página**

13 Migración sísmica. a) Imágen con apilamiento, b) imágen migrada. Esta sección contiene el tratamiento post-apilamiento, ganancia y filtro variante en tiempo. Se marcan mejor los reflectores, se corrigieron las difracciones provocadas por cambio brusco de algún reflector…….. 27

14 En esta sección se observa la discontinuidad de los reflectores debido a la presencia de una falla de tipo normal, dondeel bloque de techo se mueve hacia abajo respecto del bloque de piso……... 29

15 Diferentes tipos de terminaciones estratigráficas que pueden ser identificadas en secciones sísmicas. Esto provee información de puede ser usada para definir el ambiente de depósito y la historia de depósito (modificada de Kendall, 2012)…….. 32

16 Mapa de localización de las líneas sísmicas en la plataforma Magdalena, B.C.S. En líneas continuas se muestran los perfiles procesados en este proyecto. Los perfiles tienen un azimut de 40°- 56° en las líneas transversales a la costa, y un azimut de ~130° en las líneas paralelas a la costa. En línea discontinua se muestran los perfiles procesados y escaneados por PEMEX, con azimut de 56°…….. 34

17 Línea 7511 en el extremo sur del área de estudio. a) Línea sin interpretar, b) Línea interpretada. Las fallas menores (en negro) tienen poco desplazamiento vertical. Las fallas en color son las fallas mayores que fueron correlacionadas entre los perfiles. La falla Santa Margarita (rojo) delimita un semigraben situado al este de la isla Magdalena que expone el basamento (línea discontinua). Un sismoreflector que aparece en la mayoría de las líneas sísmicas se utilizó como referencia estratigráfica (en color naranja). El perfil muestra una cuenca al oeste del alto de basamento y la superficie del fondo marino podría estar cortada por algunas de estas fallas……. 36

18 Línea 7509 NE-SW. a) Línea sin interpretar, b) Línea interpretada. La cuenca al oeste de isla Magdalena está cortada por fallas en los dos extremos del perfil. Están presentes zonas difusaspor debajo de un sismorflector (naranja) que aparece en varios perfiles. La superficie del fondo marino es profundiza ligeramente al oeste y no presenta relieve… 38

Lista de figuras (continuación)

Figura **Página**

19 Línea 7501-7503 NE-SW. a) Línea sin interpretar, b) Línea interpretada. Se observan dos cuencas principales en forma de semigraben (cuenca Tosco-Abreojos y cuenca Santa Margarita). Los depocentros están cortados por una serie de fallas secundarias y alcanzan espesores sedimentariosde hasta ~ 4 km en la cuenca TA (CDP´s 700-1350). En la parte superior se observan relaciones de tipo onlap y downlap de los reflectores sísmicos posiblemente debido a transgresiones y regresiones del nivel del mar. El reflector del basamento acústico es más difuso. El horizonte de referencia (color naranja) profundiza más de 2 segundos (tiempo doble) en la cuenca TA. La superficie del fondo marino presenta relieve…… 40

20 Línea 7485 NE-SW. a) Línea sin interpretar, b) Línea interpretada. Se observa la falla Santa Margaritaen el lado derecho y parte del semigraben controlado por ésta. Un alto estructural con dos cimasestá controlado por fallas de normales(FSL) que forman un pequeño depocentro sobre el alto estructural. Al oeste la cuenca TA no aparece cortada por las fallasy la superficie del fondo marino profundiza ligeramente en esa dirección…… 42

21 Línea 7483-7596 NE-SW. a) Línea sin interpretar, b) Línea interpretada. La falla San Lázaro controla el flanco este del alto de basamento que separa a las cuencas San Lázaro y Tosco Abreojos (TA). Los reflectores en ambas cuencas se acuñan hacia el este. La cuenca San Lázaro tiene un relleno sedimentario más profundo que la cuenca TA (CDP 800-1300). El alto de basamento se acerca a la superficie y está cubierto por un delgado paquete de sedimentos que engruesa hacia la cuenca TA……... 44

22 Línea 7550 NE-SW. a) Línea sin interpretar, b) Línea interpretada. En este perfil la cuenca San Lázaro forma un depocentro sobre la plataforma continental y está delimitada por un alto de basamento que presenta relieve del fondo marino. Se observa que la FSL corta la superficie y a los sedimentos más jóvenes, lo que nos indica actividad reciente. Al oeste, la falla Tosco-Abreojos corta el talud continental según la batimetría……. 46

Lista de figuras (continuación)

Figura **Página**

23 Línea 7554 NE-SW. a) Línea sin interpretar, b) Línea interpretada. La cuenca San Lázaro esta bordeada al oeste por la FSL y un alto estructural posiblemente cortado por ramificaciones de la falla Tosco-Abreojos. La secuencia neogénica diverge hasta la zona de deformación de la FSL y el alto estructural que marca el quiebre del talud continental.Al oriente una discordancia mayor (línea blanca) separa la secuencia neogénica de la secuencia de edad Cretácico-Paleógeno. Esta última es el relleno dela cuenca de antearco.El reflector naranja se considera que marcala discordancia regional interpretada por Brothers et al. (2012)…… 48

24 Línea 7518 NW-SE. a) Línea sin interpretar, b) Línea interpretada. En este perfil los reflectores tienden a profundizarse ligeramente hacia el NW, donde la depresión Tosco-Abreojos tiene un depocentro mayor. Se observa fallamiento que corta los estratos bajo 1000 ms. Están presentes zonas difusas por debajo de 2 segundos (TD)……... 50

25 Línea 7514 NW-SE. a) Línea sin interpretar, b) Línea interpretada. Este perfil corta casi perpendicularmente a los perfiles 7511, 7509 y 7501..Este perfil está al oeste de las fallasSanta Margarita y San Lázaro, y los reflectores someros conservan su grosor a lo largo del perfil y se observa poco fallamiento. Esto sugiere que este perfil es subparalelo al patrón de fallas dominante nor-noroeste…….. 52

26 Estructuras correlacionadas con base en las diferentes líneas sísmicas interpretadas en la región de estudio. La falla San Lázaro (FSL) tiene una dirección NW con un buzamiento al NE. Hacia el surFSL alterna conla falla Santa Margarita (FSM) que delimite los bloques de basamento de las islas Santa Margarita y Magdalena (Sedlock, 1993; Fletcher et al., 2007).Entre las fallas SL y SM y la zona de falla Tosco-Abreojos (FTA) la plataforma continental está cortada por fallas menores que siguen el patrón estructural al noroeste de las fallas mayores…… 56

27 Proyección tridimensional de las estructuras interpretadas. Se observa el buzamiento del plano de falla para cada una de ellas. Las fallas Santa Margarita (FSM) y San Lázaro (FSL) se consideran las estructuras neogénicas principales que cortan la plataforma continental de Magdalena. Estas fallas tienen un buzamiento aparente de ~40° hacia el este y acomodan principalmente extensión. La falla San Lázaro corta la superficie del fondo marino en los perfiles 7550 y 7554…… 57

Lista de figuras (continuación)

Figura **Página**

28 Mapa de configuración del basamento acústico en la zona de estudio. Se considera que la tendencia al noroeste del alto de basamento (en rojo) está controlada por las fallas neogénicas Santa Margarita y San Lázaro que también controlan el afloramiento del basamento en las islas Magdalena y Santa Margarita. La cuenca antearco cretácico-terciaria Purísima profundiza al este (en azul). FTA falla Tosco-Abreojos……... 59

29 Marcador en zig-zag que se utilizó para interpretar los horizontes en las líneas paralelas a la costa y posteriormente poder correlacionarlos entre sí…… 60

30 Perfil que muestra los paquetes A, B y C. Semigraben separados por el alto estructural en el sector este del perfil. Se observa la divergencia de los paquetes en el centro de la depresión Tosco-Abreojos (CDP 700-1350), para posteriormente ascender hacia el oeste…… 61

31 Mapa de configuración de isócronas de los reflectores basales de los paquetes C, B y A. a) El espesor de este paquete define dos depocentros uno al sur controlado por la falla Tosco-Abreojos y otro al norte controlado por la falla San Lázaro en donde se observa la mayor profundidad con un máximo de 3.7 s en el perfil 7554. b) El reflector del paquete B presenta las mismas características pero a una profundidad mínima de 0.4 s en el perfil 7509 y una máxima de 2.3 s en el perfil 7554. c) El reflector del paquete A solo muestra una parte del alto estructural de basamento y se encuentra a profundidades más someras, siendo la mínima de 0.2s en el perfil 7501-7503 y una máxima de 1.4 s en el perfil 7554……... 64

32 Fallas interpretadas, actividad sísmica y magnitud de sismos reportados por Munguía y otros (comunicación escrita, 2014) y NEIC (earthquake.usgs.gov/regional/neic). En círculos verdes se marcan los sismos reportados por NEIC y sus magnitudes (1960-2004) y en círculos purpura los sismos reportados por Munguía y otros (2014). FT falla Tosco, FA falla Abreojos, FSL falla San Lázaro, FSM falla Santa Margarita……. 68

33 Reflector del basamento acústico obtenido en este trabajo. Se observa el alto estructural (en rojo) y su tendencia hacia el NW, así como la falla San Lázaro (FSL) y los eventos reportados por NEIC y Munguía y otros (2014)……... 70

Lista de figuras (continuación)

Figura **Página**

34 Perfil esquemático a lo ancho de la plataforma Magdalena. Este esquema es muy similar al propuesto por Brothers et al. (2012) 50 km al sur de la zona de estudio. En la imagen superior se tiene la cuenca San Lázaro controlada por la falla San Lázaro, ésta cuenca se acerca a la falla Tosco-Abreojos y tiene un ancho mayor que en los perfiles de sur. Éste perfil se realizó en base a lo observado en las líneas escaneadas por PEMEX. En la imagen inferior se presentan las dos cuencas asimétricas; Tosco-Abreojos y Santa Margarita-San Lázaro, controladas por las fallas principales en esta zona, así como los reflectores que dividen las secuencias A, B y C. La zona sismogenética se propone con base en la sismicidad reportada porMunguía y otros, (2014) frente al puerto de San Carlos (comunicación escrita). FTA falla Tosco-Abreojos, FSM-FSL falla Santa Margarita-falla San Lázaro…….. 73

Lista de tablas

Tabla **Página**

1 Parámetros de adquisición de los datos del prospecto “Santo Domingo” que fueron tomados en 1979. Los perfiles constan de un streamer (cable registrador donde se conectan los canales) con 48 canales separados a 50 m y una fuente activa compuesta por 7 cañones de aire. El tiempo de registro fue de 6 s con un intervalo de muestreo de 0.00 2 s, por lo que en total se cuenta con 3000 muestras por cada canal. El patrón de tiro 0-307-2682 nos indica que de la fuente al primer receptor existe una distancia de 307m y de la fuente al último receptor se tiene una distancia de 2682 m…… 12

Capítulo 1. Introducción

1.1 Introducción

La microplaca de Baja California (Figura 1) es un fragmento de corteza continental que se ha separado (rifted) de la región continental de México y ha sido capturado por la placa del Pacífico en los últimos 10-15 Ma (Michaud et al., 2006; Plattner et al., 2007; Brothers et al., 2012). La formación y posterior captura de microplacas continentales en márgenes de subducción se controla de alguna manera por la losa oceánica subyacente, posiblemente a través de tracción basal o cizalla distribuida y transmitida a través de la interfaz de la litósfera continental (Bohannon y Parsons, 1995; Nicholson et al., 1994; Brothers et al. 2012). La formación de cuencas de antearco es debida a la flexión de la cuña continental durante la subducción de la placa oceánica. La plataforma Magdalena es considerada como una cuenca antearco, resultado de la flexura y subducción de la placa de Farallón por debajo de la placa Norteamericana. Las cuencas de antearco son una zona con subsidencia en el complejo de subducción frente al arco volcánico. Con una abundante carga tectónica, la cuenca de antearco forma una depresión topográfica (batimétrica) que actúa como una trampa sedimentaria y puede acumular un espesor considerable de sedimentos (Tankard, 2002).

Para conocer las características tectonoestratigráficas de una cuenca antearco se requiere de un conocimiento “a detalle” de su geometría, características estructurales y relaciones estratigráficas. Las cuencas de antearco contienen un registro casi continuo de sedimentación marginal activa durante la convergencia de placas. La arquitectura estratigráfica en cuencas de antearco refleja los cambios en el espacio de acomodación, el cuales debido a la interacción a la fuerza descendente de la placa oceánica (tectónica), la carga del sedimento y los cambios eustáticos del nivel del mar (Dickinson, 1995).

Este estudio está motivado por conocer más sobre la estructura y la estratigrafía de la plataforma Magdalena, localizada frente a las costas de Baja California Sur, y enclavada en una cuenca antearco. Se cuenta con información de sísmica de reflexión propiedad de Petróleos Mexicanos que fue tomada en esta región a principios de los años ochenta. Como es sabido, este tipo de información muestra la viabilidad del uso de imágenes sísmicas de fuente activa para definir la estructura cortical somera, en este caso, a través de un límite de placas tectónicas. Este trabajo de tesis se enfoca en el procesamiento e interpretación de parte los datos sísmicos de PEMEX y cubren aproximadamente un área de 260 km lineales en la parte central de la plataforma (Figura 1). Las aportaciones consisten en definir las características sismo estructurales de la zona y la configuración del basamento acústico.

1.2 Objetivos y metas

El objetivo de este trabajo es procesar e interpretar perfiles sísmicos de reflexión 2D para estudiar la estructura y la estratigrafía sísmica de un sector de la plataforma Magdalena que ayuden a un mejor entendimiento de la actividad tectónica de la región, que auxilie en la evaluación de riesgo, entre otras cosas. Se busca obtener la configuración del basamento acústico (si es que está presente), identificar fallas geológicas y las características geométricas de las principales secuencias sismoestratigráficas. Un objetivo particular es verificar la existencia de estructuras geológicas activas del sistema de falla Tosco-Abreojos en la zona (p.e.Spencer y Normark, 1979), pero con una configuración más completa.

Se espera que los resultados aportados en el presente trabajo proporcionen información que ayude a mejorar el entendimiento en la evolución de este límite de placas, así como los mecanismos que conducen a la captura de microplacas y proporcionen acotamientos en la edad de deformación en la zona, lo cual contribuirá a mejorar el entendimiento de la dinámica y evolución de la microplaca de Baja California y del Golfo de California.

1.3 Área de estudio

La región de estudio corresponde a una parte de la zona central de la plataforma Magdalena, localizada a lo largo del margen occidental de Baja California Sur (Figura 1). Esta plataforma se considera una cuenca antearco, es somera y de una superficie de bajo relieve. Está limitada al este por las tierras altas de la Sierra La Giganta y se extiende ~100 km mar adentro a profundidades de agua de 500 mbsl (metros bajo el nivel del mar, por sus siglas en inglés) antes de terminar abruptamente en el talud continental (Normak et al., 1987), al noroeste se extiende hasta la vecindad de Isla de Cedros y al sureste está limitada por una cuenca submarina frente al pueblo de Todos Santos. El área de estudio se localiza al este de la zona de falla Tosco Abreojos y al oeste de las Islas Magdalena y Santa Margarita, frente al puerto de San Carlos, B.C.S. (Figura 1 y 3).

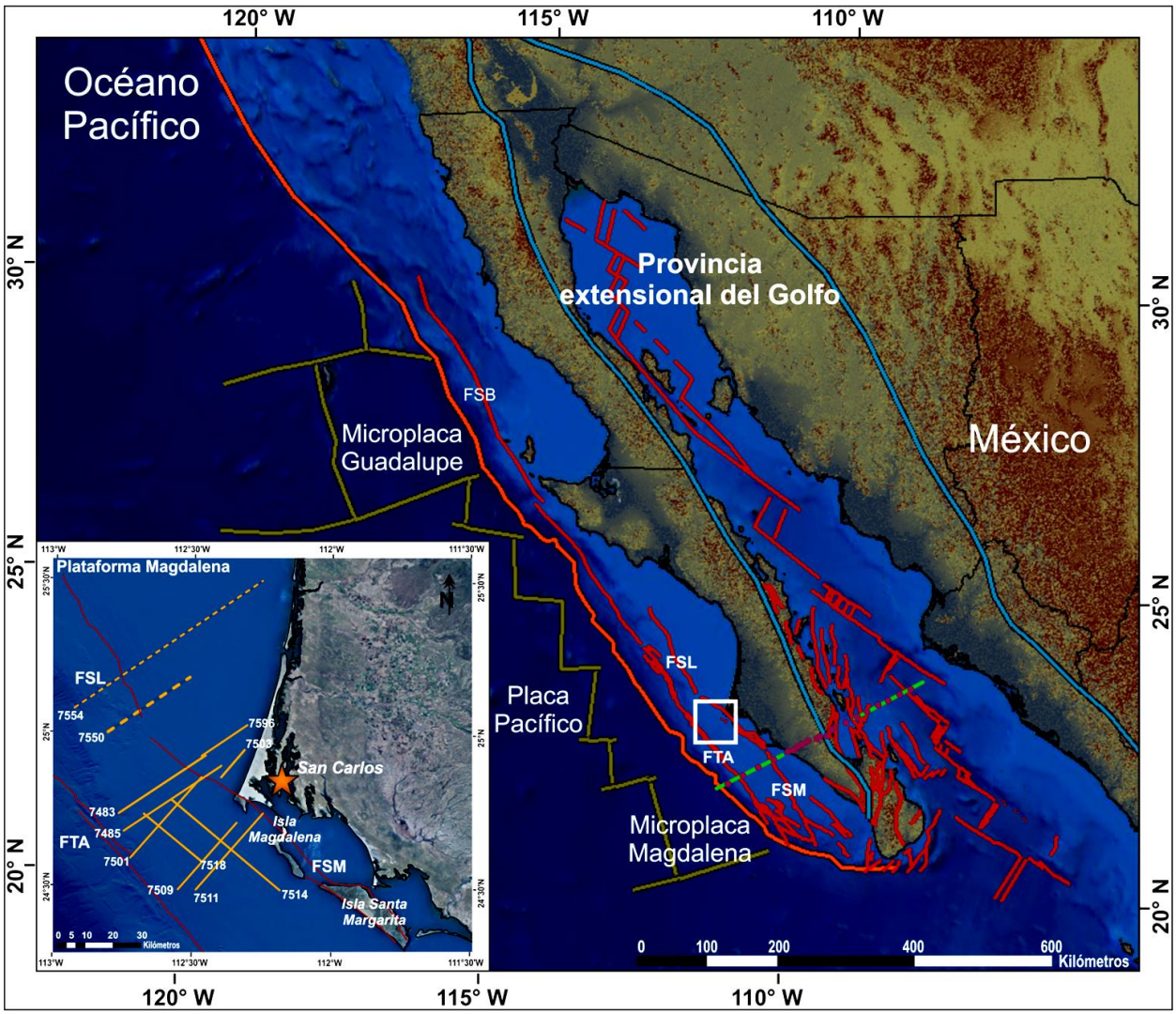


Figura 1. Baja California, México. Área de estudio (recuadro negro). Líneas sísmicas del prospecto Baja California. En líneas continuas amarillas se muestran las líneas procesadas para este trabajo y en líneas discontinuas se muestran 2 líneas escaneadas por PEMEX. En líneas rojas, fallas en la región. En línea naranja representa la trinchera fósil, en verde los límites de las microplacas Guadalupe y Magdalena. La línea verde es un perfil de sísmica de refracción y reflexión realizado por Brothers et al. (2012). Los círculos rosas son los receptores marinos y terrestres. Falla San Benito (FSB), Falla Tosco-Abreojos (FTA), Falla San Lázaro (FSL), Falla Santa Margarita (FSM). Modificado de Fletcher et al., (2007) y Brothers et al., (2012).

1.4 Cuenca de antearco

Los márgenes convergentes se inician debido a un proceso de envejecimiento de la litosfera, un enfriamiento y aumento de densidad de la misma y un desacoplamiento en el límite océano-continente (Keary y Vine, 1990). En esta transformación de margen pasivo (divergente) a margen activo (convergente) empiezan a producirse notables modificaciones en el antiguo margen, en especial en las proximidades de la fosa y

sobre la vertical de la zona de subducción. Cuando la zona de subducción se localiza entre el antiguo límite de la corteza continental y la corteza oceánica adyacente se individualizan, desde el océano al continente, los dominios de la fosa de trinchera, el prisma de acreción, la cuenca de antearco, el arco volcánico y la cuenca intraarco (Figura 2).

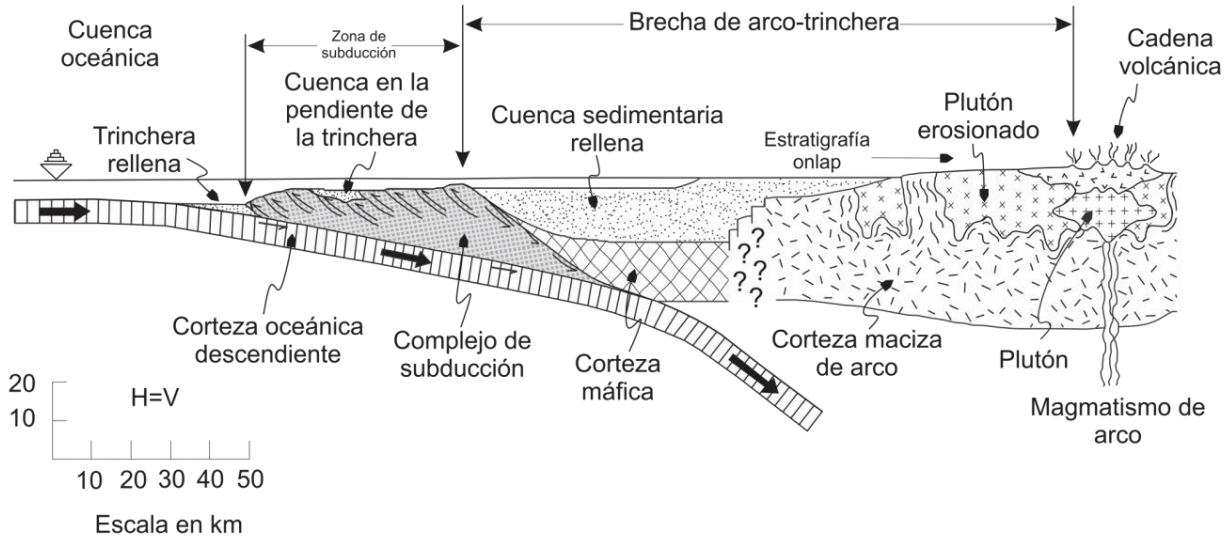


Figura 2. Sección esquemática de un margen tipo pacífico mostrando la posición de la cuenca de antearco con respecto a los volcanes y plutones, y el complejo de subducción (cuña acrecionaria) a lo largo del muro interno de la trinchera. Modificada de Dickinson 1995.

Según Miall (1990), una cuenca de antearco es una parte del complejo de subducción que forma una terraza o una dorsal frente al arco volcánico, generando una depresión que actúa como trampa sedimentaria. La Formación de una cuenca de antearco se genera por la flexura y subducción de una placa oceánica. La flexura o la inclinación descendente de esta placa durante la subducción invariablemente genera un fracturamiento y fallamiento. Con una abundante carga y desarrollo sedimentario, la cuenca de antearco forma una depresión topográfica, la cual actúa como una trampa sedimentaria con un espesor considerable de sedimentos (Tankard, 2002).

La subsidencia en la cuenca de antearco está controlada por la combinación de los siguientes factores: (a) Flotabilidad negativa de la corteza oceánica (descendente). (b) Hundimiento por flexión del sustrato de la cuenca de antearco bajo la creciente carga tectónica del complejo de subducción. (c) Carga litostática debido al relleno de la

cuenca de antearco. (d) Subsidencia termotectónica del flanco del arco magmático (Dickinson, 1995).

La escena tectónica para una cuenca de antearco está en los márgenes de placas convergentes (en las zonas de subducción) y entre los ejes de las trincheras y arcos magmáticos paralelos específicamente en las zonas de subducción de los contactos entre placas oceánicas – continentales.

1.5 Evolución geológica y tectónica del margen occidental de Baja California Sur

La plataforma Magdalena se extiende al norte hasta Isla de Cedros, a partir de donde toma una morfología de una serie de cuencas y cordilleras submarinas en el borde continental de Baja California. Al sur, la plataforma está limitada por una serie de cuencas submarinas al suroeste de Todos Santos (Figura 3). Fletcher et al. (2007) se refieren a este rasgo como cuenca Todos Santos y hacen notar que la plataforma Magdalena y esta cuenca coincide cercanamente con el límite más al sur de la microplaca Magdalena (Figura 3).

El modelo de evolución de la cuenca de Magdalena sugiere que la subducción inicia con una litósfera oceánica (placa Farallón) antigua y fría que debió tener una tasa de subducción alta. Progresivamente, entre el Cretácico temprano y el Eoceno-Oligoceno la placa oceánica es más joven. Se ha propuesto que este cambio progresivo en las condiciones de subducción se refleja en tres fases de deformación (Busby et al., 1995). La primera fase consiste en un periodo altamente extensional en la posición intra-arco durante el Triásico-Jurásico (220-130 Ma), caracterizado por un arco intraoceánico. La segunda fase se trata de extensión moderada en posición antearco y trasarco (140-100 Ma). Esta segunda fase está representada por un arco de islas separadas del margen continental por una estrecha cuenca de trasarco; del lado opuesto se desarrolló la cuenca de antearco. La tercera fase de deformación cambia a un sistema compresional del arco continental (100-70 Ma). Durante esta fase la cuenca de trasarco se cierra y el arco continental se eleva y erosiona, lo que representa la

principal fuente de sedimentos hacia la cuenca de antearco (Ingersoll y Busby,1995; Kimbrough et al, 2001;2003).

1.6 Estructuras en la región de estudio

El acercamiento de la dorsal Pacífico-Farallón a la antigua trinchera marca el fin de la subducción y el inicio de un cambio tectónico mayor en el límite de placas. Remanentes de la placa Farallón (microplacas Guadalupe y Magdalena) indican que en el Mioceno cambió el ángulo de convergencia previamente al cese de la subducción en el Mioceno temprano (Michaud et al., 2006). Este cambio ocasionó el desarrollo del sistema de fallas San Benito Tosco-Abreojos que acomodó parte de la cizalla entre las placas Pacifico y Norteamérica antes y después de iniciar el rift del Golfo de California (Normark et al., 1991). Estudios geofísicos y geodésicos indican que este sistema de falla aún acomoda la deformación entre la península de Baja California y la placa Pacífico (Michaud et al., 2006; Dixon et al., 2000) y parte de la deformación en el borde continental afectó el registro estratigráfico de la cuenca de antearco, e hizo más angosto el margen continental al norte de la Isla cedros (Lonsdale, 1991). La plataforma Magdalena es cortada por este sistema de fallas del Neógeno, el cual se extiende a todo lo largo de la plataforma Magdalena (Spencer y Normak, 1979). El segmento más al norte es la falla Abreojos que corta el talud continental con rumbo 320° a lo largo de ~180km y 10–15-km de ancho formando la depresión Abreojos (Normark et al., 1987). El segmento más al sur de la estructura se denominó como falla Tosco (Normark et al., 1987); esta falla se extiende a lo largo del límite oeste de la región sur de la plataforma Magdalena por ~220 km. Las fallas Santa Margarita y San Lázaro se localizan al este de las fallas Tosco-Abre Ojos y aparentemente terminan al sur frente a la cuenca Todos Santos (Fletcher et al., 2007). La falla Santa Margarita-San Lázaro controla el flanco oeste de la depresión o cuenca Santa Margarita-San Lázaro de ~25 km de longitud ~10 km de ancho, esta depresión alargada se desarrolla paralelamente al trazo de la falla (Figura 3).

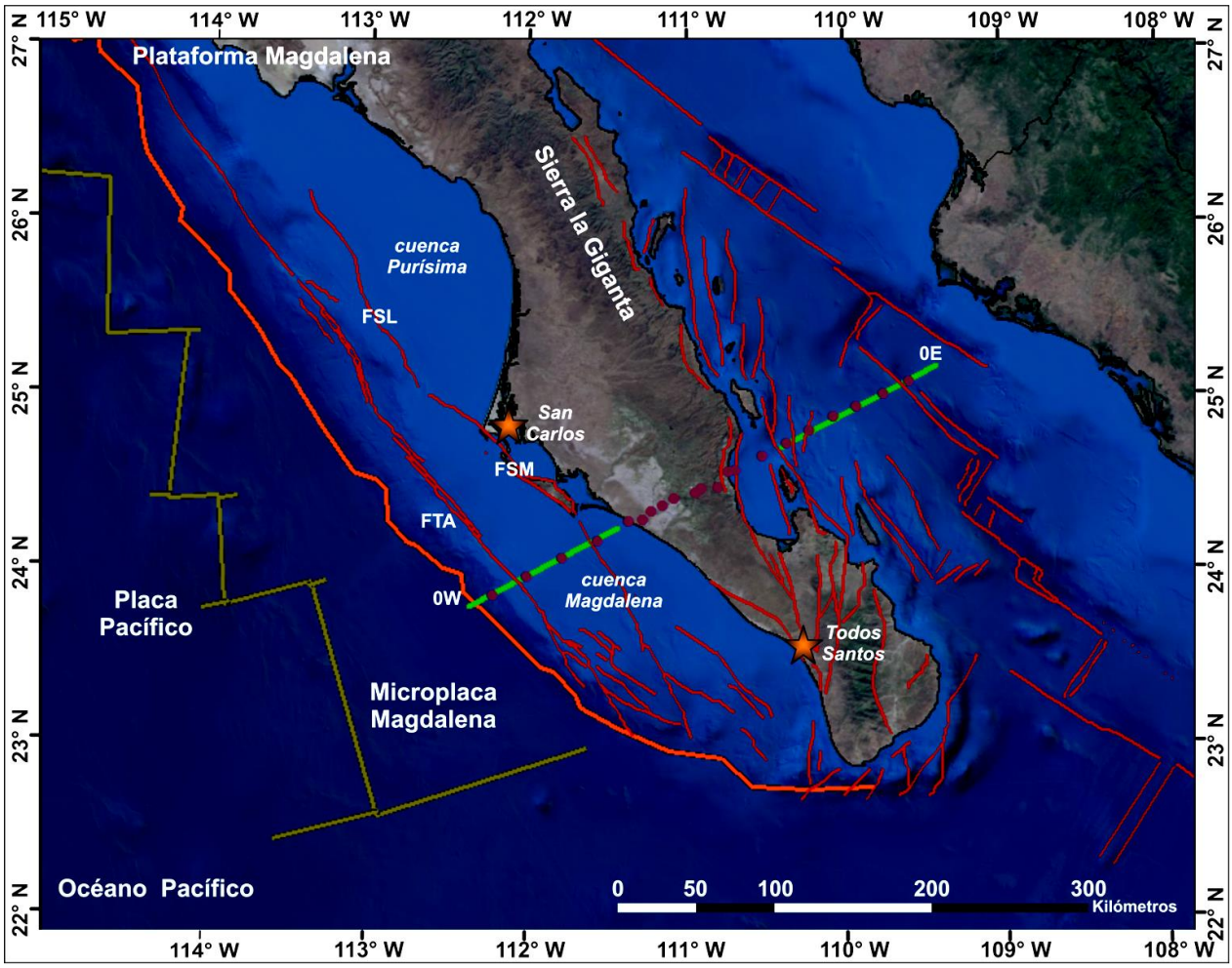


Figura 3. Principales fallas en la región sur de Baja California. Se muestra el límite de la Plataforma Magdalena, coincidente con el límite de la microplaca Magdalena (línea verde olivo). La línea naranja representa la trinchera fósil. La línea verde es un perfil de sísmica de refracción y reflexión realizado por Brothers et al. (2012). Los círculos rosas son los receptores marinos y terrestres. Falla San Lázaro (FSL), Falla Santa Margarita (FSM). Falla Tosco-Abreojos (FTA).Modificada de Fletcher et al., (2007) y Brothers et al. (2012).

Brothers et al., (2012), infirieron que la placa (slab) flotante caliente se extiende ~40 km de la trinchera fósil tierra a dentro y que el rebote isostático tras el desprendimiento de la placa levanta el margen y expone la plataforma Magdalena a una erosión. El subsecuente enfriamiento, subsidencia y los esfuerzos transtensionales a lo largo de la plataforma (a partir de ~8 Ma) permitió la entrada de sedimentos terrígenos hacia la trinchera fósil. El desprendimiento de la placa oceánica subducida y el rebote resultante del margen proporcionó el mecanismo para la rápida elevación y exhumación del complejo de subducción (Figura 4).

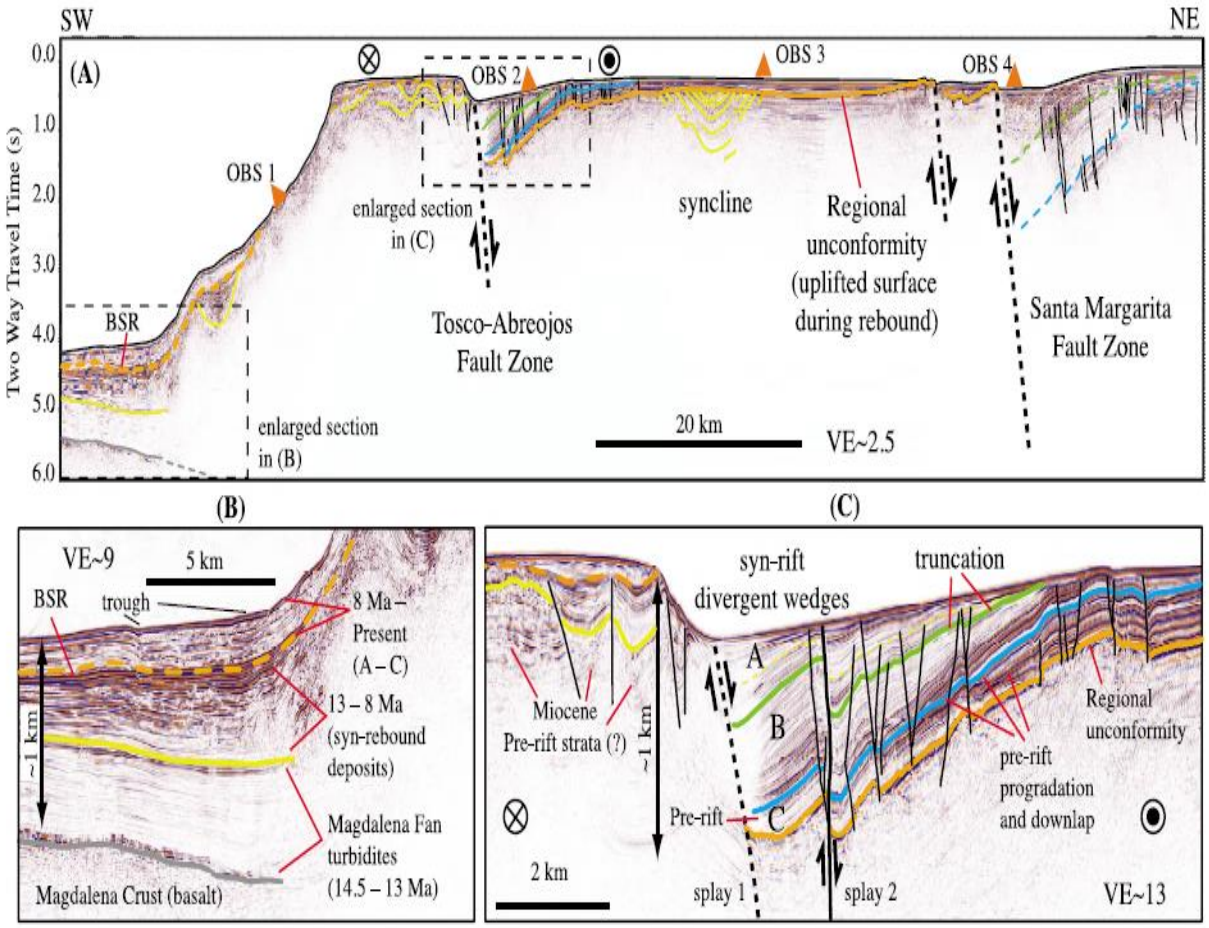


Figura 4. Perfil sísmico de reflexión 0W (Figura3), tomado de Brothers et al. (2012). (A) la línea 0W (longitud total = 111 km) y la ubicación de los receptores OBS 1-5. (B y C) secciones mostrando la estratigrafía de la paleo-trinchera y de la cuenca Tosco-Abreojos. BSR en B corresponde a un sismoreflector con edades de ~8 Ma (Yeats et al., 1981).

Capítulo 2. Metodología de procesamiento de datos sísmicos

La secuencia de procesamiento de datos de sísmica de reflexión convencional, tanto para sísmica superficial como profunda, se puede dividir en tres fases según Yilmaz (1987): 1) procesamiento Pre-apilamiento o Pre-stack, 2) procesamiento de Apilamiento o Stack y 3) procesamiento Post-apilamiento o Post-stack.

2.1 Sísmica de reflexión marina

La sísmica de reflexión marina es una técnica de exploración geofísica que permite obtener información del subsuelo marino controlando los tiempos de llegada de ondas generadas artificialmente por una fuente de energía en la superficie. El retorno de estas ondas elásticas a la superficie después de reflejarse en las distintas interfaces del subsuelo marino, se registra en arreglos de sensores (hidrófonos). De esta manera se logra obtener información sobre la estructura interna del subsuelo marino. También es posible obtener información de las amplitudes y frecuencias de éstas ondas.

La utilización a gran escala de la sísmica de reflexión marina data de los años 60, y su impulso es debido fundamentalmente a la exploración petrolera. El costo promedio respecto a la sísmica terrestre es del orden de un 80% más barato, de ahí su masiva utilización en prospección de hidrocarburos. Una de las grandes ventajas de la sísmica de reflexión marina es la posibilidad de realizar adquisición de datos en continuo a lo largo de perfiles previamente determinados.

2.1.1 Parámetros de adquisición

La geometría empleada por PEMEX para adquirir los datos de sísmica de reflexión, consistió en la utilización de tendidos de 2657 metros cada uno, compuestos por 48 hidrófonos separados a cada 50 metros y una fuente de 7 cañones de aire. En la Figura 5, se muestra el esquema básico del tendido empleado en campo. El tiempo de grabación fue de 6 s. y el intervalo de muestreo de 0.002 s.

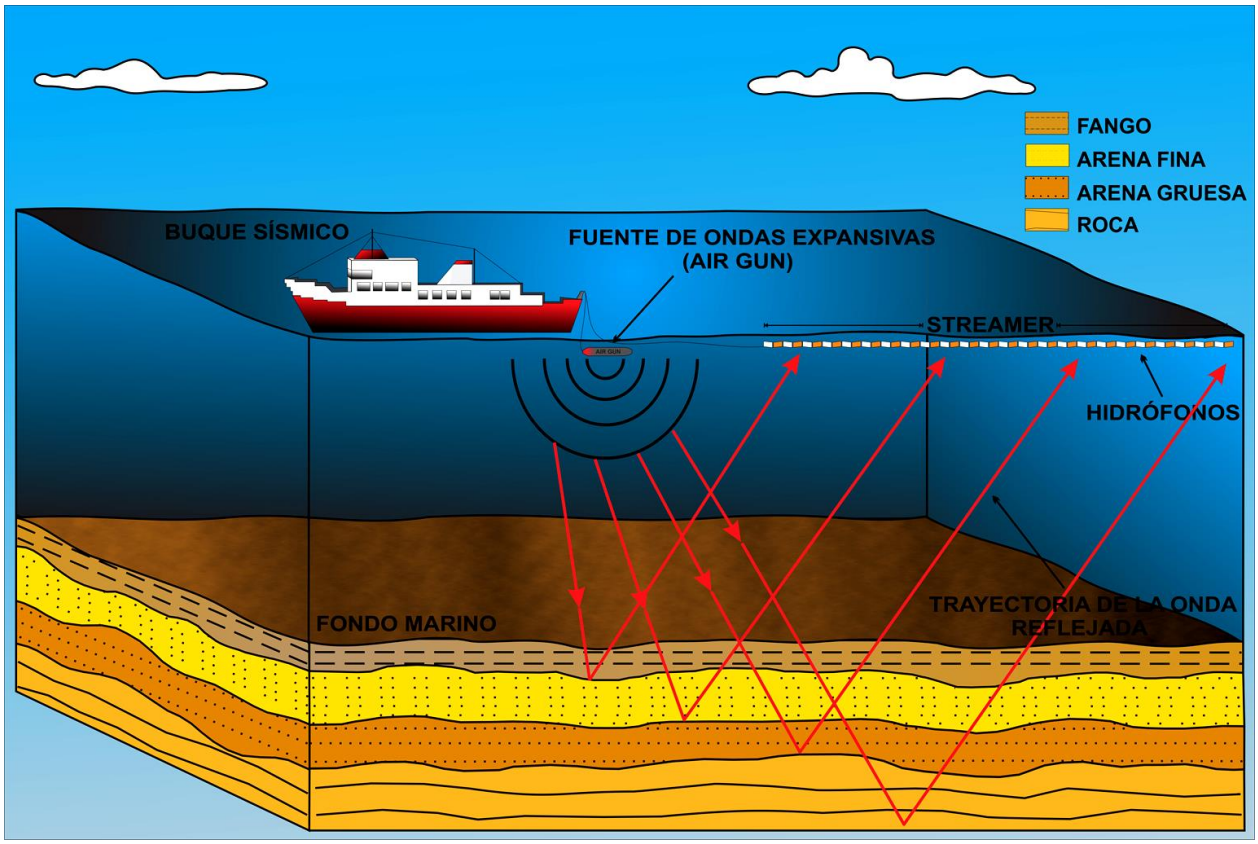


Figura 5. Adquisición sísmica marina, el barco sísmico va "disparando" las ondas y adquiriendo información del subsuelo. La profundidad del streamer es de 9.1 m y consta de 48 hidrófonos a lo largo de éste. Una vez recolectado los datos, se realiza el procesamiento de los mismos.

Los datos de sísmica de reflexión de PEMEX fueron colectados entre 1978 y 1980 durante la ejecución del Prospecto Baja California, aunque en los archivos SGY aparecen como SD, por lo que se considera se refiere a la región de Santo Domingo (Tabla 1). Los datos están grabados en formato SEG-Y (**S**ociety of **E**xploration **G**eophysicists, por sus siglas en inglés).

Tabla 1. Parámetros de adquisición de los datos del prospecto "Santo Domingo" que fueron tomados en 1979. Los perfiles constan de un streamer (cable registrador donde se conectan los canales) con 48 canales separados a 50 m y una fuente activa compuesta por 7 cañones de aire. El tiempo de registro fue de 6 s con un intervalo de muestreo de 0.00 2 s, por lo que en total se cuenta con 3000 muestras por cada canal. El patrón de tiro 0-307-2682 nos indica que de la fuente al primer receptor existe una distancia de 307m y de la fuente al último receptor se tiene una distancia de 2682 m.

PEMEX EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN	
REGIÓN	NORTE
ZONA	ZM
ÁREA	BAJA CALIFORNIA
PROSPECTO	S-D (511)
No DE LÍNEA	7503
FECHA DE OBSERVACIÓN	17-06-79
INFORMACIÓN GENERAL DE CAMPO	
No DE CANALES	48
TIEMPO DE GRABACIÓN [s]	6
INTERVALO DE MUESTREO [s]	0.002
FILTRO BAJO [Hz]	OUT
FILTRO ALTO [Hz]	125
DISTANCIA ENTRE ESTACIONES [m]	50
DISTANCIA ENTRE P.T. [m]	25
PATRÓN DE TIRO [m]	0-307-2682

2.1.2 Procesamiento de datos sísmicos

El procesamiento sísmico permite tratar los datos grabados durante la adquisición sísmica de manera que se pueda obtener una imagen fidedigna del subsuelo. Para ello se emplean herramientas que modifican los datos sísmicos en el ámbito temporal y espacial, tratando de aumentar la relación señal-ruido y logrando que la imagen obtenida sea fiel a la estructura geológica de la zona estudiada (Yilmaz et al., 2001).

En este apartado describiremos con más detalle cada uno de los pasos del procesado realizado en los perfiles (ver Figura 6). Los datos (en formato SEG-Y) fueron

trabajados con el software comercial ProMax™ de la plataforma LandMark (de la compañía Halliburton), el cual utiliza el sistema operativo UNIX.

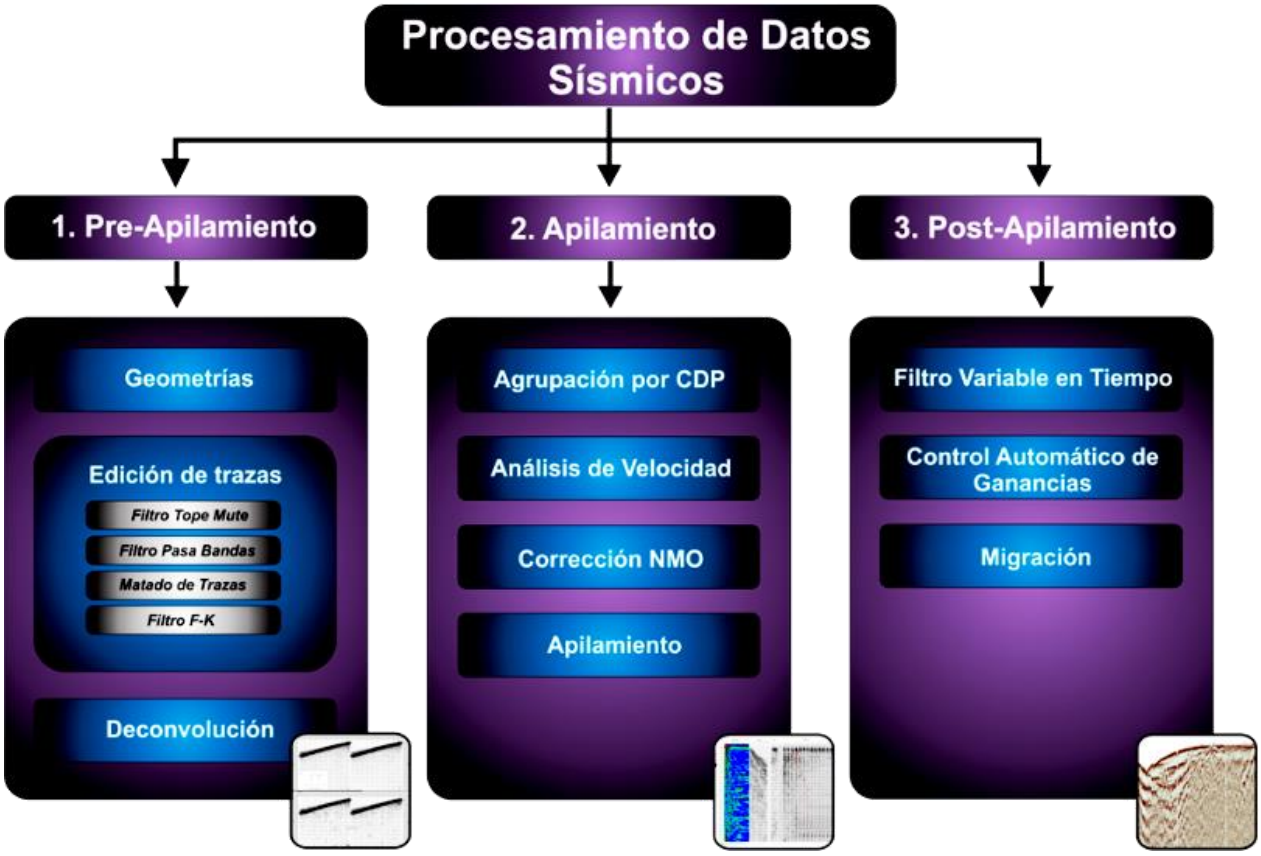


Figura 6.Secuencia básica de procesamiento de datos sísmicos de reflexión multicanal 2D según Yilmaz, 2001. 1) etapa Pre-apilamiento; donde una de las operaciones más significativas son la geometría y deconvolución. 2) Apilamiento; el punto fundamental es el análisis de velocidad. 3) Post-apilamiento; siendo la migración uno de los algoritmos finales que se aplican. En cada uno de estas etapas intervienen una serie de tratamientos fijos, mientras que hay otros algoritmos que se pueden aplicar en cualquier momento del procesado (filtrado, escalado de amplitud, etc.).

2.1.2.1 Pre-Apilamiento

2.1.2.1.1 Definición de geometrías

La asignación de geometrías establece la distancia entre la fuente (disparos), y el primer receptor, la distancia entre receptores, el número de trazas por registro y las coordenadas X, Y de cada disparo, y los posibles cambios en la dirección de la línea sísmica (azimut). Es necesario introducir el número de canales que grabaron cada disparo perteneciente a cada línea y especificar el primer y último canal que grabó en

cada disparo. La geometría es la etapa más importante porque es el primer paso para realizar el ordenamiento por CDP (Common Depth Point).

En este trabajo de tesis no se contó con la navegación o mapas que nos indique la geometría de las líneas símicas. Se cuenta con algunas (pocas) líneas sísmicas procesadas que aparecen dentro de un mapa del prospecto Bahía Magdalena. Para obtener las coordenadas de cada línea se escaneo, georeferenció y digitalizó este mapa y para obtener las coordenadas de cada fuente se realizó una interpolación con el número de fuentes de cada línea sísmica utilizando el software ORIGIN 7.5.Una vez obtenida la hoja de geometrías, se importó a la base de datos de ProMAX, con la finalidad de cargarla a las líneas. Si la geometría se realizó de manera correcta, la gráfica de los “gathers” (colección de trazas por canal) indica una pequeña bandera como muestra la Figura 7.

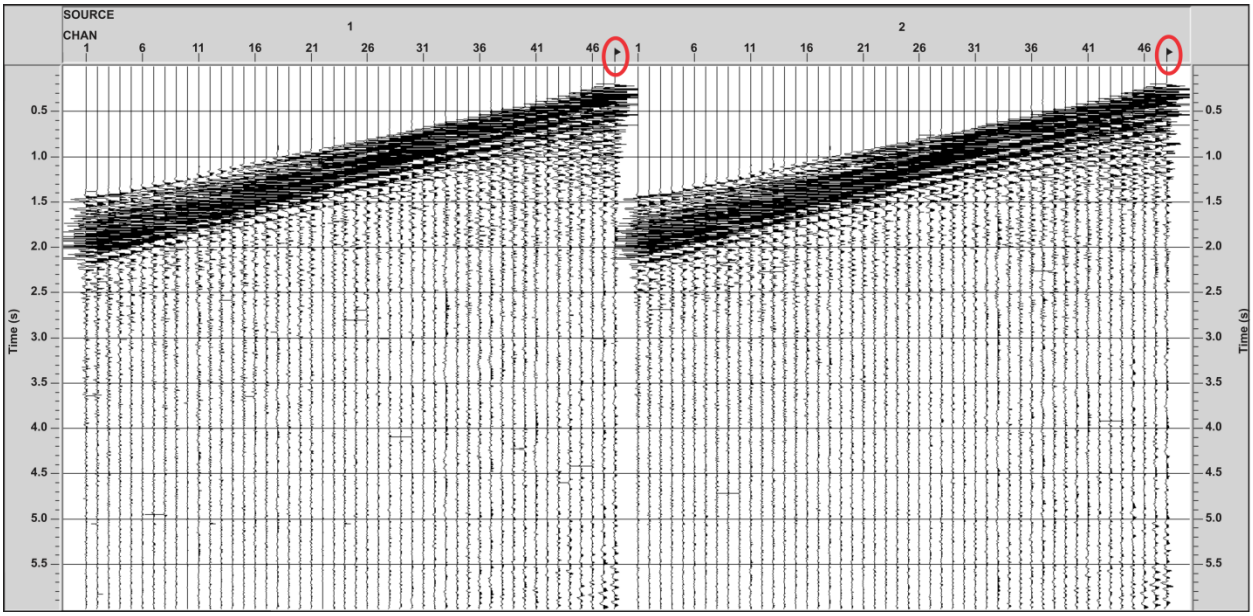


Figura 7. Conjunto de trazas de dos disparos (gathers) con geometría cargada correctamente. La banderita en el receptor más cercano a la fuente está a la derecha. Esta geometría indica que el arreglo fue con disparo lateral y los receptores cercanos a la fuente reciben la señal en menor tiempo. Cada traza de los tiros de campo queda perfectamente ubicada.

2.1.2.1.2 Edición de trazas

En este punto se realiza una visualización de los “shot-gathers” o conjunto de registros de todos los sensores para cada tiro de manera individual. El objetivo es aumentar la calidad de los datos iniciales para obtener mejores resultados en etapas posteriores y para ello se eliminarán las trazas que contengan un alto nivel de ruido. En este paso, de las 52 trazas grabadas en campo se seleccionaron las 48 que pertenecían a los canales de datos y se desecharon las 4 trazas de control de funcionamiento.

Filtro top mute. Este filtro elimina las señales de primeras llegadas correspondientes a las refracciones. De lo contrario se superpone en las reflexiones útiles.

Filtro pasa banda. Es uno de los filtros más empleados, y tiene como finalidad dejar pasar la señal en una banda limitada de frecuencias, de manera que se aceptan las frecuencias en el rango de interés para la sísmica y se rechazan aquellas frecuencias fuera de este rango. En este caso utilizamos el filtro de Ormsby, que es un filtro de frecuencias de forma trapezoidal que utiliza cuatro frecuencias de corte (Figura 8).

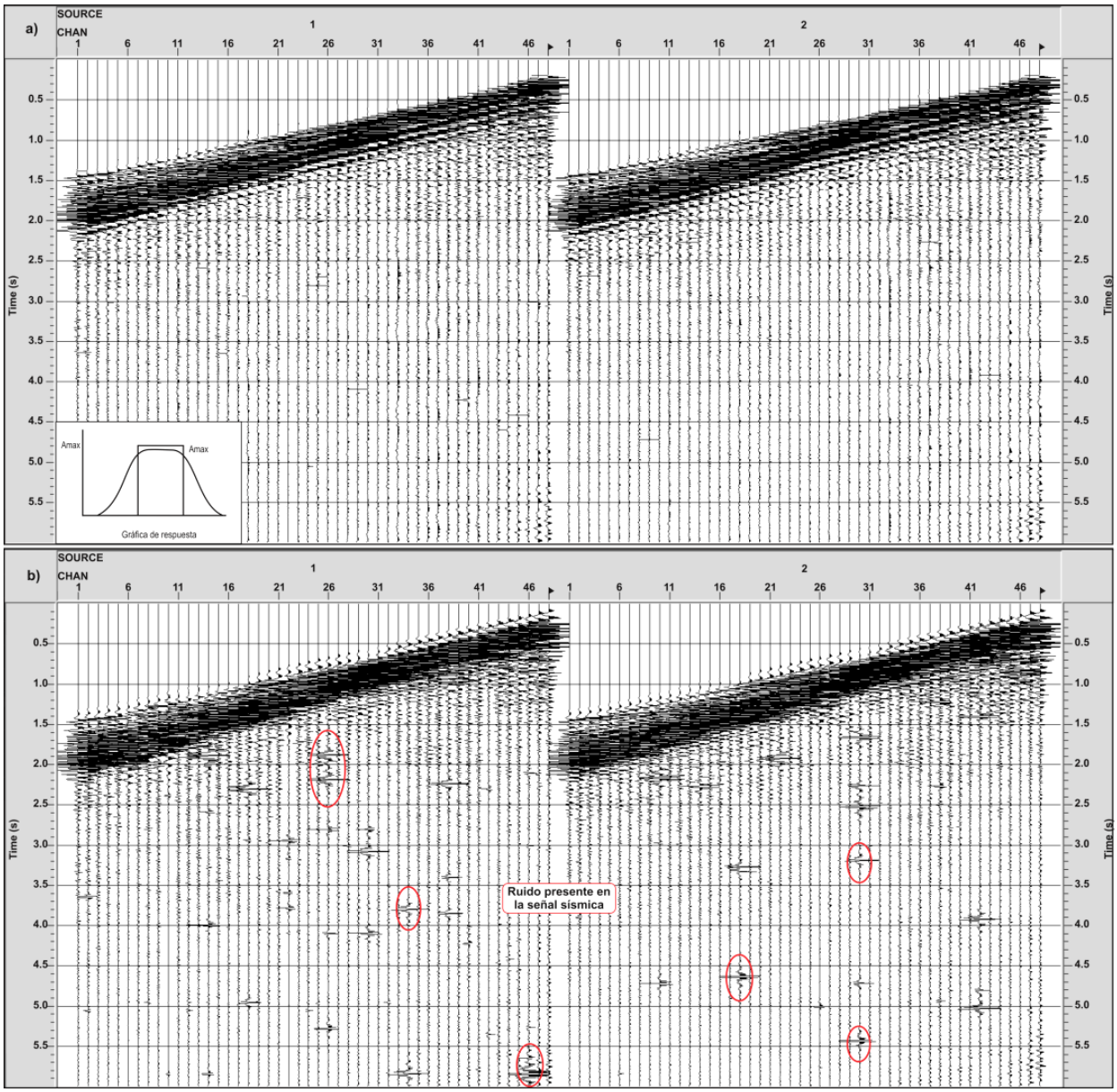


Figura 8. Filtrado con filtro pasabandas. a) Registro de dos gathers solo con su geometría. b) Los mismos gathers con el filtro aplicado, cuyo objetivo es resaltar los eventos de reflexión y ayudar a identificar y eliminar el ruido. Se aplicó un filtro paso banda de tipo Ormsby.

Matado de trazas. Se eliminan aquellas trazas que presentan ruido superficial o aquellas que reflejan ruido debido al mal funcionamiento de los sensores. Funciona igualando a 0 la traza a la que se le aplica para anular la interferencia con la señal (Figura 9).

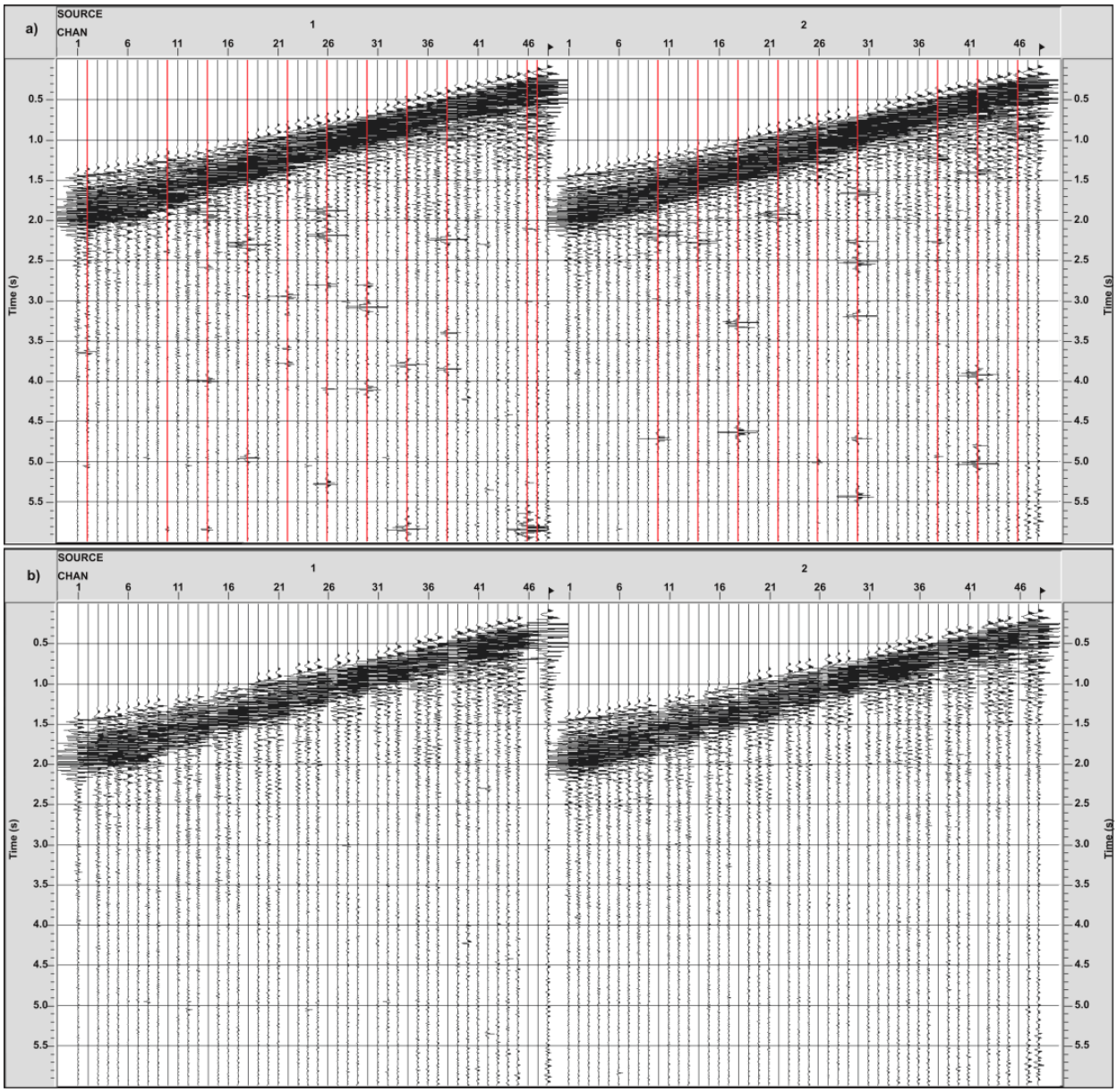


Figura 9. Eliminación de trazas ruidosas. (a) Registros sísmicos antes de la eliminación y (b) después del "matado de traza ruidosas, en donde se excluyen, total o parcialmente, aquellas trazas que presentan ruido o malas conexiones. El malfuncionamiento del hidrófono implica la pérdida de una traza después de su edición para eliminar trazas ruidosas.

Filtro F-K. Este método de atenuación de ondas de superficie trabaja en el dominio de frecuencias (f) y número de onda (k) (como muestra la Figura 10), es por ello que se conoce como filtro f-k.

Un filtro f-k primero aplica una transformada de Fourier a los datos sísmicos para llevarlos al dominio f-k. A partir de esta nueva representación de los datos, se aplica un filtro que elimina el área del dominio que se supone proviene de las ondas superficiales.

Para evitar el efecto del fenómeno de Gibbs, que se produciría si las frecuencias de *ground roll* (ondas superficiales como la Rayleigh y Love que se propagan con mayor energía a lo largo de la superficie libre de un sólido, estas son de baja velocidad y frecuencia) fueran eliminadas por completo.

Para esto se aplica una atenuación gradual del área de dominio f-k correspondiente al ruido coherente (Yilmaz, 2001). Además, ayuda en la atenuación del *Aliasing* (frecuencia superior a la frecuencia de Nyquist que contamina la señal digital), el cual se genera por un muestreo espacial insuficiente de la señal obteniendo una señal resultante con características diferentes a la señal original.

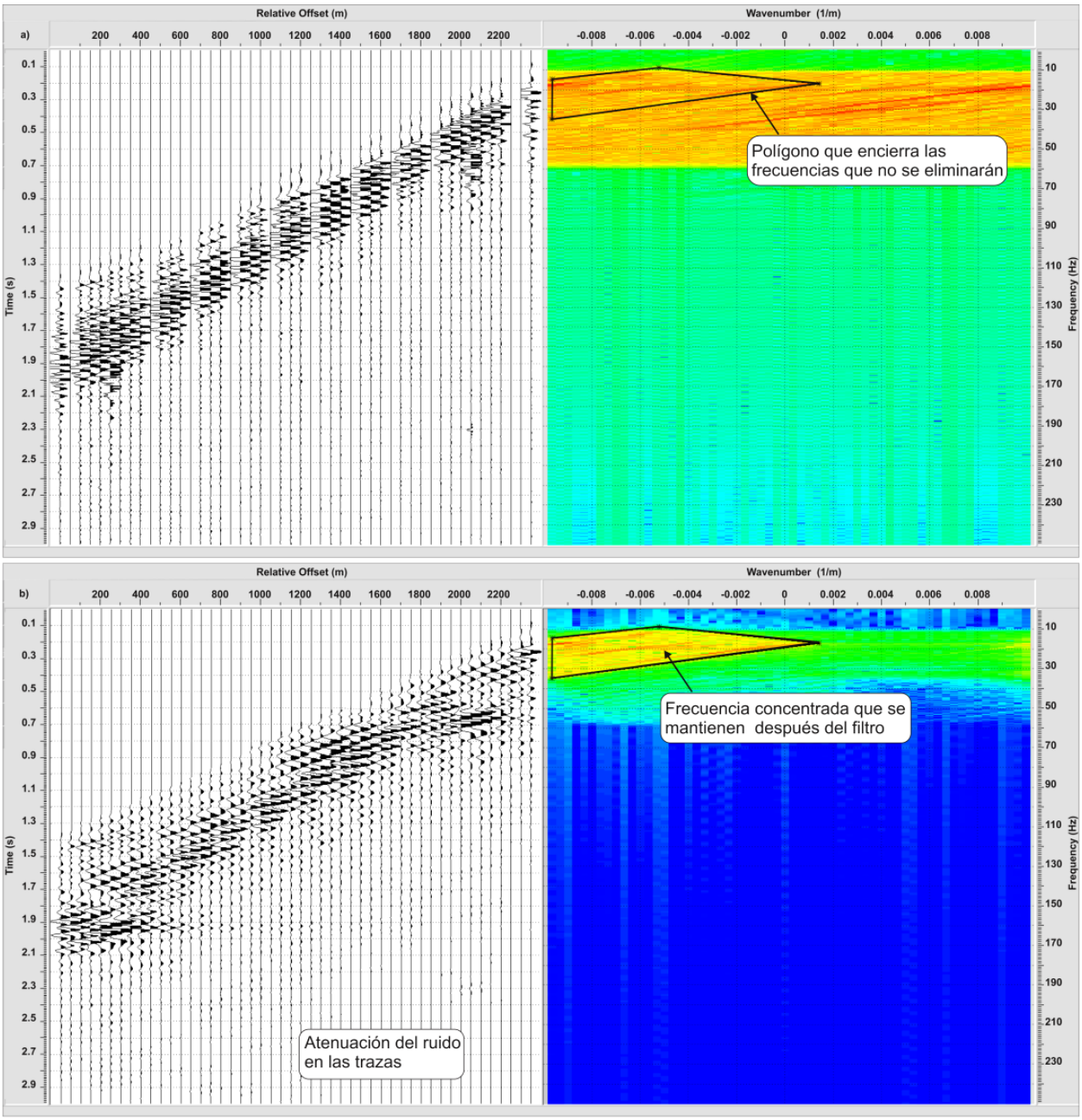


Figura 10. Análisis de frecuencias espaciales. a) Registro de campo y espectro en el dominio F-k b) Registro en campo atenuado y espectro en el dominio F-k. El filtro aplicado es de tipo trapezoidal (trazo negro) y consiste en dejar pasar las frecuencias y números de onda contenidas dentro del área del trapecio.

2.1.2.1.3 Deconvolución

La deconvolución es una de las partes más importantes del procesamiento pre-apilamiento, y su finalidad principal es extraer la función de reflectividades de la traza sísmica o, dicho en otras palabras, busca aumentar la resolución vertical de los reflectores resaltando así los eventos de interés, que en definitiva es lo que se quiere obtener del procesamiento final (Sheriff, 1995).

La deconvolución o filtraje inverso puede definirse como un proceso que neutraliza una acción de convolución previa (o filtración). La principal aplicación de los filtros inversos es eliminar los efectos adversos de una operación de filtrado previo que sucede en el campo del procesado de datos sísmicos de reflexión. Por otro lado, la deconvolución sirve para intentar eliminar los efectos que ejercen la fuente y/o el medio por el que se propagan las ondas sísmicas en la señal temporal registrada, quedando así solo las reflexiones primarias y múltiples en los datos.

Los parámetros escogidos para cada uno de los algoritmos, aparte de basarse en las características de cada traza, también se basaron en los resultados de la autocorrelación de los registros después de haberles aplicado la recuperación de amplitudes por medio de un filtro AGC (Automatic Gain Control) que mejora la visibilidad de los eventos que arriban en forma tardía en los que la atenuación o la divergencia del frente de onda ha causado el decaimiento de la amplitud.

Las autocorrelación nos ayuda a determinar la periodicidad de una señal a lo largo del tiempo, es decir, indica la correlación que existe entre una señal y ella misma indicando cuán concentrada está la energía en el registro y si existen en él mismo múltiples reverberaciones; mientras mayor sea la similitud entre las señales, el máximo de la correlación estará centrado en la fase cero (Sheriff, 1995).

En este trabajo se utilizó la deconvolución predictiva, la cual permite controlar la resolución de la ondícula deseada, debido a que puede atenuar eventos periódicos empleando una distancia predictiva. Usa información de la primera parte de la traza

para predecir y remover el efecto de la ondícula de la parte final de la traza sísmica (Manzoni, 2001). El filtro usado para estimar la serie en un tiempo futuro se denomina filtro predictivo.

2.1.2.2 Apilamiento

2.1.2.2.1 Agrupamiento por CDP

Las trazas de los distintos registros de campos deben ser agrupadas en función del punto de rebote en el subsuelo, esto es, reunir las trazas correspondientes a una misma serie vertical de puntos de profundidad común (CDP, Common Depth Point) aunque pertenezcan a distintos puntos de emisión (fuente) y recepción. Cada familia de trazas presenta un aspecto hiperbólico (Figura 11), análogo al de los registros de campo, que se origina por el creciente distanciamiento (X) que se refleja en un mayor tiempo de tránsito (T).

El motivo de generar el CDP en la sísmica multicanal es el de sumar (apilar o *stack*), convenientemente corregidas todas las señales que pertenecen a un CDP (o a un punto físico común del terreno) con la intención de aumentar la relación señal/ruido. No obstante, para sumarlas trazas correctamente es necesario corregir previamente los tiempos de llegada de las reflexiones debido a las variaciones de distancia entre los pares disparos-hidrófonos. Esta corrección se denomina *normal move out* (NMO), y para aplicarla es necesario conocer la velocidad del medio en que se propagan. Si colocamos las trazas que forman un CDP veremos que guardan una forma hiperbólica (Figura 12).

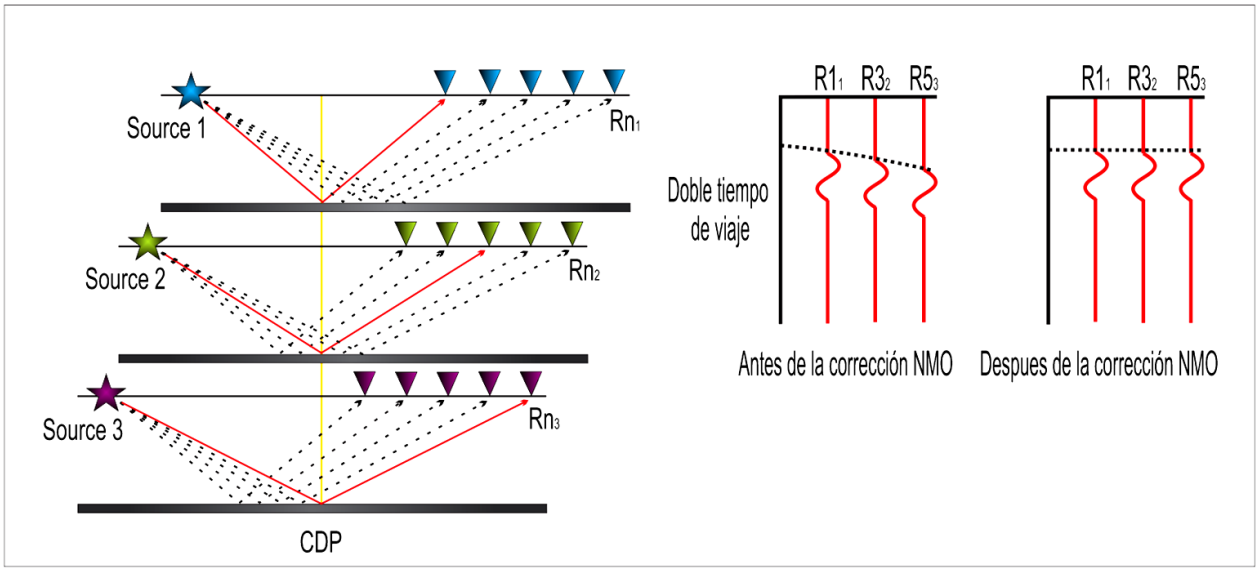


Figura 11.Geometría del punto de profundidad común (CDP en inglés).El CDP está muestreado por distintas parejas de tiros (S) y receptores (R). De lado izquierdo se observa el registro hiperbólico de las trazas por la diferencia de tiempo y la horizontalidad de las mismas por la corrección NMO (normal move out). Se deduce, por construcción, que el espaciado entre CDP es la mitad del espaciado entre hidrófonos y que las reflexiones en estos conjuntos poseen también trayectorias hiperbólicas.

2.1.2.2.2 Análisis de velocidad

Para proveer una relación señal/ruido mejorada, la sísmica multicanal requiere información acertada sobre la velocidad del subsuelo, la cual es obtenida mediante un análisis de velocidad. Este proceso se realiza sobre conjuntos o grupos de conjuntos de CDP determinados (Figura 12). El resultado es un campo de velocidades que se usará en el apilamiento para obtener la sección sísmica. Cuando hay poca precisión en el establecimiento de las velocidades de reflexión, la calidad de la sección apilada puede degradarse, ya que las reflexiones no se suman coherentemente.

Existen diversas formas de realizar el análisis de velocidad, desde análisis manuales tomando en cuenta un solo parámetro, hasta análisis digitales que pueden utilizar múltiples parámetros y grandes juegos de datos, que en definitiva lo que persiguen es obtener las velocidades del medio en el que se propaga la onda de la forma más exacta posible. En este estudio se utilizaron tres juegos de información a partir de cada CDP, para obtener las velocidades de forma interactiva, estos se describen a continuación.

Análisis de velocidad por el método de semblanza. La técnica del análisis de semblanza o coherencia consiste en la realización de un estudio de la coherencia lateral de la señal para diferentes trayectorias hiperbólicas posibles. Los valores de la energía resultante para las diferentes estimaciones se representan en un espectro de velocidades, donde los máximos corresponden a las reflexiones en cada CDP considerado.

Análisis de velocidad por el método de velocidad constante. Esta técnica consiste en realizar la corrección NMO y el *stack* para un conjunto de CDP y para todos los tiempos con una única velocidad. El resultado es la corrección de algunos de los reflectores para los cuales ya sabemos que ésa es la velocidad correcta. Las velocidades para los diferentes tiempos se obtienen repitiendo la operación para diferentes velocidades, obteniendo los paneles donde observamos directamente el efecto que cada velocidad produce sobre los reflectores en la sección sísmica sumada (Figura 12).

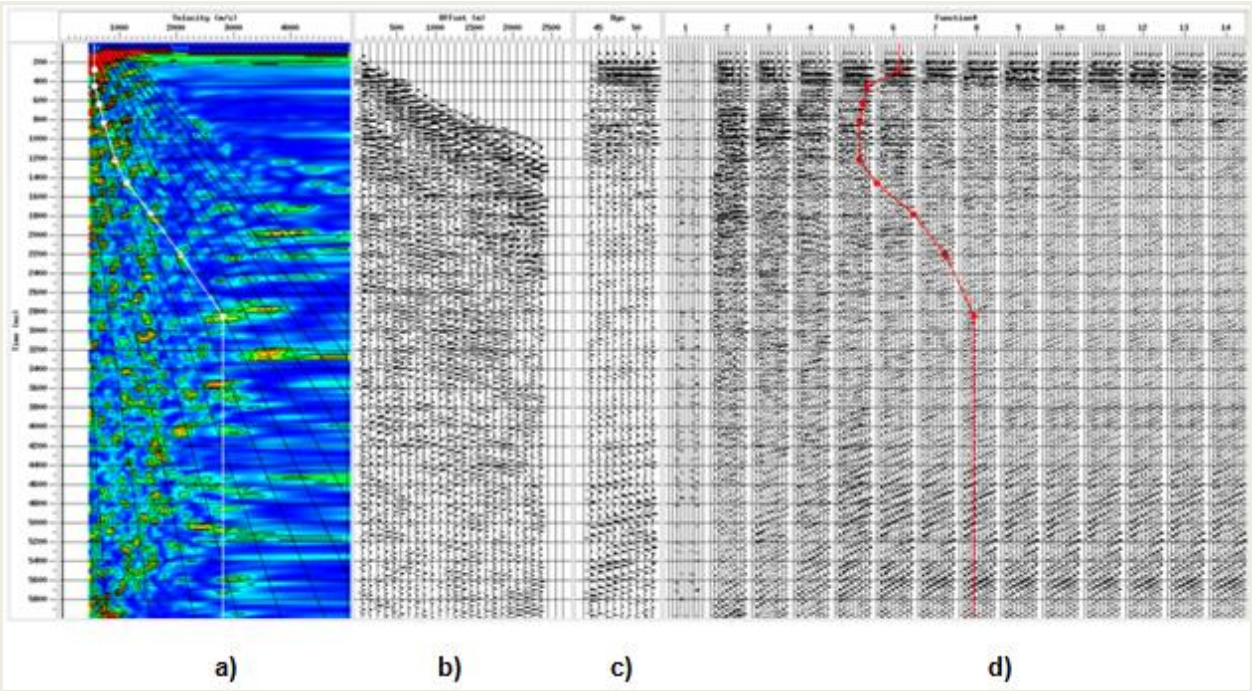


Figura 12. Análisis de velocidad sobre los CDP utilizando ProMAX. (a) Los colores "calientes" son altos de contraste en el análisis de semblanza, (b) CDP sin corregir, (c) CDP corregido por NMO, (d) conjuntos de CDP con los reflectores que mejor se apilan para una velocidad constante. El resultado es un campo de velocidades que se usa en el apilamiento para obtener la sección sísmica.

2.1.2.2.3 Corrección NMO

La corrección por NMO busca eliminar el carácter hiperbólico de los reflectores, horizontalizándolos mediante la información de las velocidades del medio. La corrección se aplica con los datos ordenados por CDP, donde los reflectores continúan conservando su carácter hiperbólico, para ser posteriormente apilados con ese mismo ordenamiento. Al aplicar la corrección NMO es necesario introducir un archivo con las velocidades del medio las cuales se obtienen del análisis de velocidades realizado previamente. Si el modelo es correcto se observara una horizontalidad en los reflectores; si los reflectores mantienen una hipérbola cóncava hacia abajo las velocidades aplicadas tienen valores elevados; por el contrario, si se observa una hipérbola cóncava hacia arriba, entonces las velocidades utilizadas son bajas.

2.1.2.2.4 Apilamiento

El apilamiento es una técnica de mejoramiento de la señal que promedia muchas trazas sísmicas. Este ordenamiento consiste en agrupar las trazas que por geometría pertenecen a un mismo CDP *gather* entre una fuente y un receptor determinado, obteniendo una traza apilada por cada uno; por construcción, el espaciado entre CDP's es la mitad del espaciado entre trazas, es decir, 25 metros. Las hipérbolas que representan múltiples estarán sobre-corregidas, y por lo tanto los múltiples serán atenuados al apilar las trazas.

Esta fase del procesamiento es la parte central de la secuencia final, ya que, en primer lugar, mejora la relación señal/ruido llevándola a su máximo; es decir, aumenta la resolución de las trazas, y en segundo lugar, genera la primera sección sísmica donde se podrán visualizar con mayor claridad los reflectores de interés, sus variaciones laterales y verticales, y permitirá realizar una interpretación geológica preliminar de la misma.

2.1.2.3 Post-Apilamiento

El objetivo final del procesamiento es obtener una sección sísmica que se asemeje, lo más posible, a la disposición geométrica de las secuencias sedimentarias estudiadas, y que posea suficiente contraste de impedancia acústica para poder identificar dicha disposición. A la sección de apilamiento se le suele aplicar un filtro variable en tiempo y un filtro de control automático de ganancia (AGC por sus siglas en inglés), además de un último procesamiento para mejorar su resolución y, sobre todo, para ubicar los reflectores en su posición real por medio de operaciones como la migración.

2.1.2.3.1 Filtro variable en tiempo

Debido a que el espectro de frecuencias decrementa con el tiempo de llegada de la señal sísmica, es necesario aplicar un filtro variable en tiempo. Este es un filtro pasa banda que además de eliminar las altas frecuencias atenuadas en tiempos grandes, también elimina el ruido asociado a bajas y altas frecuencias (y/o residual) generado en el apilamiento.

2.1.2.3.2 Control automático de ganancia AGC

Este es el tipo de ganancia más comúnmente usado. Durante la propagación de la onda en el subsuelo, esta sufre pérdida de energía tanto por transmisión y absorción. Para compensar este efecto, en procesamiento se suele aplicar un control de ganancia automática o simplemente AGC. Esta ganancia consiste en calcular el valor medio (absoluto) de la amplitud dentro de una ventana específica de tiempo, luego se obtiene el valor RMS (Root Mean Squared, raíz media cuadrática) de las amplitudes en dicha ventana, para luego obtener el cociente entre el valor RMS de las amplitudes y el promedio hallado. El escalar hallado es asignado a la función de ganancia, la cual se aplica a cada muestra dentro de la ventana temporal elegida.

2.1.2.3.3 Migración

Es un proceso que se aplica para corregir las difracciones que se producen en reflectores en una sección sísmica debido a un relieve pronunciado. Su objetivo es reubicar esta energía a su verdadera posición y ello se realiza provocando el colapso de estas difracciones actuando en sentido opuesto.

Entre los principales algoritmos se encuentra el de la migración de Kirchhoff, basado en la solución integral de la ecuación de onda. La respuesta a un punto de difracción es una hipérbola definida por una determinada velocidad y por tanto, la suma sobre su inversa coloca en fase a la difracción.

La migración de Stolt transforma los datos a un seudo-dominio de profundidad para aproximar a una velocidad constante de la tierra, luego reubica la energía en el dominio de la frecuencia-número de onda filtrando la velocidad de conversión. Posteriormente los datos son convertidos de nuevo al dominio del tiempo (Figura 13).

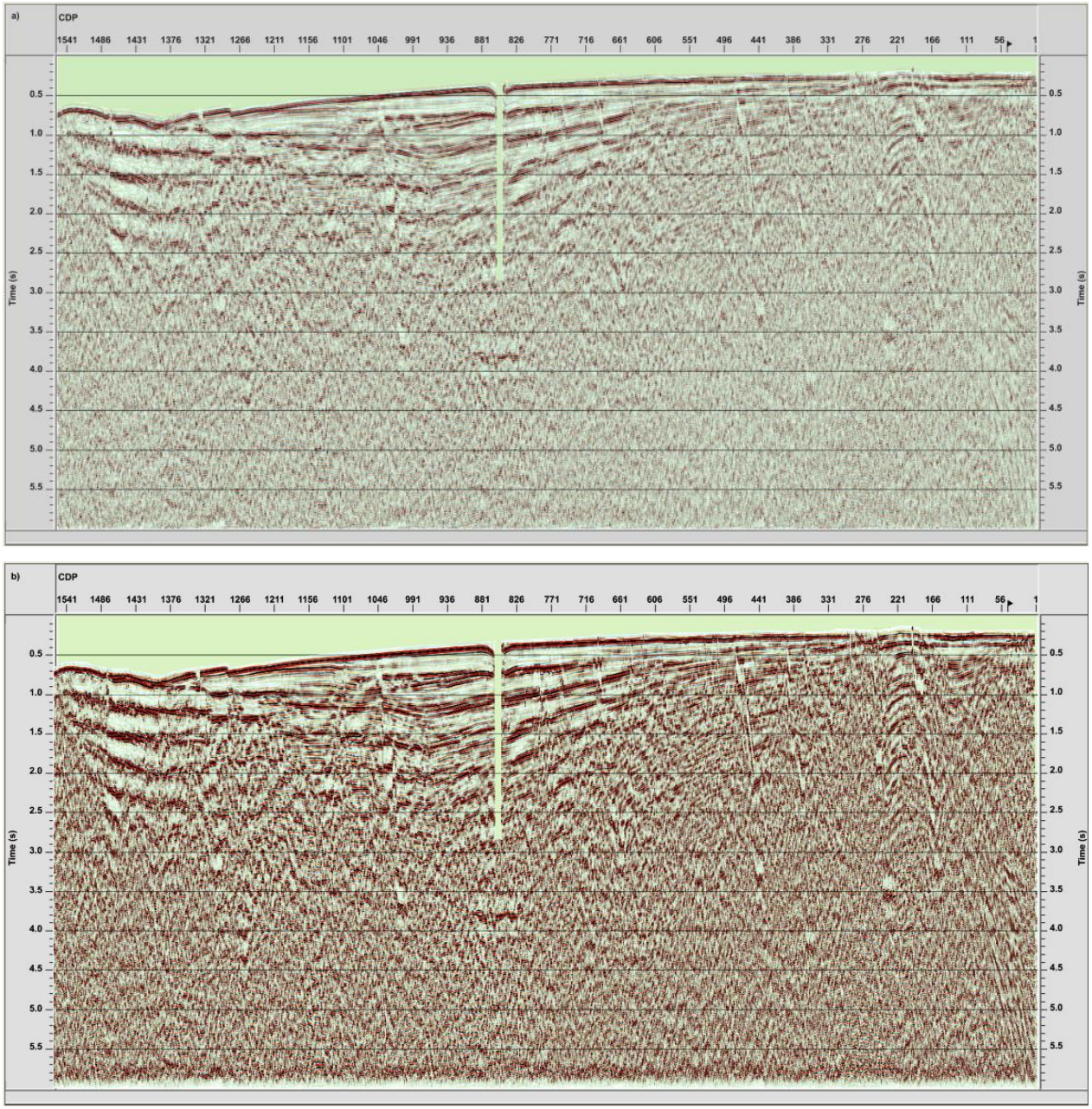


Figura 13. Migración sísmica. a) Imágen con apilamiento, b) imágen migrada. Esta sección contiene el tratamiento post-apilamiento, ganancia y filtro variante en tiempo. Se marcan mejor los reflectores, se corrigieron las difracciones provocadas por cambio brusco de algún reflector.

2.2 Interpretación Sísmica

Aquí se analizarán las características geofísicas observadas en las imágenes procesadas para posteriormente traducirlas como imágenes geológicas que representan la configuración del subsuelo. Se utilizó como herramienta de interpretación el *software* Seisworks© propiedad de LandMark™.

La interpretación estructural procede de la siguiente manera:

1. Detección de fallas
2. Propagación de horizontes
3. Conversión de tiempo a profundidad

Detección de fallas. La identificación de fallas es un paso importante en la interpretación sísmica debido a que da una primera aproximación del modelo estructural (Figura 14). El desplazamiento de las fallas puede ser vertical, horizontal o una combinación de ambos, visualizándose mejor el primero en secciones verticales y los segundos (fallas rumbo-deslizantes) en secciones horizontales.

Con frecuencia las fallas presentes producen un efecto de degradación de la imagen sísmica, como resultado de la complejidad geológica o difracción. Sin embargo algunas fallas no pueden ser observadas en datos sísmicos. Según Liner (2004), las fallas se pueden detectar o identificar en secciones verticales gracias a:

- Discontinuidad de los reflectores.
- Cambios abruptos en el buzamiento de los reflectores.

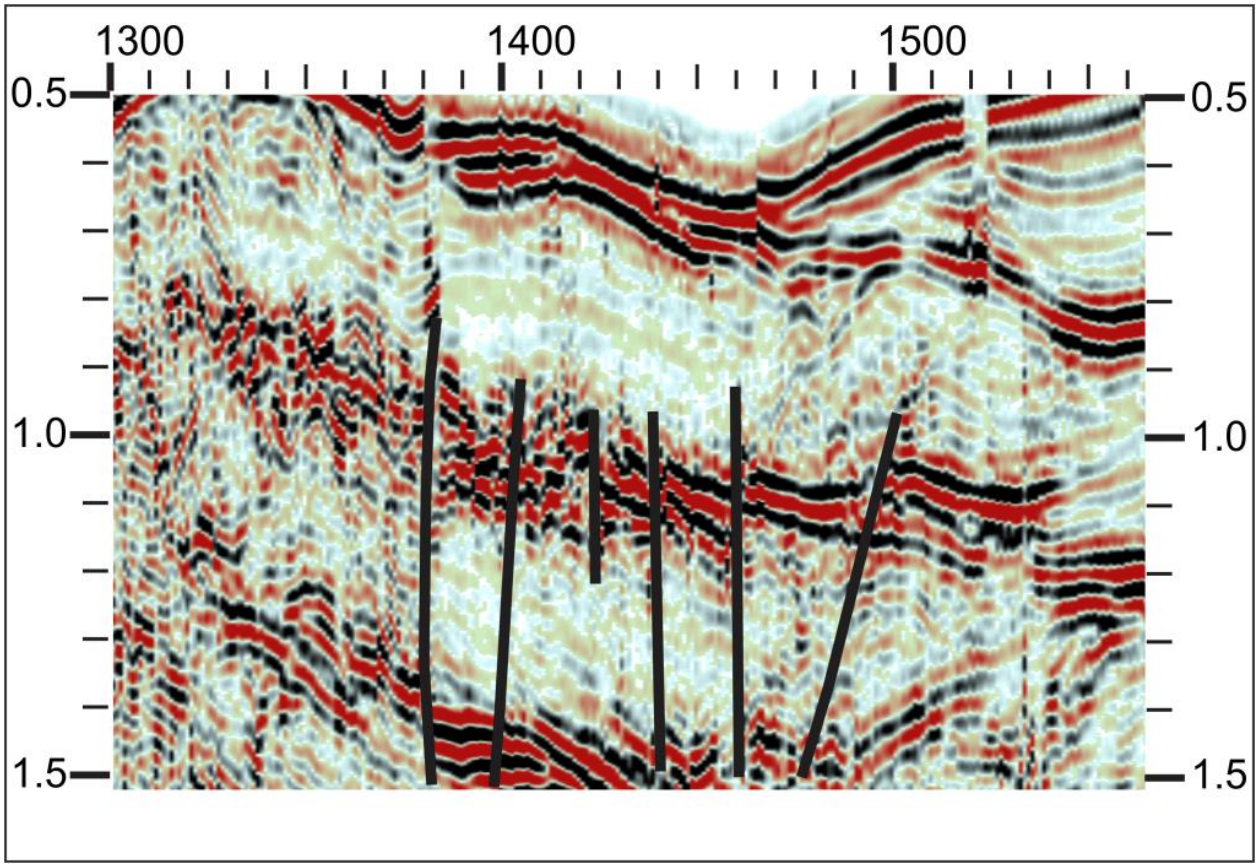


Figura 14. En esta sección se observa la terminación lineal de los reflectores debido a la presencia de una falla de tipo normal, donde el bloque de techo se mueve hacia abajo respecto del bloque de piso.

Propagación de horizontes. Es necesaria la identificación de fallas antes de la interpretación de horizontes debido a que las fallas segmentan los bloques y hace más sencillo el entendimiento del comportamiento de los horizontes. Según Liner (2004), el objetivo es crear un mapa estructural en tiempo que presente la geometría de la superficie de reflexión.

Conversión de tiempo a profundidad. La conversión de tiempo a profundidad es el proceso de combinar la estructura en tiempo sísmico, el control de pozo para ubicar eventos estratigráficos y las velocidades para crear un mapa estructural en profundidad. Sin embargo, en este trabajo no se hará dicha conversión, ya que no se cuenta con información de pozos cercanos a la zona de estudio.

2.2.1 Estratigrafía sísmica

La estratigrafía sísmica estudia la estratigrafía de secuencias apoyado en un marco básico geológico-geofísico pero interpretado a partir de datos sísmicos.

La estratigrafía de secuencias y sus superficies límites son definidas a partir del análisis geométrico de los reflectores sísmicos, complementado con datos de pozos (edad y litología) y de afloramientos (cuando sea posible).

Bally (1987), realizó una propuesta que engloba los aspectos más importantes de cualquier procedimiento de interpretación, la cual se presenta a continuación:

1. **Análisis de la secuencia sísmica.** Consiste en definir los paquetes de reflexiones en función de secuencias sísmicas y de sistemas sísmicos encadenados, identificando discontinuidades sobre la base de las terminaciones de los reflectores sísmicos (*onlap, downlap, toplap*, truncaciones, etc).

2. **Análisis de la secuencia mediante registros de pozos.** Se hacen estimaciones preliminares de las secuencias y los sistemas encadenados interpretando las litofacies depositacionales en los registros de pozo, usando núcleos y secciones finas.

3. **Sismograma sintético.** Su propósito es amarrar la información de los registros de pozo a la sección sísmica en profundidad con los registros en tiempo sísmico de la sección, además de conocer que causa las reflexiones sísmicas, mediante el entendimiento de los patrones de interferencia constructiva y destructiva de las ondículas individuales que se originan de los contrastes de impedancia. Bally (1987) recomienda que los dos primeros pasos se hagan independiente para que las discontinuidades sean identificadas.

4. **Análisis de facies sísmicas**. Su propósito es determinar, tan objetivamente como sea posible, todas las variaciones de los parámetros sísmicos dentro de las secuencias sísmicas y sistemas encadenados individuales, a fin de determinar los cambios laterales de litofacies y de tipos de fluidos.

   Los principales parámetros sísmicos usados son:
   - la geometría de los reflectores
   - la amplitud
   - la frecuencia
   - la continuidad
   - la velocidad de intervalo

2.2.2 Algunos términos de patrones de reflexión

Discordancia. Es la relación geométrica entre dos unidades estratigráficas en la que no existe paralelismo entre los estratos infra y suprayacentes, y la superficie de interrupción es una superficie de erosión.

Downlap *o* "**cuña de progradación"**. Es el solapamiento de los reflectores contra una superficie sísmica infrayacente que marca la base del paquete sísmico cuando el buzamiento de la superficie es menor que el de los estratos suprayacentes. Esta terminación se encuentra comúnmente en la base de las clinoformes y generalmente representa progradación del margen de la cuenca hacia aguas más profundas (marinas o lacustres).

Offlap *o* "solapamiento retractivo". Es el desplazamiento progresivo hacia el interior de la cuenca de las terminaciones de las unidades estratigráficas (Reguant et al., 1975).

Onlap. Solapamiento. Es el solapamiento de los reflectores contra una superficie sísmica infrayacente, cuando el buzamiento de la superficie es mayor que el de los estratos suprayacentes.

Toplap *o* "**cuña crestal"**. Es la relación geométrica que enfatiza la terminación de estratos inclinados contra superficies suprayacentes menos inclinadas. Esta geometría se debe a la no depositación o a una erosión muy leve.

Truncación. Es laterminación de estratos o reflectores sísmicos inclinados contra una superficie discordante, situación que permite delimitar el tope de una secuencia de depósito. Esta geometría se debe a importantes etapas de erosión.

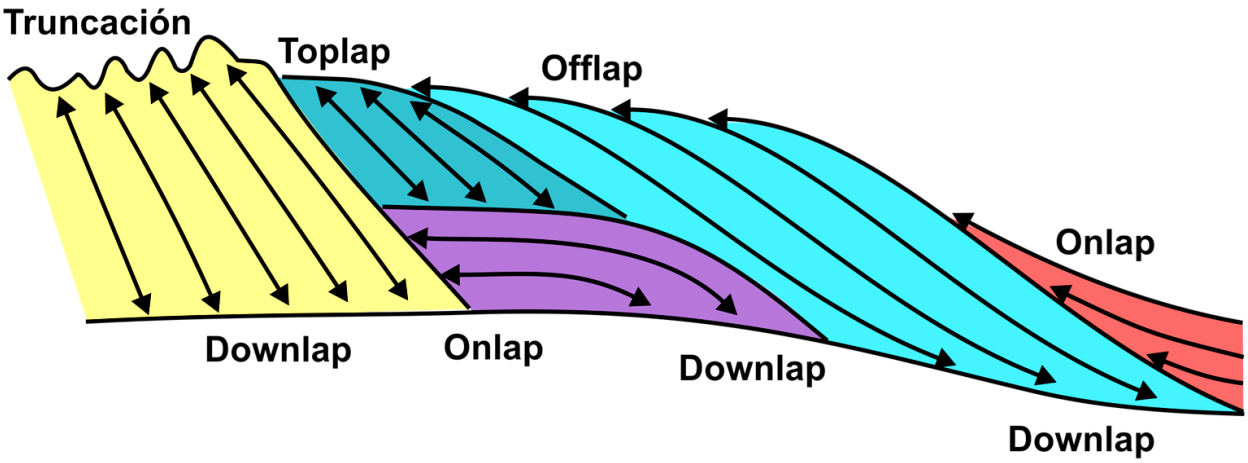


Figura 15. **Diferentes tipos de terminaciones estratigráficas que pueden ser identificadas en secciones sísmicas. Esto provee información de puede ser usada para definir el ambiente de depósito y la historia de depósito (modificada de Kendall, 2012).**

Capítulo 3. Resultados

3.1 Interpretación de los perfiles sísmicos

Los perfiles sísmicos aportan información importante de la arquitectura del relleno sedimentario y la orientación del patrón de las fallas en la plataforma Magdalena. Las secuencias sísmicas ayudan a incrementar el conocimiento en la evolución geológica del margen continental, especialmente desde el Mioceno Tardío al presente (Brothers et al., 2012). Los resultados de esta tesis inician con la descripción de la interpretación de los perfiles NE-SW y después con los dos perfiles NW-SE.

Los perfiles7596, 7501, 7503, 7509 y 7511 tienen una orientación NE-SW y un azimut de ~40° y los perfiles7485, 7483, 7550, 7554 tienen un azimut de ~56°. La separación entre cada perfil es de ~5 Km. Los perfiles 7518 y 7514 tienen un azimut de ~130° y una orientación NW-SE paralela a la línea de costa y están separados ~10km (Figura 16).

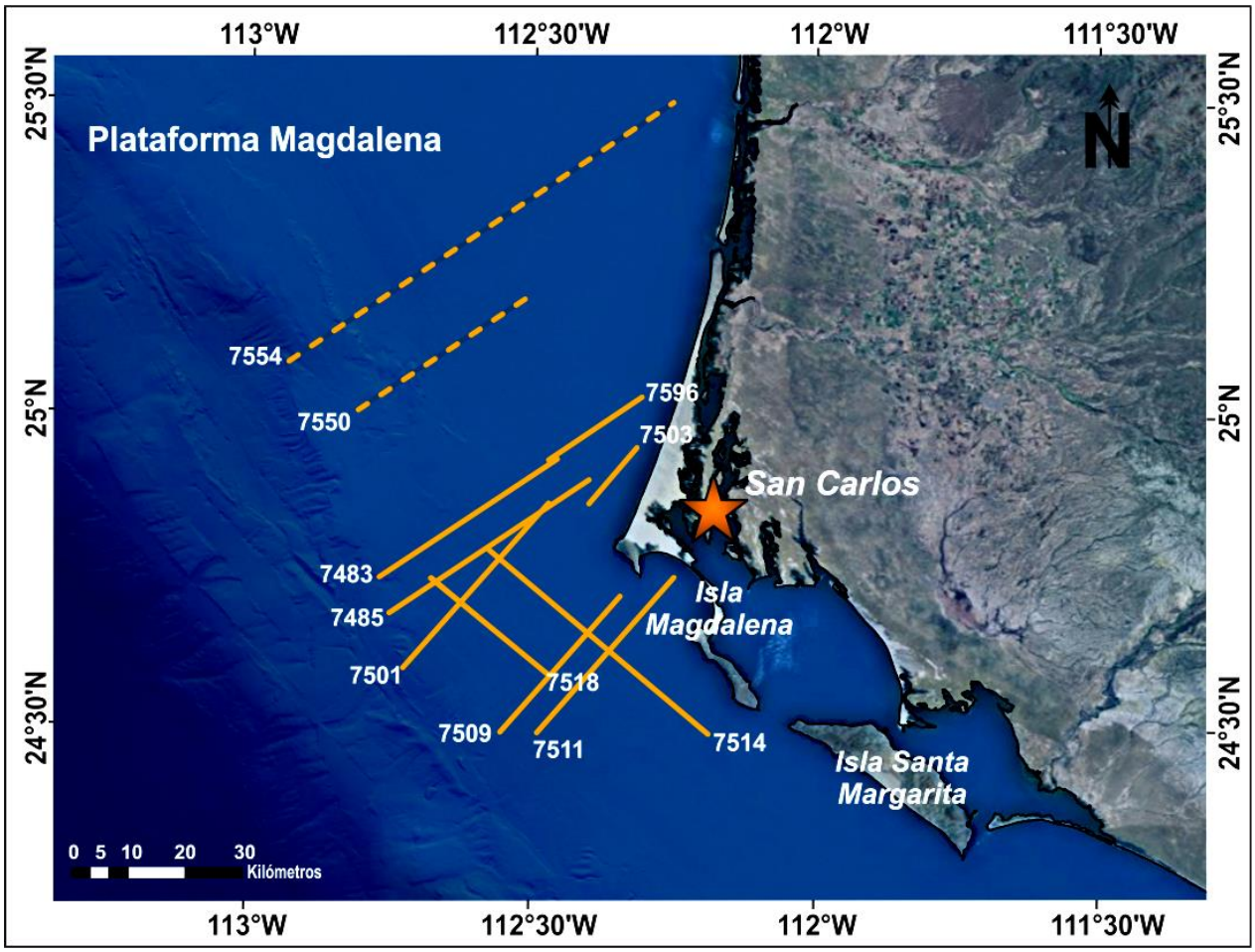


Figura 16. Mapa de localización de las líneas sísmicas en la plataforma Magdalena, B.C.S. En líneas continuas se muestran los perfiles procesados en este proyecto. Los perfiles tienen un azimut de 40°- 56° en las líneas transversales a la costa, y un azimut de ~130° en las líneas paralelas a la costa. En línea discontinua se muestran los perfiles procesados y escaneados por PEMEX, con azimut de 56°.

Como estamos mayormente interesados en la arquitectura de las fallas en la región de estudio, se presenta una descripción de los perfiles iniciando con aquellos con orientación NE-SW y que son trasversales a la línea de costa y a las principales estructuras. Posteriormente se describen los dos perfiles que tienen una orientación NW-SE. Las secciones sísmicas presentan una buena resolución desde los 0.3 segundos (s) hasta los 3.5 s, a partir de los cuales se tiene la presencia de zonas con señal difusa. En base a firmas de amplitud y geometría se toma un sismoreflector como referencia estratigráfica.

3.1.1 Perfil 7511.

Con 37 km de longitud, este perfil muestra una serie de fallas de tipo normal, en su mayoría visibles en la parte somera y que limitan un pequeño depocentro en el sector noreste (CDP 1150-1200). Se tiene la presencia de un alto estructural que divide dos depocentros neogénicos en la plataforma continental (Figura 17, CDP 110-1300). Este alto estructural se caracteriza por un basamento acústico limitado al noreste por la falla Santa Margarita (línea roja), ya reportada en la literatura (Spencer y Normak, 1979; Normak et al., 1987, Normak et al., 1991; Fletcher et al., 2007; Brothers et al., 2012, entre otros).

La falla Santa Margarita es el límite oeste de la cuenca Santa Margarita en forma de semigraben (Normak et al., 1987), que se observa en la parte oeste del perfil.

Hacia el oeste el espesor sedimentario aumenta y los reflectores profundizan en esa dirección (CDP 1350-1460). El bloque al oeste de la falla Santa Margarita contiene a la cuenca Tosco-Abreojos (CDP 200-1000). Se interpretaron 3 sismoreflectores continuos de alta amplitud (líneas horizontales en color), presentes en casi todo el perfil, que también presentan muy poco fallamiento. Hacia el noroeste estos sismoreflectores profundizan debido a la actividad de la falla Tosco-Abreojos y a condiciones batimétricas más profundas en el talud continental.

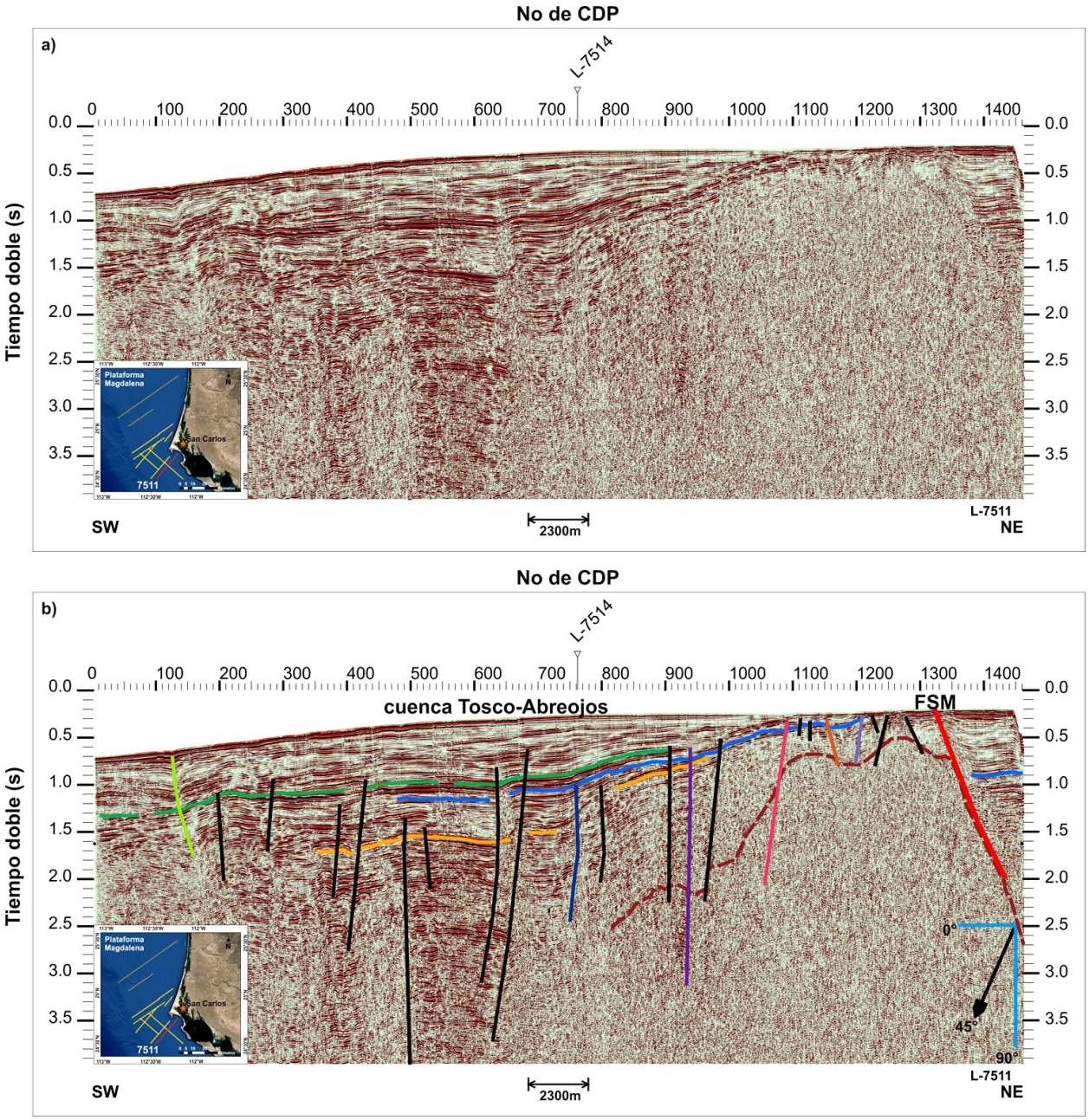


Figura 17. Línea 7511 en el extremo sur del área de estudio. a) Línea sin interpretar, b) Línea interpretada. Las fallas menores (en negro) tienen poco desplazamiento vertical. Las fallas en color son las fallas mayores que fueron correlacionadas entre los perfiles. La falla Santa Margarita (rojo) delimita un semigraben situado al este de la isla Magdalena que expone el basamento (línea discontinua). El sismoreflector más profundo y que aparece en la mayoría de las líneas sísmicas se utilizó como referencia estratigráfica (en color naranja). El perfil muestra una cuenca al oeste del alto de basamento y la superficie del fondo marino podría estar cortada por algunas de estas fallas.

3.1.2 Perfil 7509.

Tiene una longitud de 33 km y se ubica a 5 km al noroeste en paralelo al perfil 7511.Este perfil sísmico tiene “pocas fallas” y la mayoría no logran cortar hasta superficie, sin embargo, algunas fallas en el sector oeste sí cortan sedimentos recientes en los extremos del perfil, adyacentes al basamento acústico de isla Santa Margarita al este y en el quiebre del talud continental al oeste (Figura 18). En este perfil no alcanza a observarse la falla Santa Margarita.

En este perfil se observa una parte del alto de basamento de isla Santa Margarita al este. Se tienen zonas difusas por debajo del reflector de referencia (color naranja) que impiden ver la continuación del basamento en profundidad. Por arriba de este reflector, se observa que los reflectores tienen una pendiente suave al igual que el fondo marino y buzan ligeramente hacia el oeste (CDP 200-1200). Entre los CDP 200-400, en la parte más somera de la cuenca Tosco-Abreojos, se observa como los reflectores tienen terminaciones en tipo onlap y más al oeste entre los CDP 900-1100 los reflectores presentan terminaciones en tipo downlap.

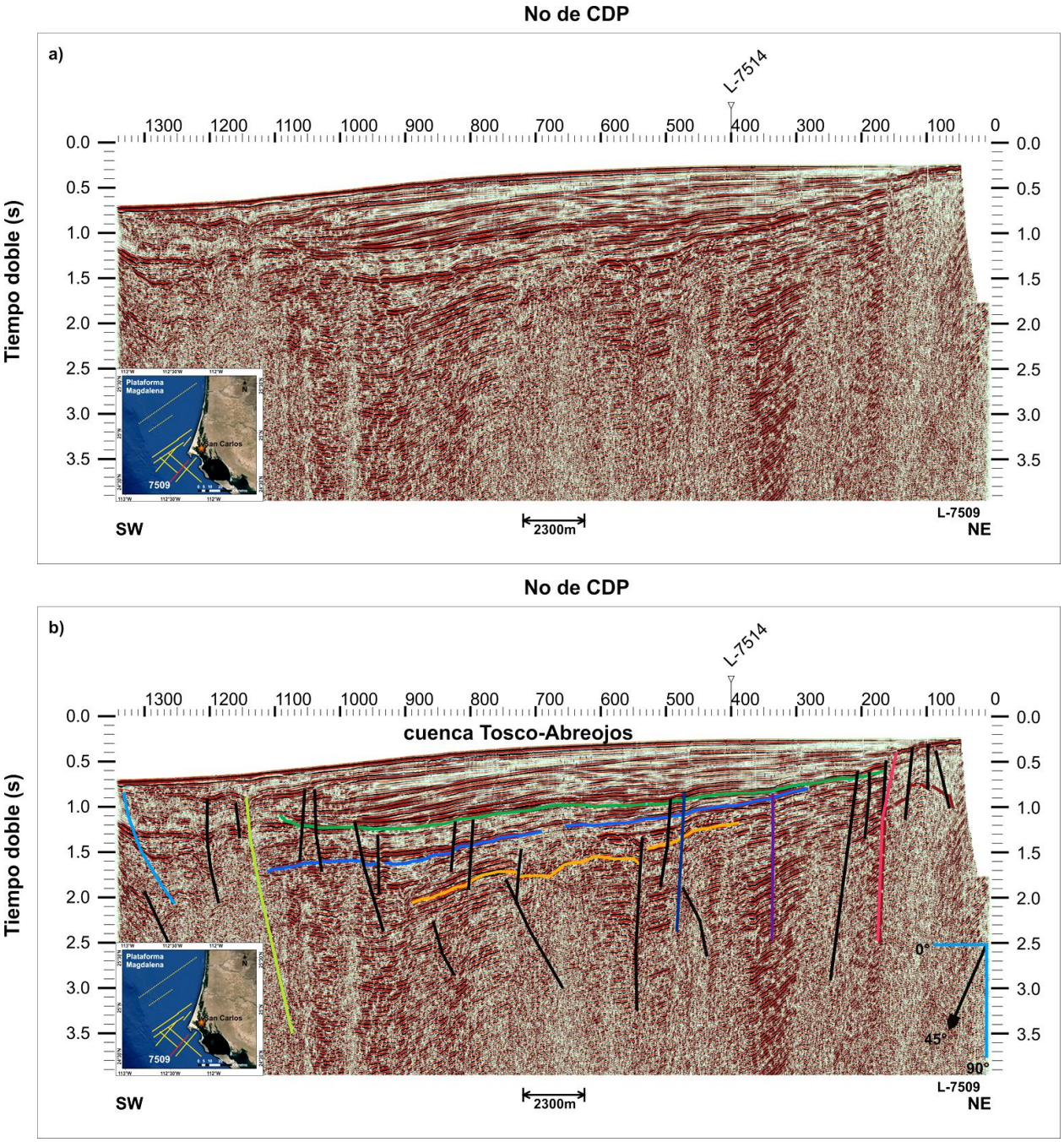


Figura 18. Línea 7509 NE-SW. a) Línea sin interpretar, b) Línea interpretada. La cuenca al oeste de isla Magdalena está cortada por fallas en los dos extremos del perfil. Están presentes zonas difusas por debajo de un sismorflector (naranja) que aparece en varios perfiles. La superficie del fondo marino es profundiza ligeramente al oeste y no presenta relieve.

3.1.3 Perfiles 7501 y 7503.

Esta sección consta de dos segmentos de perfil con una longitud total de 51 km. A partir de la información disponible, consideramos que parte de la información del perfil 7503 se perdió, ya que todo indica que debería tener más información (Figura 19). El perfil 7503 muestra el semigraben limitado por la falla Santa Margarita (línea roja) aunque esta falla no es muy clara, consideramos que se ubica en el sector con reflectores difusos de la zona entre los CDP 0-100. Es posible que esta zona difusa se deba a la zona de deformación de la falla, donde la señal se pierde por la dispersión de la energía en las fracturas de la roca. El perfil sísmico presenta un promedio de 2 fallas por km y, en su mayoría presentan una inclinación casi vertical. Las fallas en el sector oeste del perfil cortan hasta superficie y más al suroeste se localiza la falla Tosco-Abreojos interpretada por Spencer y Normark (1989), que solo el perfil 7501 logró cortar, y todo indica que dicha falla controla el sector oeste del semigraben del perfil 7501 (CDP 500-1350).

Los reflectores sísmicos con amplitudes altas (contrastes de impedancia) representarían límites de secuencia de orden menor (líneas horizontales en color). Entre los CDP 500-1250 del perfil 7501, los reflectores forman un sinclinal, con divergencia hacia el oeste, en donde se pueden observar al menos cinco secuencias limitadas por los reflectores de alta impedancia. Podemos observar que las secuencias sedimentarias se adelgazan y son menos profundas a ambos lados del perfil.

Los reflectores sísmicos más superficiales son continuos a lo largo de casi todo el perfil. Los reflectores del perfil 7501 entre los CDP 300-200 se encuentran plegados en el alto de basamento somero al oeste de la falla Santa Margarita (Figura 19).

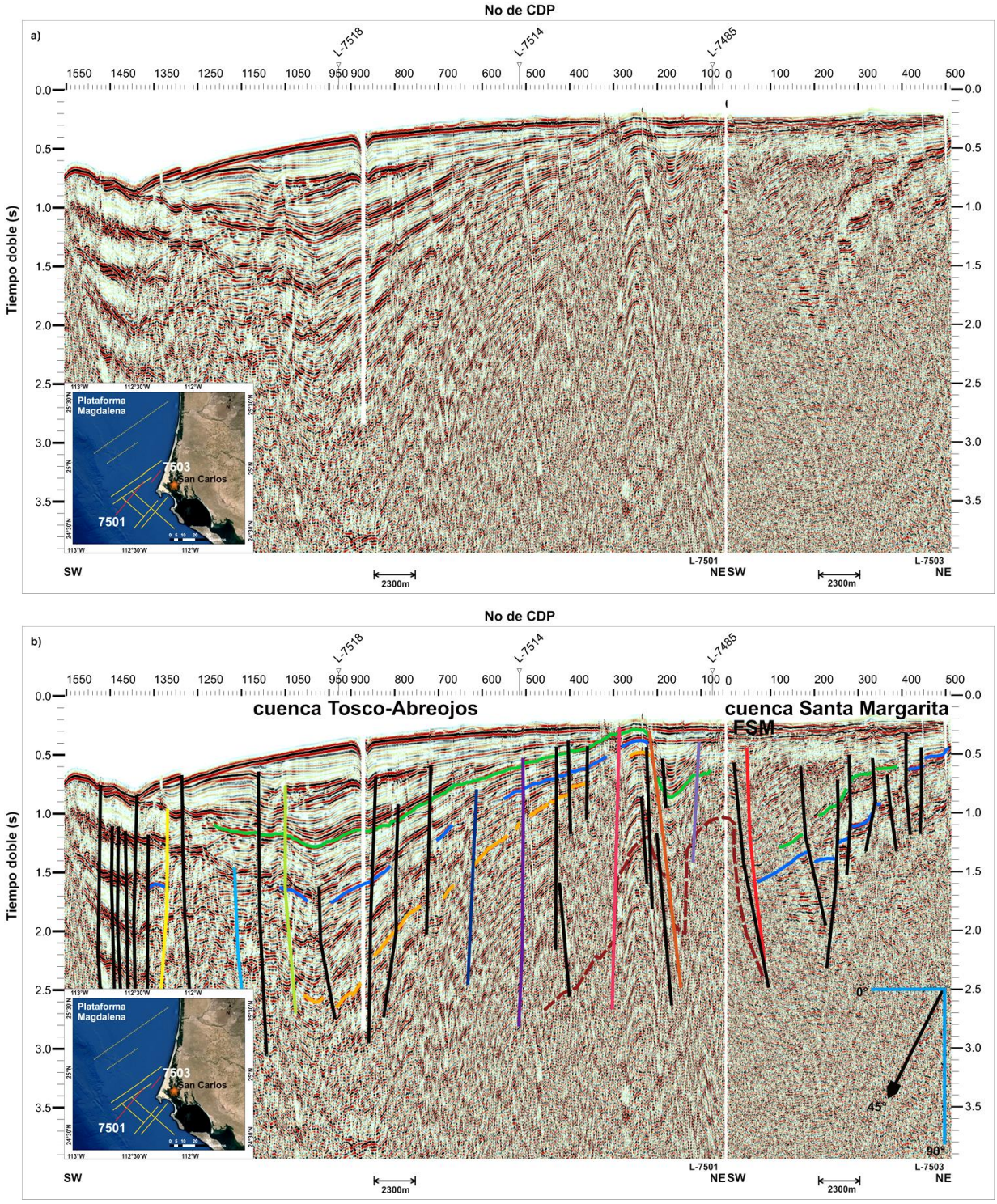


Figura 19. Línea 7501-7503 NE-SW. a) Línea sin interpretar, b) Línea interpretada. Se observan dos cuencas principales en forma de semigraben (cuenca Tosco-Abreojos y cuenca Santa Margarita). Los depocentros están cortados por una serie de fallas secundarias y alcanzan espesores sedimentarios de hasta ~ 4 km en la cuenca TA (CDP 700-1350). En la parte superior se observan relaciones de tipo onlap y downlap de los reflectores sísmicos posiblemente debido a transgresiones y regresiones del nivel del mar. El reflector del basamento acústico es más difuso. El horizonte de referencia (color naranja) profundiza más de 2 segundos (tiempo doble) en la cuenca TA. La superficie del fondo marino presenta relieve.

3.1.4 Perfil 7485.

Este perfil tiene 41 km de longitud en dirección noreste a suroeste, con azimut de 56° y cruza al perfil 7501 (con azimut de ~40°) en su extremo noreste. Se interpretó ~1 falla por km, en su mayoría concentradas en el sector noreste, aunque todo parece indicar que la mayoría de ellas no cortan la superficie (fondo marino). Este es el primer perfil en que se muestran simultáneamente las fallas Santa Margarita y San Lázaro, que posiblemente constituyen una estructura de relevo.

En este perfil se observa claramente un reflector sísmico de alta amplitud (CDP 400-1100) dominante en todo el sector y presenta buena correlación lateral, por lo que no hay evidencia de una zona de falla importante. Este reflector tiene una profundidad mínima de 0.25 s (~250 m) y una profundidad máxima de 1.3 s (~1.3 km). Hacia el oeste, éste se profundiza para posteriormente levantarse (cuenca TA en los CDP 250-1100).Se observan dos sectores de baja amplitud con una frontera de reflectores de alta amplitud.

En el sector noreste se presentan dos pequeñas cuencas flanqueadas por dos altos estructurales y sepultados por sedimentos. Continúan apareciendo zonas difusas en la parte profunda y a lo largo del perfil

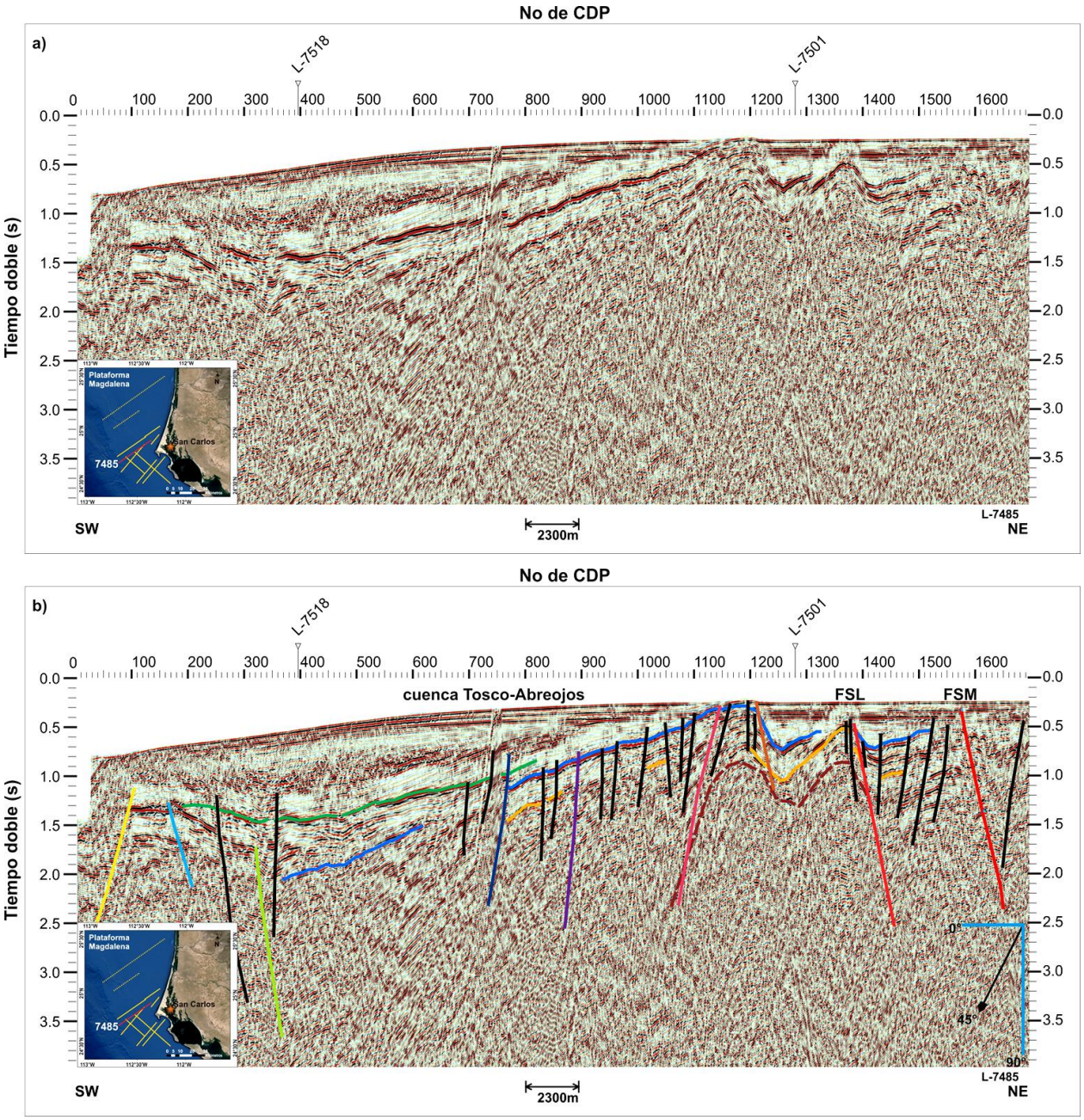


Figura 20. Línea 7485 NE-SW. a) Línea sin interpretar, b) Línea interpretada. Se observa la falla Santa Margarita en el lado derecho y parte del semigraben controlado por ésta. Un alto estructural con dos cimas está controlado por fallas normales (FSL) que forman un pequeño depocentro sobre el alto estructural. Al oeste la cuenca TA no aparece cortada por las fallas y la superficie del fondo marino profundiza ligeramente en esa dirección.

3.1.5 Perfiles 7483-7596.

Esta sección está constituida por dos perfiles que combinados tienen una longitud de 55 km. en este perfil se muestra la falla San Lázaro que está presente al este del perfil y en los perfiles situados al norte, el semigraben situado a la derecha es la cuenca San Lázaro y está controlado por la falla San Lázaro que en esta sección no presenta expresión batimétrica (CDP 0-740 y 0-300). En este perfil las fallas se concentran en el sector noreste dentro de la cuenca San Lázaro (perfil 7596).

Podemos observar los dos semigraben que se han venido observando en las figuras anteriores. Para este caso el depocentro de la cuenca Tosco-Abreojos (CDP 800-1300), tiene menor espesor acumulado en comparación con el relleno sedimentario de la cuenca San Lázaro (SL), siendo el de la cuenca SL de ~4 km. Entre estas dos cuencas se ubica un alto de basamento.

El límite oeste de la cuenca Tosco-Abreojos (TA), está limitado por una serie de fallas que al parecer no cortan hasta superficie. En la parte central se observa una serie de fallas que flanquean algunos depocentros (Figura 21). Se observa claramente un reflector atribuido a un múltiple y que no pudimos atenuar en el procesamiento de los datos.

Se continúa teniendo la presencia de zonas difusas en donde como en todos los perfiles descritos anteriormente no se observa ningún reflector claro que nos indique un basamento acústico.

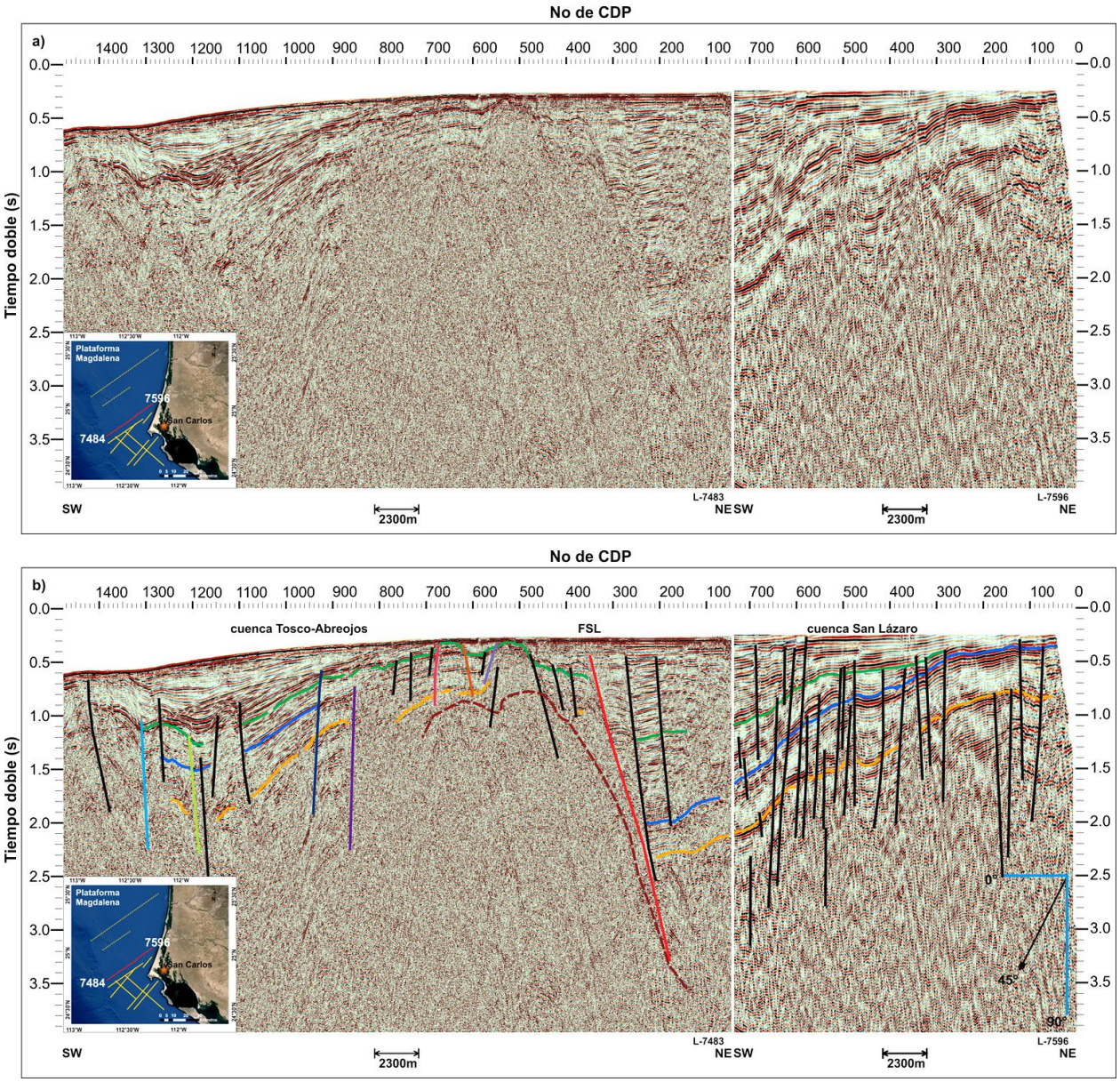


Figura 21. Línea 7483-7596 NE-SW. a) Línea sin interpretar, b) Línea interpretada. La falla San Lázaro controla el flanco este del alto de basamento que separa a las cuencas San Lázaro y Tosco Abreojos (TA). Los reflectores en ambas cuencas se acuñan hacia el este. La cuenca San Lázaro tiene un relleno sedimentario más profundo que la cuenca TA (CDP 800-1300). El alto de basamento se acerca a la superficie y está cubierto por un delgado paquete de sedimentos que engruesa hacia la cuenca TA.

3.1.6 Perfil 7550.

Perfil escaneado por PEMEX con una longitud de 33 km, este perfil es paralelo a los perfiles 7485 y 7483, se encuentra a unos 27 km al norte del perfil 7483. Se observan pocas fallas, estimándose ~1 falla por km. En el sector oeste algunas de ellas cortan hasta superficie, mientras que en el sector este, las fallas logran cortar sedimentos recientes sin llegar a superficie.

La falla San Lázaro se presenta con geometría lístrica buzando al interior de la depresión San Lázaro (Figura 22). La falla corta hasta superficie y a los sedimentos más recientes formando un depocentro0 activo con expresión batimétrica, lo que nos indica que esta falla es activa. Entre los CDP 2250-2550 se tiene la zona de falla, donde los reflectores tienden a ser más difusos. En este perfil el alto estructural presenta relieve en el fondo marino.

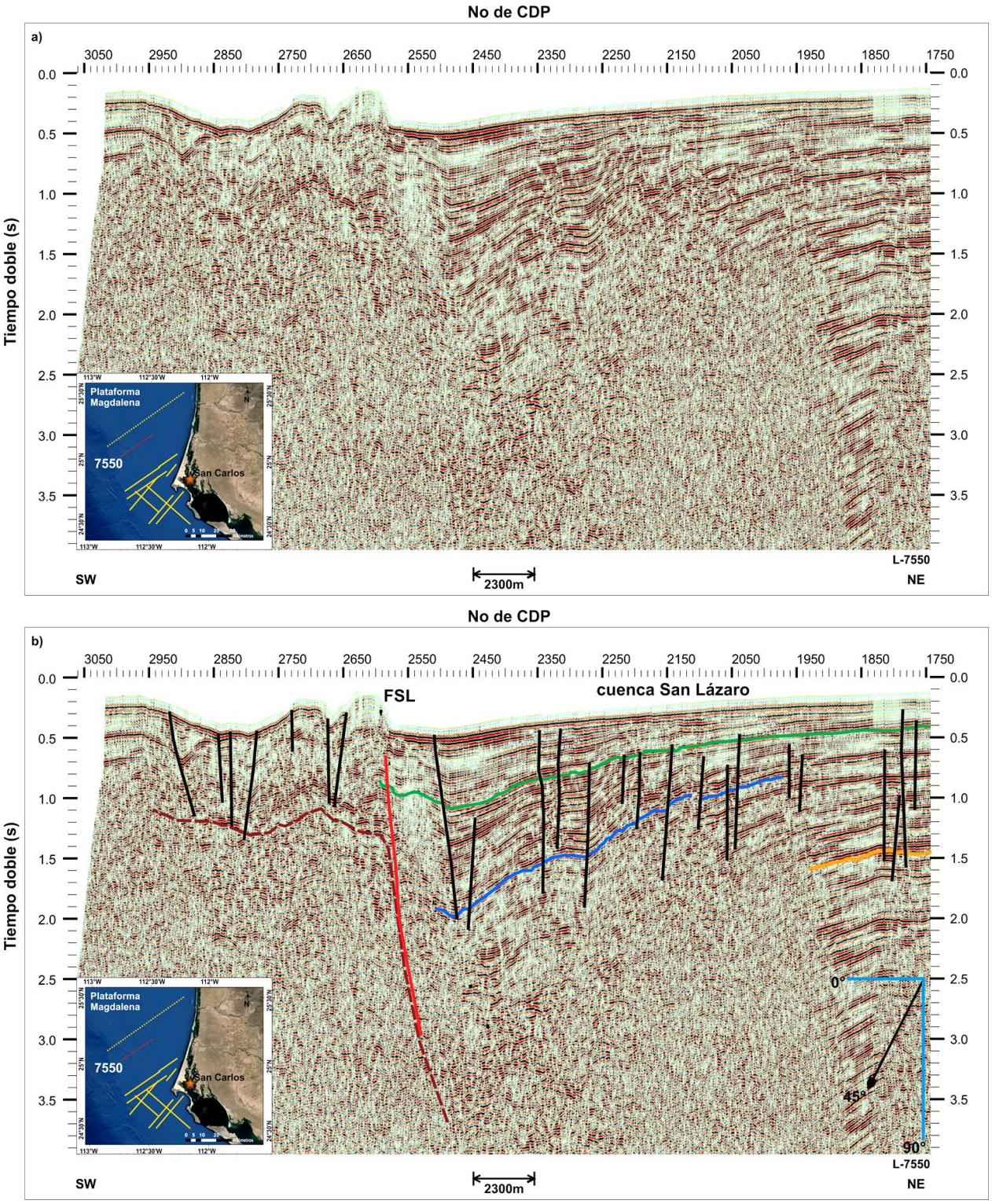


Figura 22. Línea 7550 NE-SW. a) Línea sin interpretar, b) Línea interpretada. En este perfil la cuenca San Lázaro forma un depocentro sobre la plataforma continental y está delimitada por un alto de basamento que presenta relieve del fondo marino. Se observa que la FSL corta la superficie y a los sedimentos más jóvenes, lo que nos indica actividad reciente. Al oeste, la falla Tosco-Abreojos corta el talud continental según la batimetría.

3.1.7 Perfil 7554.

Es un perfil procesado por PEMEX y fue escaneado y vectorizado en CICESE (González- Escobar, 2011). Tiene una longitud de 79 km y está localizado a 15 km al norte del perfil 7550. En este perfil se interpretó el mayor número de fallas de ~ 3 fallas por km, estando concentradas entre los CDP 1800-300, en la zona que corresponde a la cuenca San Lázaro (FSL). La FSL tiene expresión hasta superficie y se vuelve a presentar en estructura lístrica.

En el sector este del perfil se observa una discordancia (línea blanca) que separa las secuencias neogénicas de las secuencias de edad Cretácico-Paleógeno. En este perfil los reflectores tienen la mayor divergencia y por lo tanto el mayor depocentro de la cuenca de antearco, teniendo en este perfil un espesor sedimentario de ~4 km.

Hacia el oeste se puede observar al igual que en el perfil anterior, la cuenca San Lázaro. Siguen presentes zonas difusas y el alto de basamento en el lado oeste del perfil es más pronunciado en superficie del fondo marino (Figura 23).

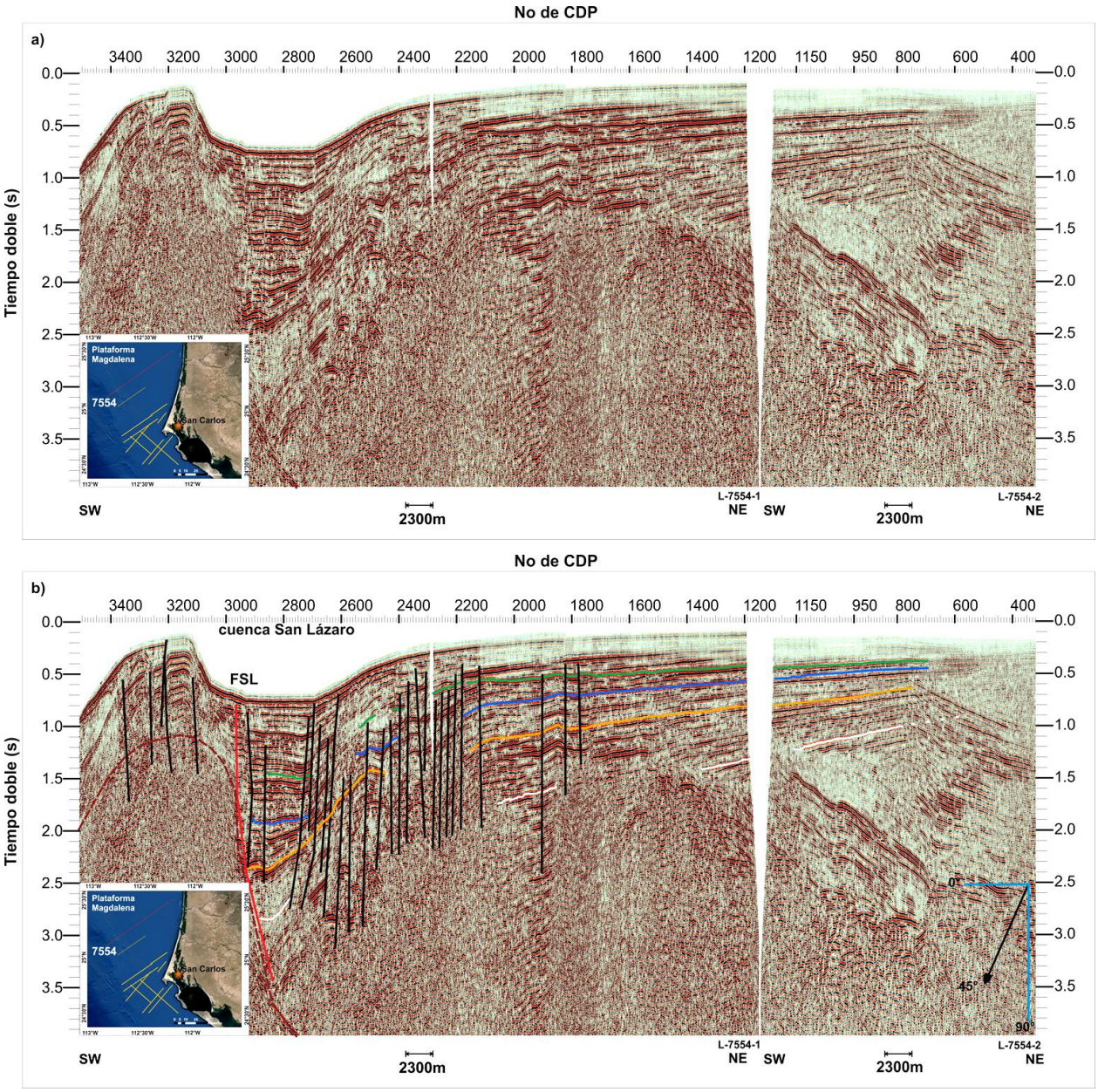


Figura 23. Línea 7554 NE-SW. a) Línea sin interpretar, b) Línea interpretada. La cuenca San Lázaro esta bordeada al oeste por la FSL y un alto estructural posiblemente cortado por ramificaciones de la falla Tosco-Abreojos. La secuencia neogénica diverge hasta la zona de deformación de la FSL y el alto estructural que marca el quiebre del talud continental. Al oriente una discordancia mayor (línea blanca) separa la secuencia neogénica de la secuencia de edad Cretácico-Paleógeno. Esta última es el relleno de la cuenca de antearco. El reflector naranja se considera que marca la discordancia regional interpretada por Brothers et al. (2012).

3.1.8 Perfil 7518.

Este perfil tiene una longitud de 26 km y corre de manera perpendicular a los perfiles anteriores, con una orientación de S40°E. Se presentan “pocas fallas” que nacen y mueren dentro del cuerpo sedimentario (~2 fallas por km) y llegan a cortar los sedimentos por debajo de 1 s, todas del tipo normal. Se observan terminaciones del tipo onlap y downlap en la parte superior del perfil (Figura 24).

En este perfil los reflectores sísmicos mantienen su espesor a lo largo del perfil y tienden a profundizarse ligeramente al NW. Se pueden observar zonas difusas sin poder determinar el reflector del basamento acústico.

Para identificar los reflectores en esta línea, se utilizaron marcadores que representan la intersección de los horizontes interpretados previamente a esta línea.

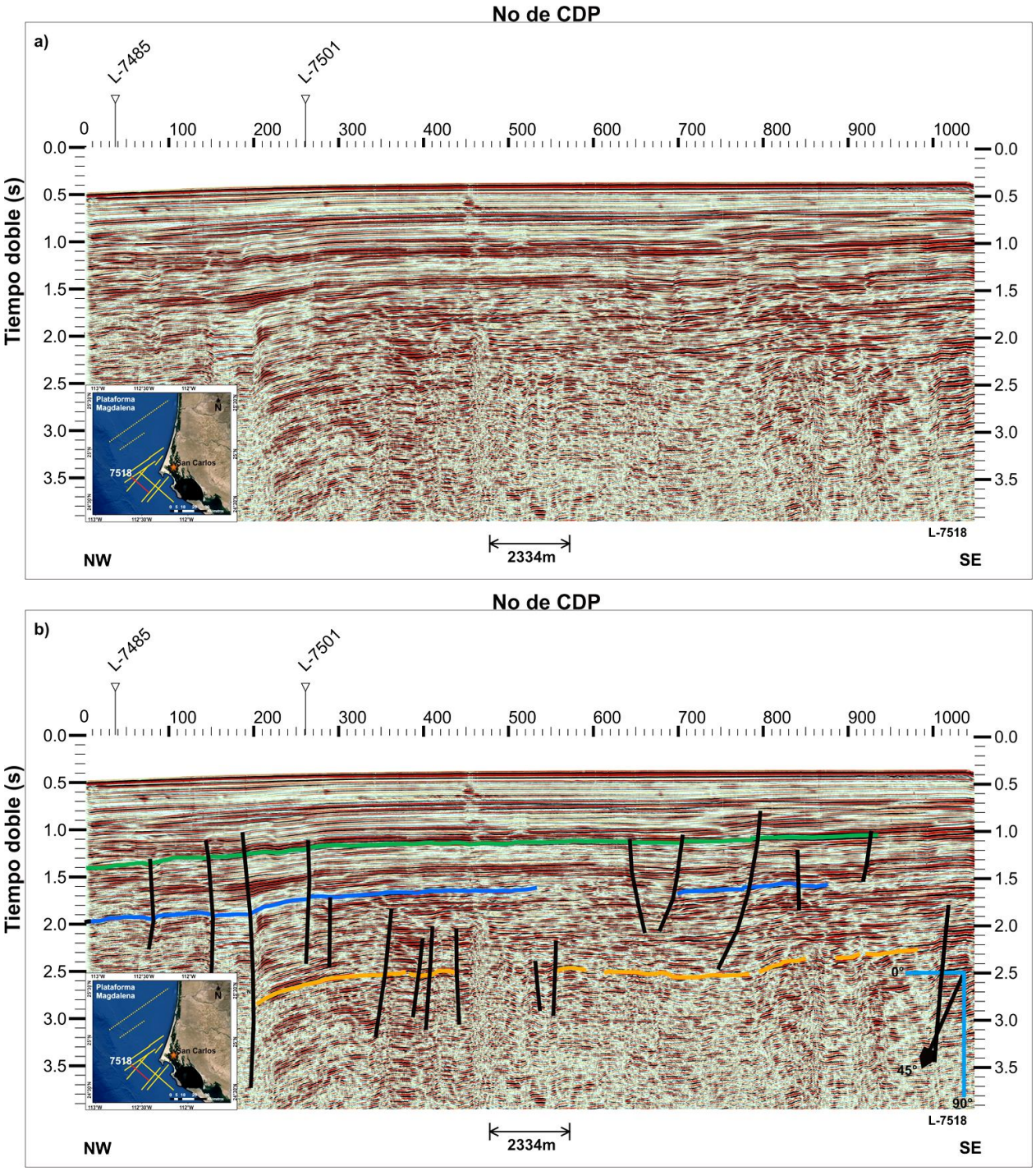


Figura 24. Línea 7518 NW-SE. a) Línea sin interpretar, b) Línea interpretada. En este perfil los reflectores tienden a profundizarse ligeramente hacia el NW, donde la depresión Tosco-Abreojos tiene un depocentro mayor. Se observa fallamiento que corta los estratos bajo 1000 ms. Están presentes zonas difusas por debajo de 2 segundos (TD).

3.1.9 Perfil 7514.

Este perfil es paralelo al 7518, tiene una longitud de 42 km y se encuentra al oeste de la falla Santa Margarita-San Lázaro. Se tienen la presencia de pocas fallas a lo largo del perfil con inclinación casi vertical y sin romper hasta superficie.

En este perfil los reflectores conservan su espesor a lo largo del perfil, ya que es subparalelo al patrón de fallas dominante (Figura 25). El reflector naranja profundiza a unos 1.3 s como máximo. Se presentan zonas difusas en todo el perfil.

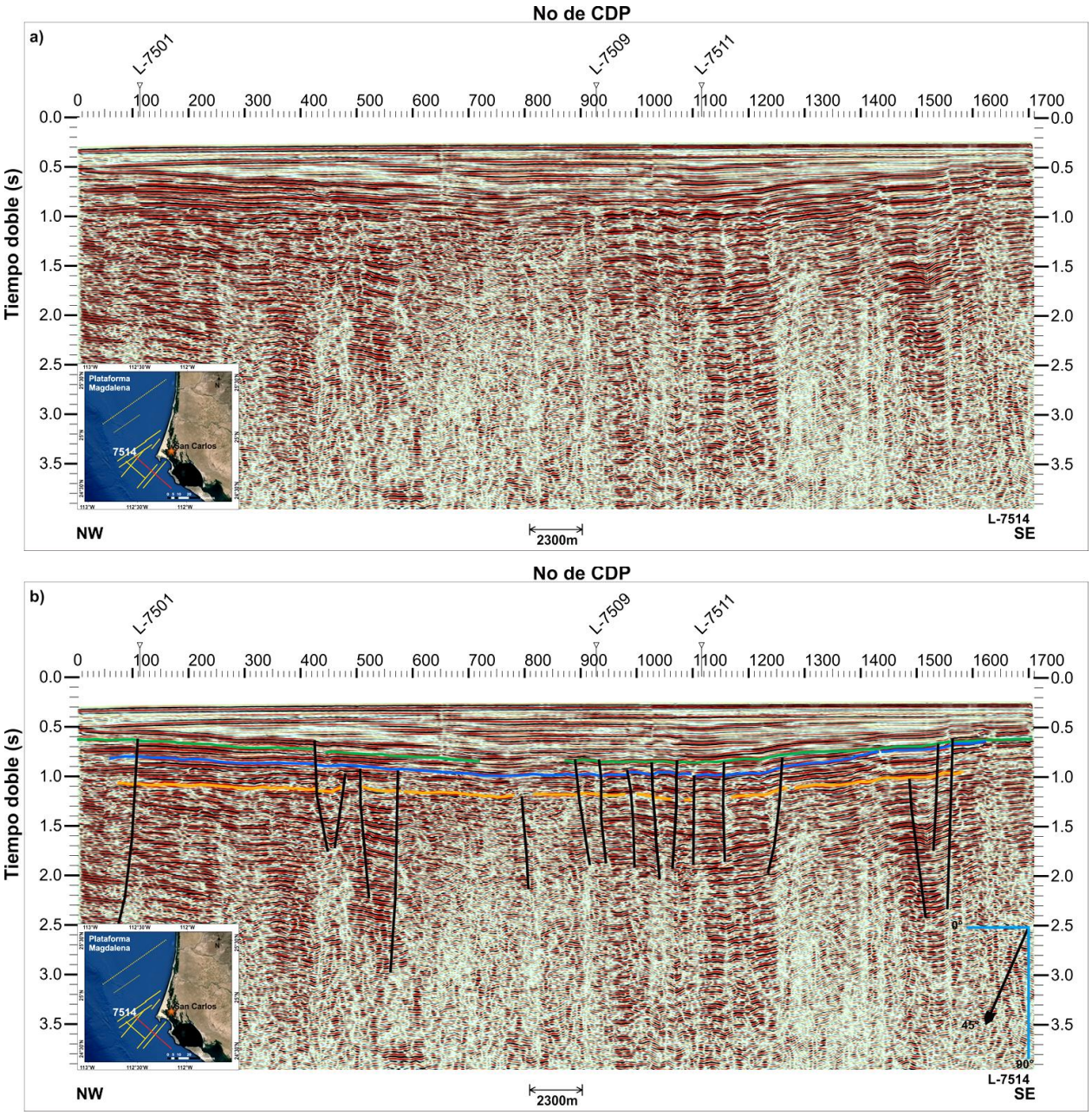


Figura 25. Línea 7514 NW-SE. a) Línea sin interpretar, b) Línea interpretada. Este perfil corta casi perpendicularmente a los perfiles 7511, 7509 y 7501.Este perfil está al oeste de las fallas Santa Margarita y San Lázaro, y los reflectores someros conservan su grosor a lo largo del perfil y se observa poco fallamiento. Esto sugiere que este perfil es subparalelo al patrón de fallas dominante nor-noroeste.

3.2 Interpretación estructural

El sector estudiado de la plataforma Magdalena presenta dos tendencias prominentes que corresponden a dos sistemas de fallas en dirección NW-SE que son los sistemas de fallas de Santa Margarita (FSM)- San Lázaro (FSL) y Tosco-Abreojos (FTA). Estas fallas mayores desplazan los estratos y controlan la morfología de 2 pequeños depocentros en forma de medio graben. Las fallas maestras buzan hacia el este y producen secuencias sedimentarias en forma de cuña (Figuras 19 y 21). La FTA no está presente en los perfiles aquí estudiados debido a que no la cortaron, pero si se observa claramente el depocentro que es controlado por esta falla.

Al este de la FTA, los sedimentos más profundos y al mismo tiempo los más antiguos están muy deformados y existe una superficie discordante mayor que separa a éstos de los sedimentos más jóvenes y menos deformados (Figuras 17-25). La discordancia se extiende de oeste a este y a lo largo de la mayor parte del sector de estudio, la energía acústica por debajo de este reflector prácticamente desaparece, sin embargo, en algunos perfiles (7750-7554) se observa la presencia de reflectores sísmicos, lo cual nos está indicando que se tienen sedimentos por debajo de esta discordancia. El área que produce una imagen confiable por debajo de la discordancia muestra un pronunciado sinclinal, tanto en la región de la falla Tosco- Abreojos como en la zona cortada por las fallas Santa Margarita-San Lázaro (Figuras 17, 19, y 22).

Las zonas de FTA y FSM-FSL se asocian con cuencas asimétricas relativamente profundas, que contienen paquetes estratigráficos divergentes y rotados. Ambas cuencas son más profundas hacia su sector oeste. Podemos decir que las secuencias sedimentarias syn-rift están delimitadas por el engrosamiento y divergencia de unidades sedimentarias hacia las FTA y FSM-FSL, indicando que estas fallas acomodan el alojamiento de la depositación de sedimento. Estas cuencas seguramente contienen el registro del cambio de la sedimentación pre-rift a syn-rift y que marcan el inicio de la formación de la cuenca que acomoda la extensión de la falla Tosco-Abreojos (FTA).

El semigraben Santa Margarita está limitado al oeste por la falla del mismo nombre. Brothers et al. (2012) en su figura 2 reportan un sinclinal que no observamos en las líneas sísmicas estudiadas en esta tesis, sin embargo, pudimos observar un alto estructurales en la parte oeste de las líneas sismicas 7550 y 7554.

En la parte sur de la zona de estudio, el alto estructural no aflora en el fondo marino ya que está sepultado por sedimentos (figuras 17,19 y 20). Los sedimentos albergados en el semigraben controlado por la falla Santa Margarita al este, se hacen más gruesos hacia la falla Santa Margarita y lo mismo ocurre con el relleno sedimentario de la cuenca San Lázaro en donde el máximo espesor se ubica adyacente a la falla San Lázaro. Sobre el alto de basamento se observa relieve estructural que forma dos pequeños depocentro con una separación de ~2 km entre ellos.

Se observa que la expresión de la FSL en superficie en el sector norte (Figuras 22 y 23) controla la batimetría y los trabajos previos infieren su presencia con base en la morfología del fondo marino (Fletcher et al., 2007). La falla Santa Margarita se localiza al sur del área de estudio y se considera que esta falla junto con la FSL, son la misma estructura de relevo (Figura 3).

El semigraben de Tosco-Abreojos tiene características similares a la cuenca Santa Margarita (Figuras19 y 21). Una serie de fallas cortan el depocentro de la cuenca Tosco-Abreojos y se pudieron correlacionar varias de ellas (ver Figura 26), sin embargo consideramos que la principal falla es la FTA y la zona de falla tiene más de siete kilómetros de ancho en la sección sísmica 7501.

3.3 Correlación de Fallas

El resultado de la correlación de fallas se presenta en la Figura 26 y se considera a las FSM y FSL las estructuras más importantes en la zona de estudio. La Falla Santa Margarita se interpretó en cuatro perfiles sísmicos (Figuras 17, 19, 20 y 21) y, su relevo, la falla San Lázaro en tres perfiles al norte (figuras 21, 22 y 23).

3.3.1 Fallas Santa Margarita y San Lázaro

La falla Santa Margarita (FSM) presenta un buzamiento aparente de ~40° al NE hacia el área de bahía Magdalena. Esta falla como la falla San Lázaro que se considera es el relevo al norte de la falla Santa Margarita, controlan una cuenca asimétrica o bien un semi graben, que ha sido reportado por Brothers et al., (2012) en su perfil sísmico que se encuentra a unos 50 km al sur del área de estudio. Como se puede observar, existe una serie de fallas de orden menor dentro del semigraben controlado por la FSM y éstas se ubican al este de dicha falla. Muchas de estas fallas nacen y mueren en la secuencia sedimentaria, la falla San Lázaro tiene expresión hasta superficie del fondo marino (Figuras 22 y 23), lo que implica que corta los sedimentos recientes, por lo que sin duda es una estructura activa.

3.3.2 Falla Tosco-Abreojos

Si bien la falla Tosco-Abreojos no se presenta en los perfiles aquí trabajados, es importante mencionarla ya que, de acuerdo a su posición, esta falla controla la cuenca Tosco- Abreojos reportada en 5 de los perfiles sísmicos. Esta falla del Neógeno se extiende a lo largo de la plataforma Magdalena, en el sector oeste, a una distancia corta de la paleotrinchera y parte del movimiento de la placa Pacífico se acomoda a lo largo de ésta estructura (Dixon *et al.*, 2000; Fletcher y Munguía, 2000). Actualmente es una falla activa a lo largo de la cual ocurre un desplazamiento lateral derecho con una componente transtensional.

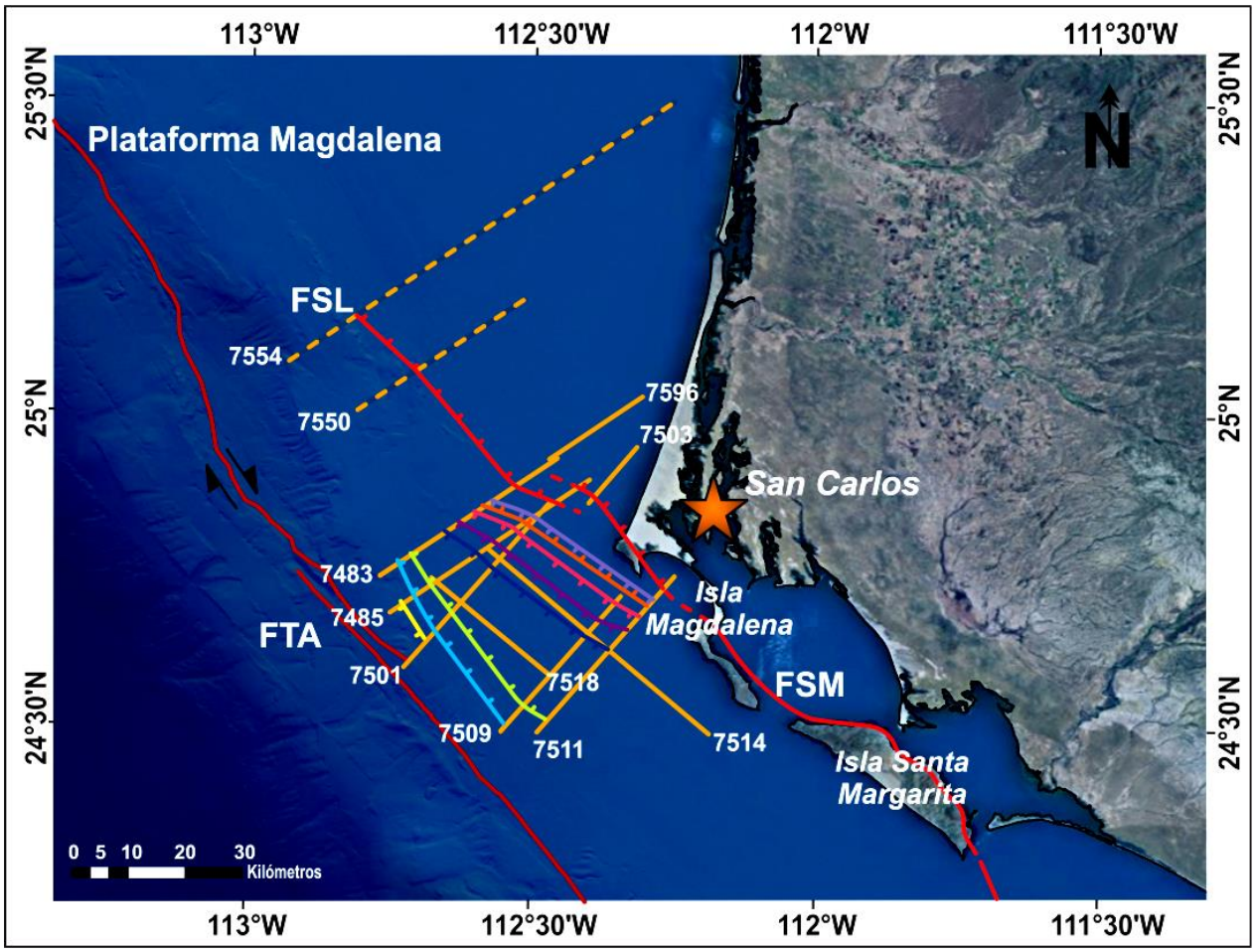


Figura 26. Estructuras correlacionadas con base en las diferentes líneas sísmicas interpretadas en la región de estudio. La falla San Lázaro (FSL) tiene una dirección NW con un buzamiento al NE. Hacia el sur la FSL alterna con la falla Santa Margarita (FSM) que delimita los bloques de basamento de las islas Santa Margarita y Magdalena (Sedlock, 1993; Fletcher et al., 2007). Entre las FSM-FSL y la zona de falla Tosco-Abreojos (FTA) la plataforma continental está cortada por fallas menores que siguen el patrón estructural al noroeste de las fallas mayores.

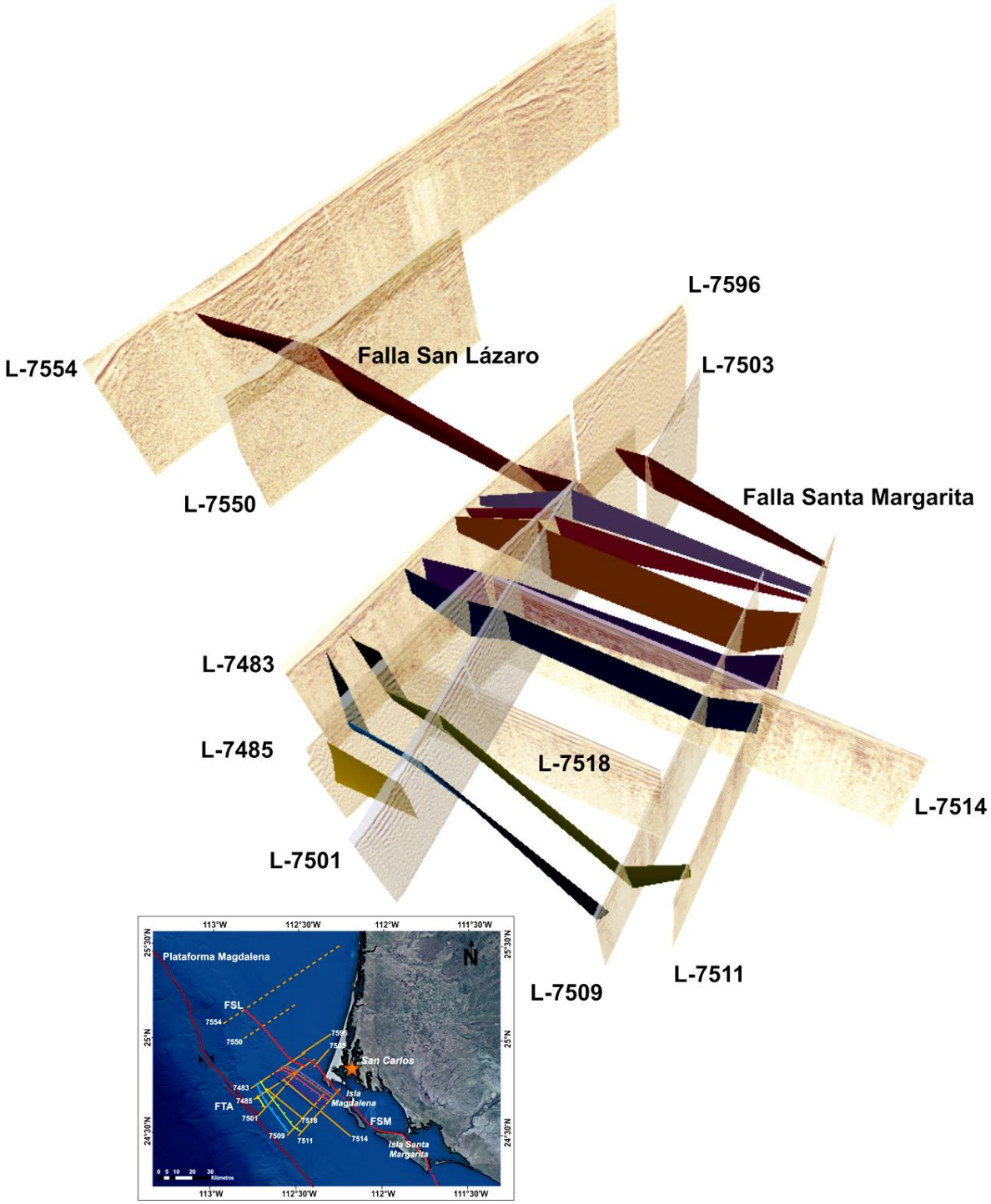


Figura 27. Proyección tridimensional de las estructuras interpretadas. Se observa el buzamiento del plano de falla para cada una de ellas. Las fallas Santa Margarita (FSM) y San Lázaro (FSL) se consideran las estructuras neogénicas principales que cortan la plataforma continental de Magdalena. Estas fallas tienen un buzamiento aparente de ~40° hacia el este y acomodan principalmente extensión. La falla San Lázaro corta la superficie del fondo marino en los perfiles 7550 y 7554.

3.4 Configuración del basamento acústico

Las zonas difusas presentes serán consideradas como basamento acústico, aunque no se observa un horizonte “clásico” de basamento en donde podamos claramente identificar su presencia, salvo que a partir de cierta profundidad la sísmica se presenta difusa, sin ningún carácter de impedancia que nos diga que existe un cambio de sedimento a basamento. Esto podría corresponder a las rocas del complejo de subducción formadas por depósitos pre-miocénicos (Figura 2). Hacia el este del alto estructural se ubica el relleno de la cuenca antearco (Figura 23). El basamento acústico se interpretó sobre los altos estructurales y forman un cuerpo alargado en dirección noroeste, de 8-10 km de ancho (Figura 28).

La configuración del basamento acústico en el sector oeste, cerca de la zona de falla Tosco-Abreojos, se observan las depresiones que marcan el relleno de las cuencas (áreas de color azul), que corresponden a los depocentros de la depresión TA. El tiempo mínimo de registro de este reflector fue de 0.4 s en el perfil 7509 en la región NE. Este reflector es atribuido a la corteza oceánica que aflora en un complejo ofiolitico en las islas Santa Margarita y Magdalena compuesto de esquistos azules y rocas volcánicas basálticas (Sedlock, 1993). Este cuerpo ofiolitico posiblemente está emplazado sobre la corteza continental, y presenta un lineamiento NW-SE respecto a su presencia en las Islas Margarita y Magdalena. Posiblemente la falla Santa Margarita ocasionó la exhumación del complejo ofiolitico en las islas Santa Margarita y Magdalena.

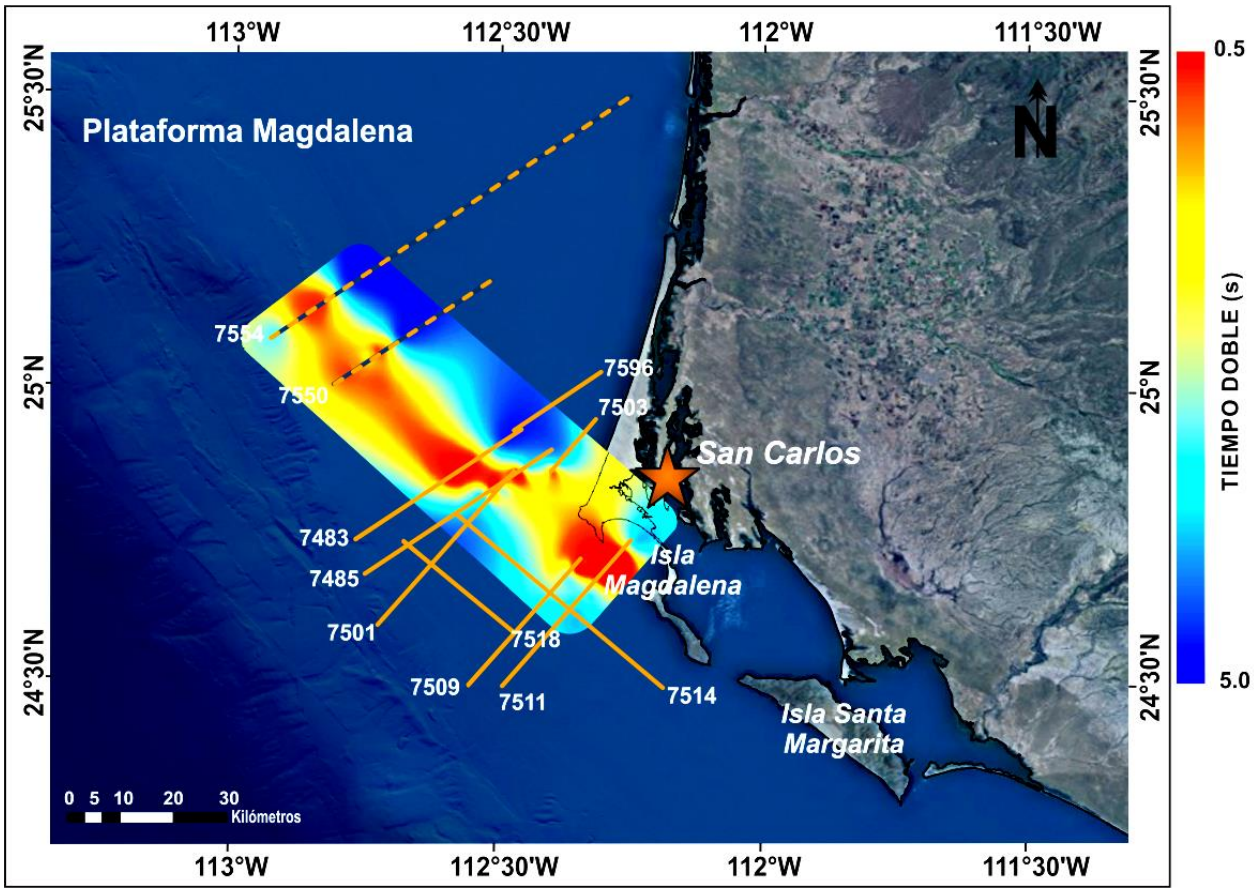


Figura 28. Mapa de configuración del basamento acústico en la zona de estudio. Se considera que la tendencia al noroeste del alto de basamento (en rojo) está controlada por las fallas neogénicas Santa Margarita y San Lázaro que también controlan el afloramiento del basamento en las islas Magdalena y Santa Margarita. La cuenca antearco cretácico-terciaria Purísima profundiza al este (en azul). FTA falla Tosco-Abreojos.

3.5 Correlación de reflectores

Debido a la forma y características de los sedimentos y comparando la imagen sísmica de Brothers et al., (2012), consideramos que podríamos realizar una correlación de sismo reflectores en los dos semigraben (Tosco-Abreojos y San Lázaro). Si bien no tenemos información de pozos en la zona, se utilizó la misma aproximación que realizó Brothers et al., (2012), quien extrapola la estratigrafía en la cuenca oceánica a la plataforma continental. El perfil de Brothers et al., (2012) se localiza 50 Km al sur de las líneas sísmicas de PEMEX. Aun así, decidimos hacer el ensayo, dada la “similitud” de características de los sismo reflectores de los perfiles sísmicos aquí estudiados con el reportado por Brothers et al., (2012).

La interpretación se realiza sobre las imágenes sísmicas y basándonos en firmas de amplitud y geometría sismoestratigráfica, tomando como referencia lo reportado por Brothers et al., (2012). Identificamos tres paquetes estratigráficos A, B y C, que pueden estar correlacionados a través de la FTA y FSM-FSL. Esto se hizo observando los reflectores dominantes de lo más somero a lo más profundo de los perfiles sísmicos. El procedimiento consistió en seleccionar cada reflector por línea y tratar de correlacionarlo con las líneas vecinas. Para garantizar la correcta interpretación de los horizontes, se conectaron secciones que forman zig-zag (Figura 29).

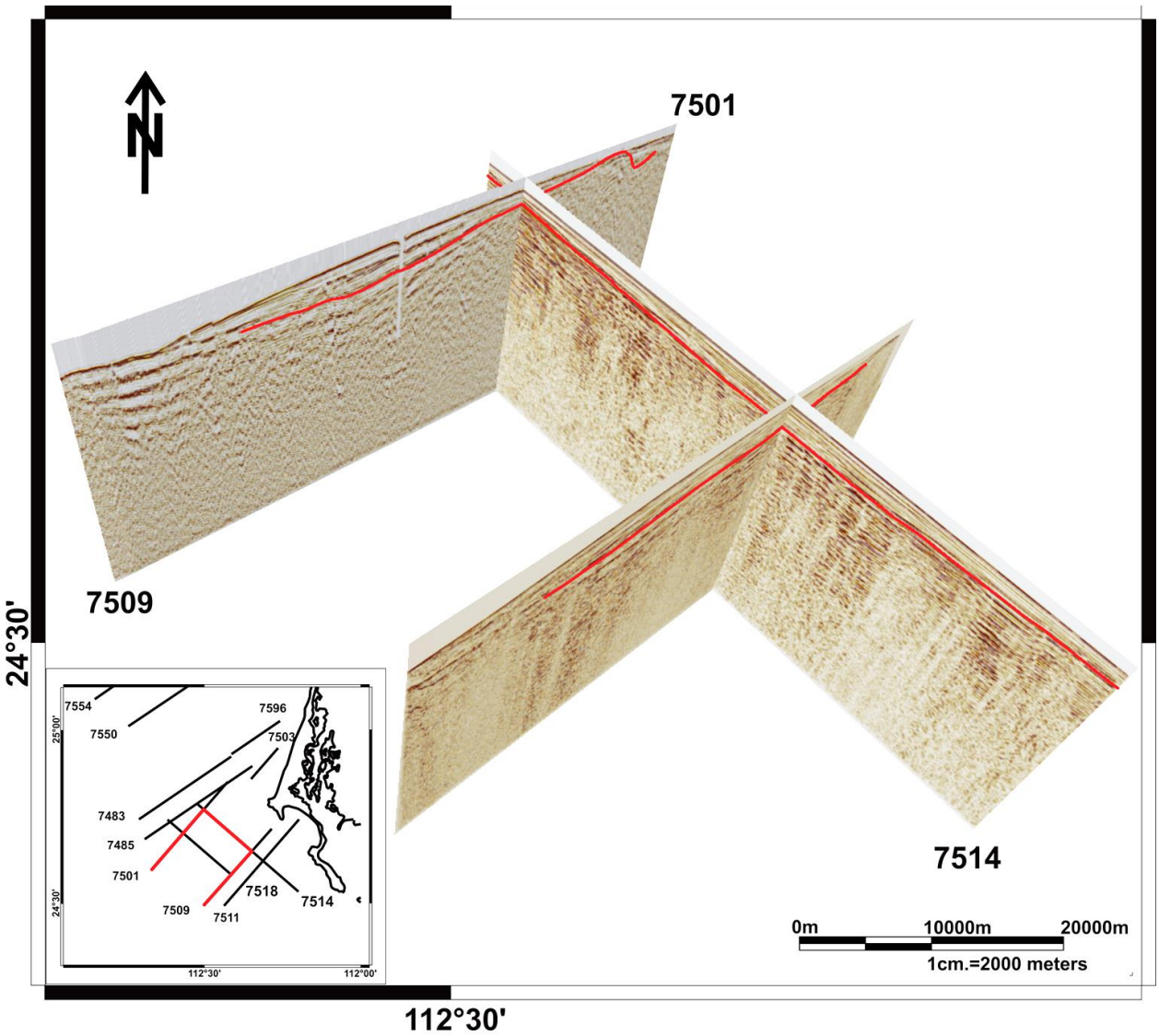


Figura 29. **Marcador en zig-zag que se utilizó para interpretar los horizontes en las líneas paralelas a la costa y posteriormente poder correlacionarlos entre sí.**

Una vez interpretados los horizontes, se construyeron mapas de isócronas para cada uno de ellos, usando un método de interpolación entre los puntos de cada horizonte interpretado. La nomenclatura utilizada para nombrar a los reflectores sísmicos corresponde a los paquetes de acuerdo a su correlación con los resultados de la interpretación por Brothers et al., (2012) (ver figura 4).

La figura 30, muestra la asignación de los paquetes sismosedimentarios A, B y C, los cuales muestran significativo engrosamiento de este a oeste (cuenca TA). Los espesores de los paquetes aumentan hacia el oeste, y mantienen su espesor hasta la zona de falla TA, para después mostrar un sinclinal (CDP800-1050), y revelar acuñamiento a lo largo de su extensión occidental. Las capas individuales dentro de B no presentan divergencias y engrosamiento en el sinclinal. El paquete A (línea verde) se engruesa en la parte central del depocentro. En contraste, todos los sedimentos observados en la cuenca de FSM-FSL engrosan hacia la falla maestra, lo que indica que la sedimentación está controlada por esas fallas.

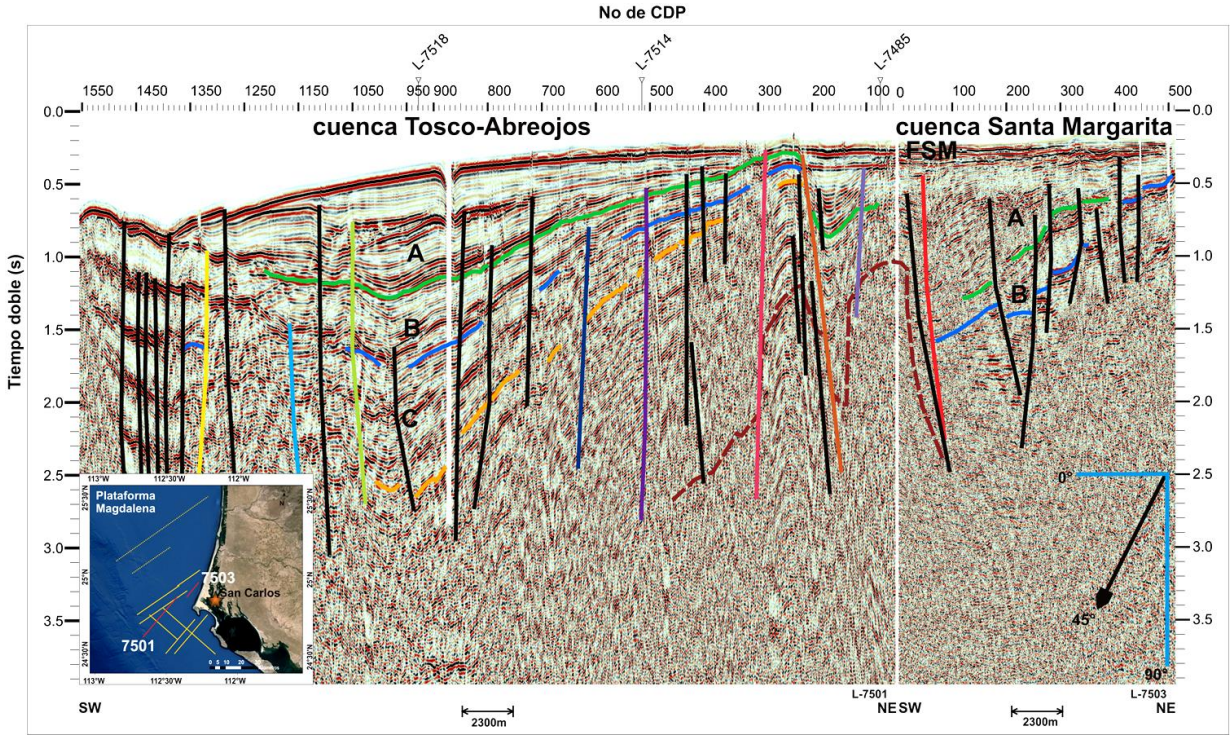


Figura 30. Perfil que muestra los paquetes A, B y C. Semigraben separados por el alto estructural en el sector este del perfil. Se observa la divergencia de los paquetes en el centro de la depresión Tosco-Abreojos (CDP 700-1350), para posteriormente ascender hacia el oeste.

Los sedimentos pre-rift (paquete C, de Brothers et al., 2012) están representados por alta amplitud, progradando en dirección contraria a la línea de costa y las secuencias muestran downlapping. Aunque los paquetes A, B y C se engrosan o divergen hacia el oeste en ambos semigraben, en algunos de los perfiles se observa como dichos paquetes se acuñan hacia el alto estructural que separa las dos cuencas, Santa Margarita y Tosco-Abreojos. Los paquetes B y C no muestran engrosamiento y divergencia dentro de las capas individuales, pero en cambio muestran en general un acuñamiento hacia la costa.

El límite del paquete C es el horizonte L-C (en naranja, Figura 30). El límite del paquete B es el L-B y el del paquete A es el L-A. El reflector C, mostrado en las Figuras 30 y 31, es el que consideramos, de acuerdo a Brothers et al., (2012) como la discordancia angular que separa la secuencia neogénica de la secuencia del Paleoceno-Eoceno que rellena la cuenca de antearco. Mientras que por debajo de este reflector se tiene la presencia de reflectores poco definidos por la presencia de zonas difusas en las imágenes sísmicas. Brothers et al., (2012) reportan sedimentos del Mioceno (?) por debajo de esta discordancia (Figura 4), por lo que nos hace suponer que habrá sedimentos por debajo de esta discordancia mientras más nos recorramos al norte (respecto al perfil de Brothers et al., 2012), y como podemos ver en la Figura 23, por debajo de la discordancia existe un enorme paquete de sedimentos. Esto nos indica la presencia de sedimentos más antiguos que 8 Ma en la región noroeste de la plataforma continental.

Todo parece indicar que la discordancia (reflector L-C) está en buena parte, si no es que en toda la plataforma Magdalena. La región estudiada está en la frontera, en donde para el sur, por debajo de la discordancia se tiene poca o casi nula depositación sedimentaria, mientras que al norte es todo lo contrario, se tienen enormes paquetes de sedimentos que son de la secuencia del Cretácico y Paleógeno (Martin-Barajas y Pacheco 2011).

El reflector L-B diverge del reflector L-A a medida que avanza hacia el SW, es muy similar en sus características, pero está a mayor profundidad. El tiempo máximo de

registro es de 2.3 s en tiempo doble (TD) y el mínimo de 0.4 s de TD. La diferencia en tiempos dobles entre el reflector L-A y el reflector L-B es de 1.3 s de TD máximo y 0.1 s de TD mínimo (Figura 31).

El reflector L-B está presente en todas las líneas sísmicas con una buena correlación lateral y los reflectores contenidos en el paquete limitado por éste (paquete B) tienden a ser casi paralelos entre sí, sin mostrar una mayor divergencia. Se observan terminaciones del tipo downlap.

El reflector L-A tiene un tiempo de registro máximo de 1.4 s que corresponden a ~1.4 km de profundidad. Este reflector tiene una correlación lateral buena. Se presentan terminaciones de capas de tipo onlap y downlap en la parte SW de los perfiles (a excepción de los perfiles 7518 y 7514).

El espesor del paquete A lo hemos obtenido calculando la diferencia de tiempos en la configuración del reflector, el máximo espesor del paquete A es de 1.4 s de TD que corresponderían a ~1.4km en la parte más profunda del depocentro del semigraben y de 0.2 s de TD (~200 m) en los altos estructurales. En el paquete limitado por este reflector (paquete A) se observan terminaciones del tipo onlap y downlap, además de que presenta un mayor espesor que los paquetes infrayacentes (Figuras 30 y 31).

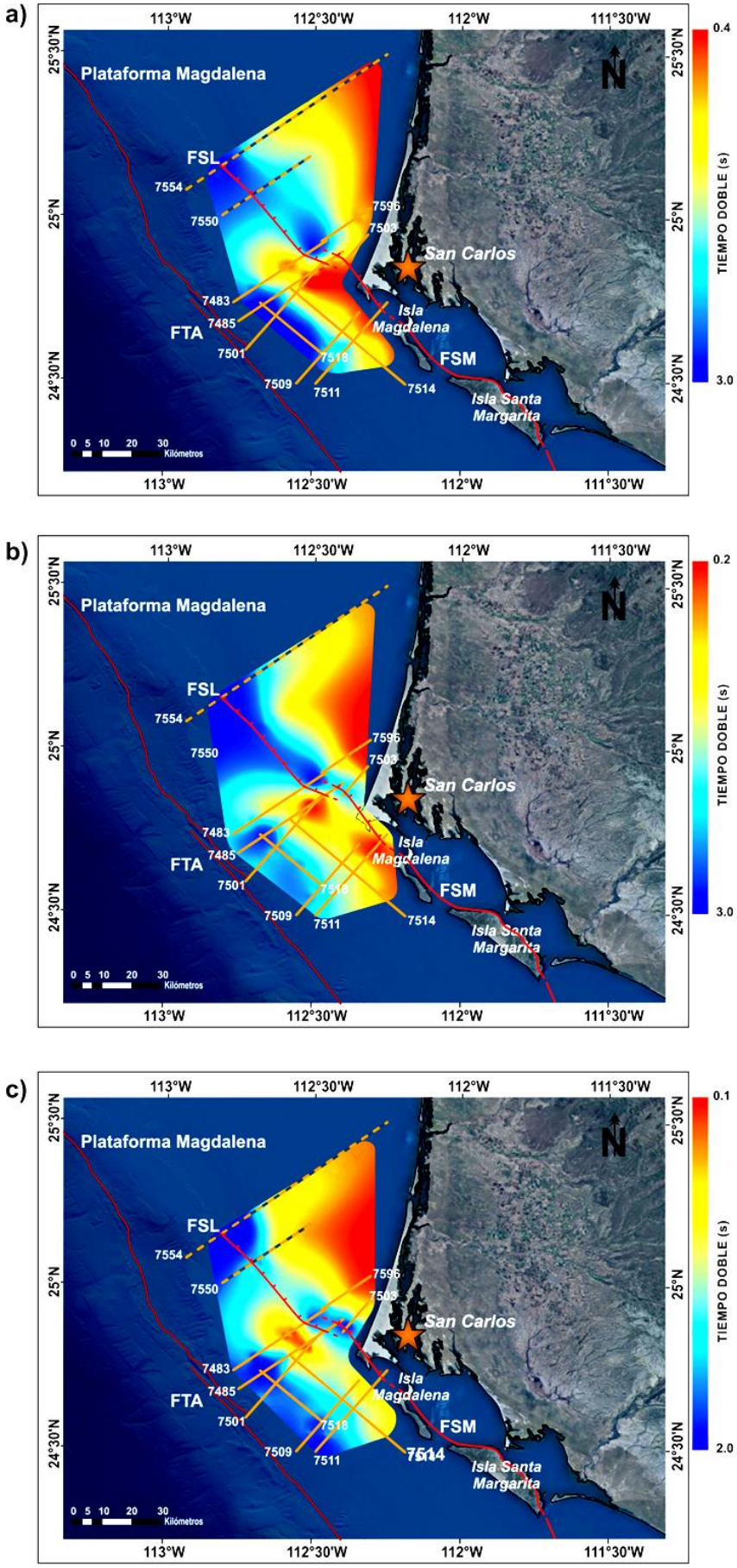


Figura 31. Mapa de configuración de isócronas de los reflectores basales de los paquetes C, B y A. a) El espesor de este paquete define dos depocentros uno al sur controlado por la falla Tosco-Abreojos y otro al norte controlado por la falla San Lázaro en donde se observa la mayor profundidad con un máximo de 3.7 s en el perfil 7554. b) El reflector del paquete B presenta las mismas características pero a una profundidad mínima de 0.4 s en el perfil 7509 y una máxima de 2.3 s en el perfil 7554. c) El reflector del paquete A solo muestra una parte del alto estructural de basamento y se encuentra a profundidades más someras, siendo la mínima de 0.2s en el perfil 7501-7503 y una máxima de 1.4 s en el perfil 7554.

Capítulo 4. Discusión

El objetivo principal de esta investigación es reportar características estructurales y sismoestratigráficas en un sector de la plataforma Magdalena, y como tal, la siguiente discusión se centra al respecto. El sector aquí estudiado, localizado dentro de la plataforma Magdalena, está cortado por dos fallas prominentes con tendencia NW: la falla Santa Margarita-San Lázaro y la falla Tosco-Abreojos. Estas estructuras cortan toda la secuencia y controlan la morfología de dos pequeños depocentros. La FTA no está presente en los perfiles estudiados y debe ubicarse al oeste, pero tomando en cuenta su posición geográfica reportada en la literatura (Spencer y Normark, 1979), interpretamos que el semigraben en el sector oeste es controlado por esta falla. Los volúmenes y características de las secuencias sedimentarias nos indica que estamos sobre el complejo de subducción y que los depósitos de la cuenca de antearco se localizan más al este de la falla Santa Margarita en la zona terrestre de Constitución, B.C.S. (González-Escobar et al., 2011).

Las mayores amplitudes acústicas, reflectores en forma lenticular y en ocasiones caóticos al oeste, tanto de la FTA como de la FSM-FSL, sugieren que el transporte de sedimentos fluyó de este a oeste. Estas estructuras lenticulares indican progradación de clinoformas hacia el depocentro de la cuenca en condiciones de bajo nivel del mar, posiblemente producidos por movimientos eustáticos durante el Neógeno.

Los principales reflectores sísmicos interpretados son similares a los reflectores sísmicos reportados por Brothers et al., (2012), y aunque estamos muy lejos de su región de estudio, consideramos de utilidad intentar correlacionarlos porque representan los principales eventos de deformación y sedimentación en la plataforma continental de esta región. Brothers et al., (2012) utilizan información del pozo DSDP 471 situado sobre el piso oceánico al oeste de la fosa de la trinchera. Ese estudio reporta edades de Mioceno al reciente (~14 Ma) e incluye tres principales secuencias sedimentarias separadas por tres horizontes. Estas secuencias son utilizadas por Brothers et al., (2012) para interpretar dos cuencas neogénicas controladas por las fallas Tosco-Abreojos y Santa Margarita en la plataforma de Magdalena.

La cuenca Santa Margarita aquí reportada es parte de la cuenca Purísima, que se extiende al noroeste y representa el relleno de la cuenca antearco de edad Cretácico Superior al Paleoceno (Martin-Barajas y Pacheco-Romero, 2011). Es posible que los paquetes sedimentarios que presentan reflexiones difusas en la líneas sísmicas aquí procesadas correspondan a la secuencia cretácica y paleógena cortada en los pozos de PEMEX en la planicie costera de Ciudad Constitución.

La diferencia en edad entre la secuencia reportada por Brothers et al., (2012) y la secuencia de la cuenca antearco, está marcada por una discordancia que al parecer está presente en toda la región. Brothers et al., (2012), no muestran depósitos sedimentarios por debajo de esta discordancia en la región de la plataforma, mientras que los perfiles de PEMEX (Perfiles 7550 y 7554) aquí estudiados si muestran sedimentación por debajo de una discordancia mayor. Al norte los perfiles 7754 y 7550 de PEMEX (Figura 22 y 23), muestran la discordancia angular entre una secuencia en forma de cuña al este, que cubre a un grueso paquete sedimentario de edad Eoceno Tardío en el sector sur de la cuenca Purísima (Martín-Barajas y Pacheco-Romero, 2011), localizada al noreste del área de estudio (Figura 23). En el talud y pie de talud, la unidad pre-rift en el perfil sísmico de Brothers et al. (2012) se correlaciona con un paquete de turbiditas de 14.5 Ma reportadas en el pozo DSDP 471 (Yeats y Hap, 1981) y por arriba de un sismoreflector que es la representación final de la corteza oceánica (Figura 23). En la figura 22 y 23 se observa un gran paquete sedimentario por debajo de la discordancia, lo cual seguramente contiene el registro geológico hasta el Cretácico Superior.

En síntesis, la estratigrafía sísmica de este trabajo incluye dos paquetes principales. El paquete superior posiblemente es de edad Mioceno medio al Reciente y se presenta en dos cuencas con forma de semigraben controladas por fallas neogénicas que cortan la plataforma continental. Esta fallas habrían sido activadas al término de la subducción y forman parte de la zona de deformación transtensiva Tosco-Abreojos, que fue el límite principal de placas, mientras se definía la extensión y posterior ruptura continental en el Golfo de California. Las fallas San Lázaro y Santa Margarita cortan a los sedimentos más recientes y producen depocentros activos, lo

cual sugiere que estas fallas aún acomodan parte de la deformación entre las placas Pacífico y Norteamérica.

4.1 Actividad sísmica en el sistema de falla Santa Margarita- San Lázaro

La falla Santa Margarita y la falla San Lázaro son fallas tipo normal y tienen un echado aparente de N40°E, lo que causa la depresión de los dos semigraben. Estas fallas acomodan extensión y formarían parte del sistema de esfuerzos transtensionales que afectan el margen Pacífico de la plataforma peninsular. Evidencia de su desplazamiento es la baja correlación que hay en los reflectores. Se presentan en una banda difusa de reflexiones (zonas de trituración de las rocas). De acuerdo con los datos del National Earthquake Information Center (NEIC), se tiene la presencia de actividad sísmica en sus catálogos (1960-al presente). Además, Munguía y otros (2014) reportan actividad sísmica en la región de San Carlos, B.C. entre el 2000-2001, registrada por una red sísmica local con sismos de magnitudes entre 1.2-2.2, lo que sugiere que la falla Santa Margarita esta activa (Figura 34).

La presencia de la FSM se puede observar tanto en la Isla Margarita como en la Isla Magdalena y consideramos que parte de la actividad sísmica es debido a esta falla, por lo que debe de ser considerada en estudios de riesgo incluyendo la FTA, ya que como se ha observado en el pasado, eventos sísmicos de magnitud pequeña (<4) generó gran alarma en San Carlos y poblados vecinos (Meyer et al., 2005; González-Escobar, et al., 2002).

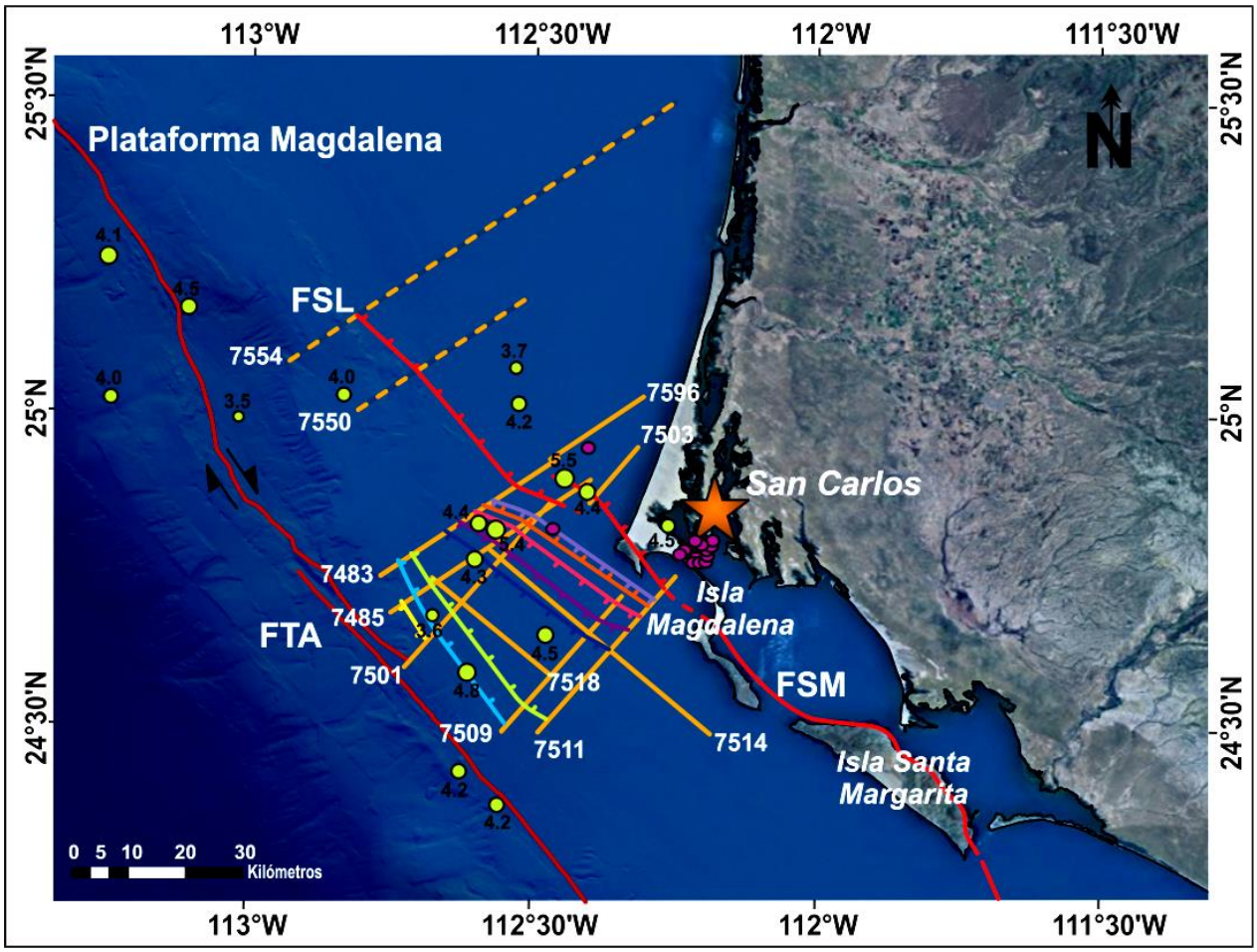


Figura 32. Fallas interpretadas, actividad sísmica y magnitud de sismos reportados por Munguía y otros (comunicación escrita, 2014) y NEIC (earthquake.usgs.gov/regional/neic). En círculos verdes se marcan los sismos reportados por NEIC y sus magnitudes (1960-2004) y en círculos purpura los sismos reportados por Munguía y otros (2014). FT falla Tosco, FA falla Abreojos, FSL falla San Lázaro, FSM falla Santa Margarita.

Spencer y Normak, (1979) y Normak et al., (1987), reportaron las fallas Santa Margarita y San Lázaro como una falla contínua. Posteriormente Fletcher et al., (2007) la bautizan en dos sectores; falla Santa Margarita y falla San Lázaro, al sur y norte de la isla Margarita respectivamente (Figuras 3 y 34). En esta tesis se propone que la falla Santa Margarita termina al norte de la isla porque las líneas sísmicas que cortan su proyección en esa dirección no la muestran. Es posible que la falla San Lázaro sea un relevo de la falla Santa Margarita y acomoda la extensión hacia el norte, en donde forma la cuenca de San Lázaro que observamos al norte en los perfiles 7550 y 7554.

Estudios geofísicos y geodésicos, indican que el sistema de falla San Benito - Tosco-Abreojos aún acomoda deformación entre la península de Baja California y la placa Pacífico (Michaud et al., 2006; Dixon et al., 2000) y que parte de la deformación en el borde continental afectó el registro estratigráfico de la cuenca sobre el prisma de acreción. De acuerdo a lo observado en los perfiles, algunas de las estructuras cortan los sedimentos superficiales (fondo marino), y con la sismicidad que está ocurriendo en la región, podemos confirmar lo reportado por estos autores, que este límite de placas continúa activo.

4.2 Unidades sismoestratigráficas y delimitación de depocentros

Los mapas de configuración de los reflectores muestran un depocentro de ~4 km de profundidad entre las líneas 7550 y 7554 (Figuras 22 y 23), los mayores espesores de las unidades A, B y C están en esta parte. Gracias al perfil de sísmica de reflexión interpretado por Brothers et al. (2009), se puede inferir que el semigraben en el sector NE es controlado por la falla Santa Margarita-San Lázaro. El semigraben del sector SW es controlado por la falla Tosco-Abre ojos y de igual forma se extiende hacia el sur. Se necesitan análisis bioestratigráficos y litoestratigráficos a partir de datos de pozos para determinar la edad de los depósitos de la plataforma Magdalena. La correlación entre los paquetes en los dos semigraben (Figura 19 y 21) se hace con base en el carácter acústico y geometría estratigráfica. Capas divergentes dentro de los paquetes registran la apertura de las cuencas transtensionales en la plataforma. Estos paquetes son separados en la sección NE por bloques de alta velocidad que afloran en el fondo marino.

El basamento acústico (Figura 35) se extiende a lo largo de la plataforma Magdalena. En este proyecto la profundidad mínima fue de ~400 m en la línea 7509. Los máximos del basamento muestran una clara tendencia NW-SE oblicua a las islas.

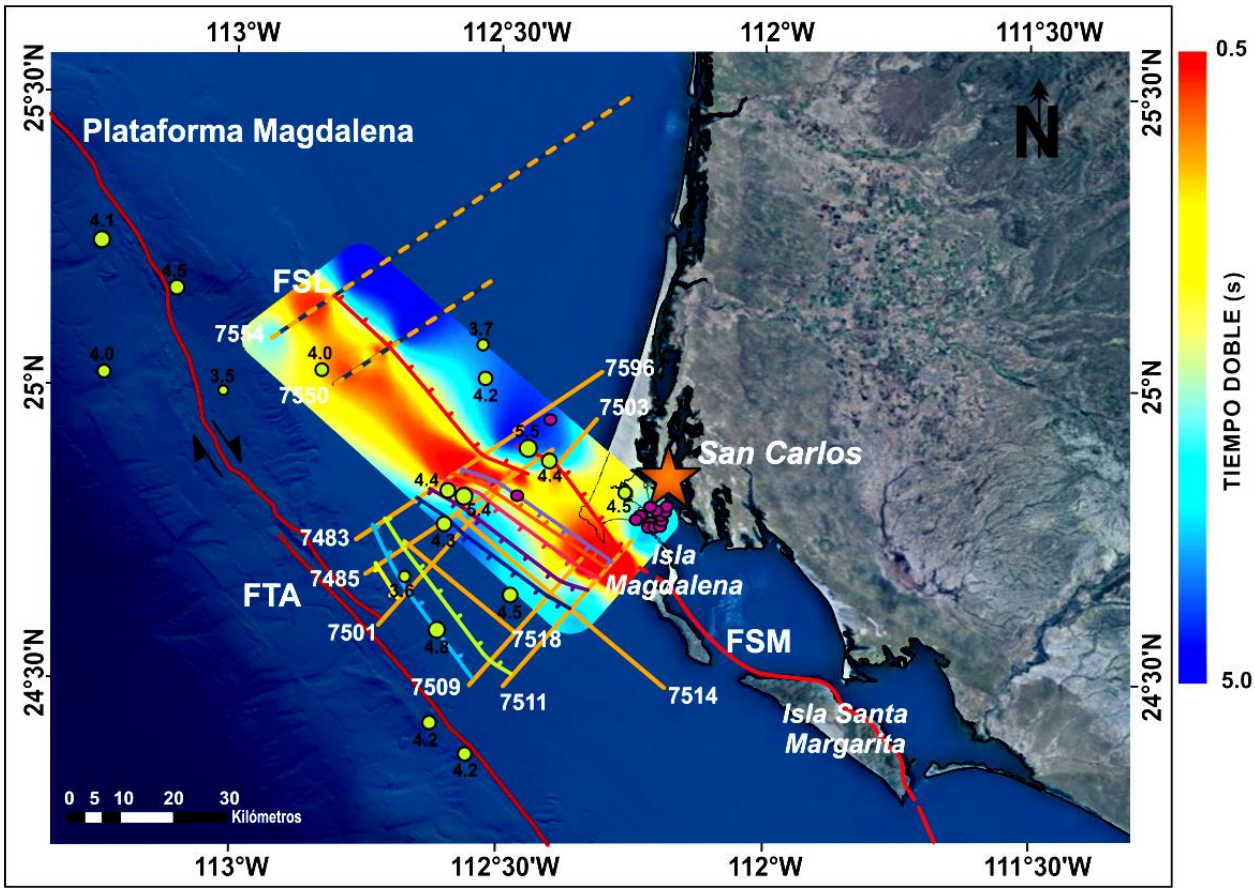


Figura 33. Reflector del basamento acústico obtenido en este trabajo. Se observa el alto estructural (en rojo) y su tendencia hacia el NW, así como la falla San Lázaro (FSL) y los eventos reportados por NEIC y Munguía y otros (2014).

Por encima de la prominente discordancia angular (reflector naranja, Figura 30), las secuencias de progradación observadas en el paquete C muestran subsidencia y gran fallamiento en su límite inferior y la creación del alojamiento de los sedimentos. Respecto al paquete B y de acuerdo con Brothers et al., (2012) estos depósitos pudieran ser contemporáneos con los depósitos superiores, unidad A. En nuestra interpretación, la base del paquete A es de mayor espesor que los paquetes subyacentes y no sabemos si es debido a la combinación de las variaciones espaciales del espesor de sedimentos y/o a los movimiento de deslizamiento a lo largo de las dos semigraben.

Brothers et al., (2012), comenta que a menos que la extensión de la FTA y Falla Santa Margarita comenzara después del movimiento transcurrente dextral, los paquetes A y B fueron depositados antes de la aparición de fallas y pudieran ser posibles puntos

para estimar el deslizamiento dextral acumulativo. Aquí esta situación podría aplicarse a la Falla San Lázaro, ya que todo apunta que es la misma estructura (FSM). Los reflectores de alta amplitud son levantados, rotados y truncados en el bloque adyacente de la FTA y FSM-FSL sugiriendo que son pre rift (Paquete C). Entonces, la separación de las cuencas asimétricas (rifted) ocurrió cuando la subducción disminuyó considerablemente, ya que la deformación a lo largo de la FTA y FSM-FSL comenzó y se formaron las cuencas transtensionales que capturaron más sedimento. La edad de los datos pos rifting de la deposición de la unidad de progradación de alta amplitud reportada por Brothers et al., (2012) es de~ 8 Ma, es una edad que es consistente con otros datos de la región (Michaud et al., 2006).

4.3 Modelo estructural e implicaciones tectónicas

Con la información obtenida del presente estudio, resulta imposible decir que se puede tener un modelo estructural de la región, ya que la región estudiada es muy pequeña en comparación a las dimensiones de la plataforma Magdalena. Sin embargo, de acuerdo al modelo de evolución tectónica en un régimen de subducción, podemos decir que nuestra zona de estudio se encuentra sobre el complejo de subducción debido a los volúmenes de los cuerpos sedimentarios (no mayores a 4Km y zonas difusas por debajo de éstas). En las líneas más al norte (Perfil 7550 y 7554) en el sector este, se muestran enormes paquetes sedimentarios, por lo que se infiere que la cuenca antearco tiene un tendencia oblicua con respecto a nuestra zona de estudio. También podemos decir que, observamos dentro de nuestra área de estudio dos sistemas de fallas importantes como son: Falla Tosco-Abreojos y Falla Santa Margarita-San Lázaro. Estas forman parte del sistema Tosco-Abreojos, así como dos semigraben controlados cada uno por estas fallas y que se tiene la aparente presencia de depositación pre y syn rift. Aunque no reportamos un modelo estructural por los motivos antes mencionados, esta información contribuirá a incrementar la base de datos para trabajos futuros.

Los resultados de este estudio aportan los primeros detalles de la estructura y sismoestratigrafía de un sector angosto de la plataforma Magdalena. Los perfiles demuestran la viabilidad del uso de imágenes sísmicas de fuente activa para restringir

la estructura cortical a través de un fragmento de la placa continental. Investigaciones futuras en las áreas vecinas de la región de estudio de la plataforma y con el auxilio de pozos que pudieran haber cortado sedimentos pre y syn-rift en la plataforma podrán proporcionar restricciones sobre la evolución de este límite de placas, así como los mecanismos que conducen a la captura de microplacas y rift continental.

Contando con edades de los sedimentos en la plataforma se podrán aplicar acotaciones en la edad de deformación a lo largo de la FTA y FSL. El resultado de todo esto contribuirá a mejorar el entendimiento de la dinámica y evolución de la microplaca de Baja California y del Golfo de California. Trabajo adicional es necesario para la configuración de la superficie del cuerpo de difractor difuso que podría ser utilizado para agregar restricciones en la profundidad de la corteza oceánica.

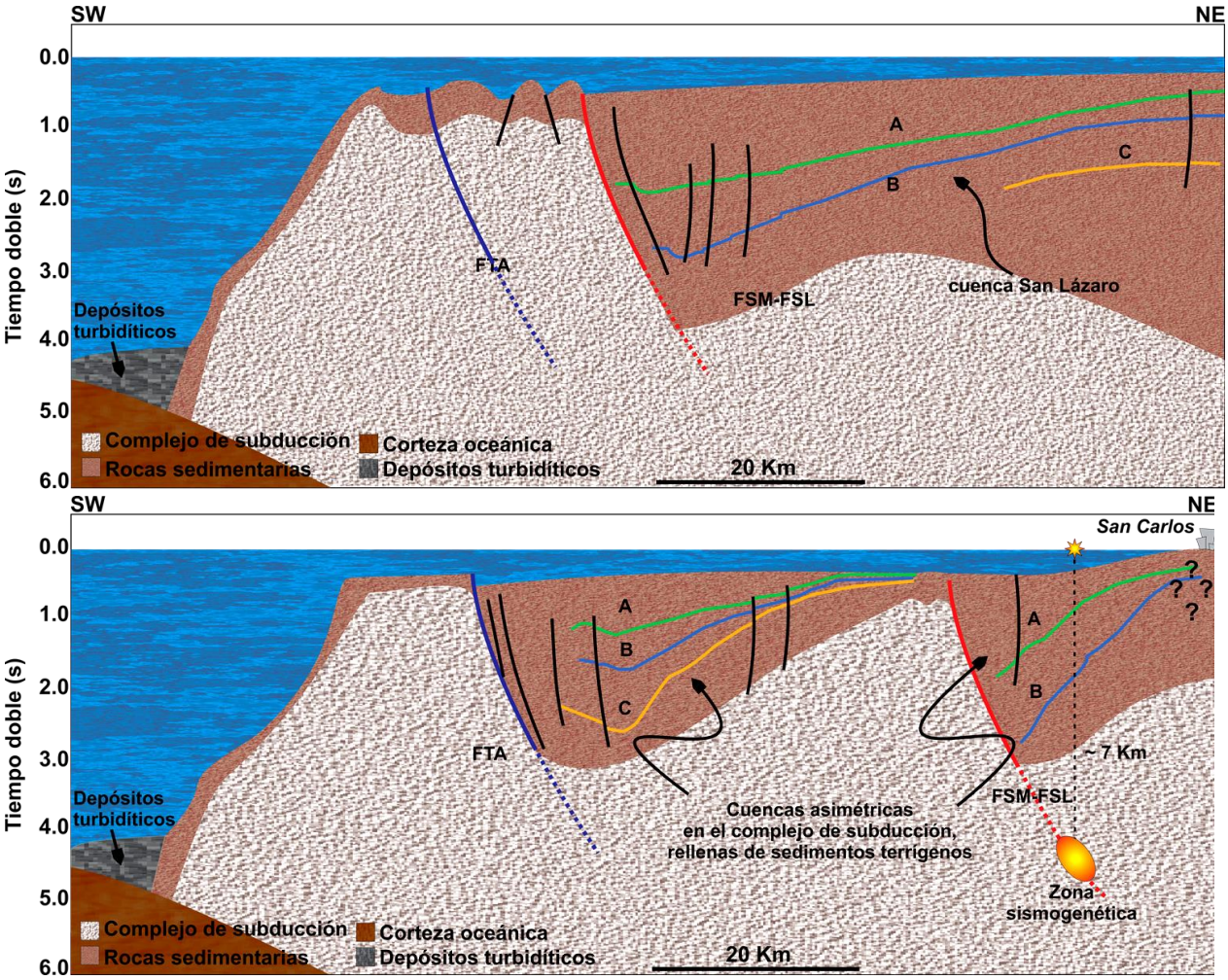


Figura 34. Perfil esquemático a lo ancho de la plataforma Magdalena. Este esquema es muy similar al propuesto por Brothers et al. (2012) 50 km al sur de la zona de estudio. En la imagen superior se tiene la cuenca San Lázaro controlada por la falla San Lázaro, ésta cuenca se acerca a la falla Tosco-Abreojos y tiene un ancho mayor que en los perfiles de sur. Éste perfil se realizó en base a lo observado en las líneas escaneadas por PEMEX. En la imagen inferior se presentan las dos cuencas asimétricas; Tosco-Abreojos y Santa Margarita-San Lázaro, controladas por las fallas principales en esta zona, así como los reflectores que dividen las secuencias A, B y C. La zona sismogenética se propone con base en la sismicidad reportada por Munguía y otros, (2014) frente al puerto de San Carlos (comunicación escrita). FTA falla Tosco-Abreojos, FSM-FSL falla Santa Margarita-falla San Lázaro.

Capítulo 5. Conclusiones

Los resultados de este estudio aportan detalles de la estructura y sismoestratigrafía de un sector de la plataforma Magdalena. Los perfiles demuestran la viabilidad del uso de imágenes sísmicas de fuente activa para restringir la estructura cortical somera de la plataforma continental del Pacifico en Baja California Sur. Dentro del área de estudio se tiene la presencia de dos sistemas de fallas importantes. La falla Tosco-Abreojos y la falla Santa Margarita-San Lázaro, las cuales forma parte del sistema Tosco-Abreojos, forman dos semigraben controlados cada uno por estas fallas. Estos depocentros albergan una serie de fallas menores semiparalelas a las principales.

Se observa un reflector difuso con un alineamiento NW-SE y que interpretamos como basamento acústico, el cual es bastante irregular en su base a lo largo de la zona de estudio. Se encuentran presentes en los depocentros, 3 paquetes sedimentarios dominantes diferenciados por reflectores de fuerte amplitud que se correlacionan con lo reportado al sureste por Brothers et al., (2012). Considerando que el sismo reflector de la base del paquete más profundo es una discordancia, y de acuerdo a Fletcher et al., (2007) quien sugirió que la discordancia representa una superficie de abrasión del Mioceno que fue expuesta subaerialmente como consecuencia de la subducción de una corteza oceánica joven. Se puede decir que esta discordancia es de carácter regional y que seguramente se extiende más al norte de la zona de estudio y al sur del perfil sísmico de Brothers et al. (2012).

Estudios futuros en las áreas vecinas a la región de estudio y el auxilio de pozos que pudieran haber cortado sedimentos pre y syn-rift en la plataforma podrán proporcionar restricciones sobre la evolución de este límite de placas, así como los

mecanismos que conducen a la captura de la microplaca y rift continental. Contando con las edades de los sedimentos en la plataforma proporcionará las acotaciones de la edad de deformación a lo largo de la FTA y FSL. El resultado de todo esto contribuirá a mejorar el entendimiento de la dinámica y evolución de la microplaca de Baja California y del Golfo de California. Trabajo adicional es necesario para acotar la profundidad de la cima de la corteza oceánica. La actividad sísmica observada es asociada principalmente a la falla Santa Margarita y a la falla San Lázaro, que se ubica prácticamente bajo el puerto de San Carlos, B.C.S., por lo que debe de ser considerada para evaluaciones de riesgo y peligro sísmico.

Lista de referencias

Atwater, T., and Stock, J. (1998).Pacific-North America plate tectonics of the Neogene southwestern United States: an update. *International Geology Review*, *40*(5), pp. 375-402.

Badley, M. E., (1985). “Practical Seismic Interpretation”. International Human Resources Development Corporation, Boston, pp. 266.

Bally, A. W. (Ed).(1987).Atlas of seismic stratigraphy. American Association of Petroleum Geologists, vol. 1, pp. 1-9.

Bohannon, R.G, and Parsons, T., (1995), Tectonic implications of post-30 Ma Pacific and North American relative plate motions. Geological Society of America Bulletin*107* (8), 937-959.

Bonini, J. A., and Baldwin, S. L. (1998). Mesozoic metamorphic and middle to late Tertiary magmatic events on Magdalena and Santa Margarita Islands, Baja California Sur, Mexico: Implications for the tectonic evolution of the Baja California continental borderland. Geological Society of America Bulletin, 110(8), 1094-1104.

Brothers, D., Harding, A., González-Fernández, A., Holbrook, W. S., Kent, G., Driscoll, and Axen, G. (2012). Farallon slab detachment and deformation of the Magdalena Shelf, southern Baja California. Geophysical Research Letters, 39(9).

Brothers, D. S. (2009). New insights into North America-Pacific plate boundary deformation from Lake Tahoe, Salton Sea and Southern Baja California.

Busby, C., Smith, D., Morris, W., and Fackler-Adams, B. (1998). Evolutionary model for convergent margins facing large ocean basins: Mesozoic Baja California, Mexico. Geology, 26(3), pp. 227-230.

Plattner, C., Malservisi, R., and Govers, R. (2009). On the plate boundary forces that drive and resist Baja California motion. Geology, 37(4), pp. 359-362.

Rangin, C. (1984). Aspectos geodinámicos de la región noroccidental de México: Universidad Nacional Autónoma de México: Instituto de Geología. Revista, 5(2), 186-194.

Cohen, J. K., and Stockwell, J. JW, Seismic Unix Release 34: a free package for seismic research and processing, 2000. Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines.

DeMets, C. (1995). Plate motions and crustal deformation. Reviews of Geophysics, 33(S1), 365-369.

Dickinson, W. R. (1995). Forearc basins. Tectonics of sedimentary basins, pp. 221-261.

Dixon, T., Farina, F., DeMets, C., Suarez-Vidal, F., Fletcher, J., Marquez-Azua and Umhoefer, P. (2000). New kinematic models for Pacific-North America Motion from 3 Ma to Present, II: Evidence for a “Baja California Shear Zone”. Geophysical Research Letters, 27(23), pp. 3961-3964.

Ferrari, L. (2004). Slab detachment control on mafic volcanic pulse and mantle heterogeneity in central Mexico. Geology, 32(1), pp. 77-80.

Fletcher, J. M., Grove, M., Kimbrough, D., Lovera, O., and 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. Geological Society of America Bulletin, 119(11-12), 1313-1336.

González Escobar, M., M. Navarro Sánchez, S. Mayer Geraldo, L. Munguía Orozco, A. Aguirre Estrada y T. A. Valdez López. (2002). Monitoreo sísmico en el área de San Carlos, Baja California Sur: actividad registrada entre noviembre de 2000 y junio de 2001. . pp. 1-18. Informe técnico. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (p. 3733).

González-Escobar, M. (2011). Interpretación sísmica en las cuencas de Vizcaíno y Purísima. Informe del proyecto PEMEX-CICESE Evaluación del potencial petrolero del norte del Golfo de California y margen del Pacífico de Baja California. 4, pp. 125-140.

Ingersoll, R.V., Busby, C. (1995).Tectonics of sedimentary basins. Pp.35-46.

Kearey, P., Klepeis, K. A., and Vine, F. J. (2009).Global tectonics.John Wiley and Sons.

Kimbrough, D. L., Smith, D. P., Mahoney, J. B., Moore, T. E., Grove, M., Gastil, R. G., and Fanning, C. M. (2001).Forearc-basin sedimentary response to rapid Late

Cretaceous batholith emplacement in the Peninsular Ranges of southern and Baja California. Geology, 29(6), pp. 491-494.

Liner, C. L. (2004).Elements of 3D seismology (Vol. 1).PennWell Books.

Lonsdale, P. (1991). Structural patterns of the Pacific floor offshore of peninsular California. The gulf and peninsular province of the Californias: American Association of Petroleum Geologists Memoir, 47, pp. 87-125.

Martín Barajas, A., Suárez Vidal, F. (2011). Integración geológica y geofísica y análisis del sistema petrolero. Informe del proyecto PEMEX-CICESE Evaluación del potencial petrolero del norte del Golfo de California y margen del Pacífico de Baja California, 1, pp. 1-33.

Mayer Geraldo, S., A. Aguirre Estrada, M. González Escobar, L. Munguía Orozco y R. Ortega Ruiz. (2005). Muestreo de la actividad microsísmica en las inmediaciones de Bahía Concepción, Baja California Sur. Informe técnico CICESE.11 pags.PA: 33261.

Miall, A. D. (1990). Principles of sedimentary basin analysis (Vol. 633, p. 499). New York: Springer-Verlag.

Michaud, F., Calmus, T., Sosson, M., Royer, J. Y., Bourgois, J., Chabert, A.,and Dyment, J. (2005). La zona de falla Tosco-Abreojos: un sistema lateral derecho activo entre la placa Pacífico y la península de Baja California. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 57(1), pp. 53-63.

Michaud, F., Royer, J. Y., Bourgois, J., Dyment, J., Calmus, T., Bandy, W.,and 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), pp. 13-16.

Michaud, F., Sosson, M., Royer, J. Y., Chabert, A., Bourgois, J., Calmus and Sichler, B. (2004). Motion partitioning between the Pacific plate, Baja California and the North America plate: The Tosco-Abreojos fault revisited. Geophysical Research Letters, 31(8).

Normark, W. R., Spencer, J. E., and Ingle, J. C. (1991).Geology and neogene history of the pacific continental margin of Baja California Sur, Mexico., *in* Dauphin, 79 .

Normark, W.R., Spencer, J.E., and Ingle, J., (1987), Geology and Neogene history of the Pacific c continental margin of Baja California Sur, Mexico, *in* Scholl, D.W., et al., eds., Geology and resource potential of the continental margin of western North America and adjacent ocean basins—Beaufort Sea to Baja California: Houston, Texas, Circum-Pacific c Counsel for Energy and Mineral Resources, Earth Science Series Volume 6, p. 449–472.

Pallares, C., Maury, R. C., Bellon, H., Royer, J. Y., Calmus, T., Aguillón-Robles, A. and Bourgois, J. (2007). Slab-tearing following ridge-trench collision: Evidence from Miocene volcanism in Baja California, México. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 161(1), pp. 95-117.

Sheriff, R. E., and Geldart, L. P. (1995).Exploration seismology.Cambridge university press.

Spencer, J. E., and 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), pp. 554-557.

Stock, J. M., and 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), 99-115.

Stock, J. M., and Lee, J. (1994). Do microplates in subduction zones leave a geological record?. Tectonics, 13(6), 1472-1487.

Yeats, R.S., B.U., Haq, J.A. Barron, D. Bukry, J. Crouch, Ch. Denham, A.G. Douglas, V.J. Grechin, M. Leinen, A. Niem, S. P. Verma, K. A. Pisciotto, R. Z. Poore, T.Shibata and R. Wolfatr (1978). Inital reports of the Deep Sea Drilling Project, Volume LXIII, 1978. National Science Foundation –Univesity of California, Scrips Institution of Oceanography.

Yeats, R., and Haq, B., 1981, Deep-sea drilling off the Californias: Implications of Leg 63: Initial Reports DSDP, v. 63, p. 949-961.

Yilmaz, Ö. (2001). Seismic data analysis (Vol. 1, pp. 74170-2740). Tulsa: Society of Exploration Geophysicists.

Anexo

Manual para la asignación de geometría en perfiles marinos

El siguiente manual fue realizado para proporcionar al usuario de **ProMAX** la información necesaria para realizar la asignación de geometrías.

Para cada etapa del procesamiento se crea un área de trabajo y, dentro de esta el flujo para realizar el procedimiento deseado. Para la asignación de geometría creamos el flujo Geometría y la herramienta utilizar es ***"2D Marine Geometry Spreadsheet"*** (Geometría de datos marinos).

1. Cree el área de trabajo, en este caso el de Geometría. Agregue la herramienta a utilizar. En el área en blanco escriba 2D Marine Geometry Spreadsheet para agregar la herramienta (Figura A. 1).

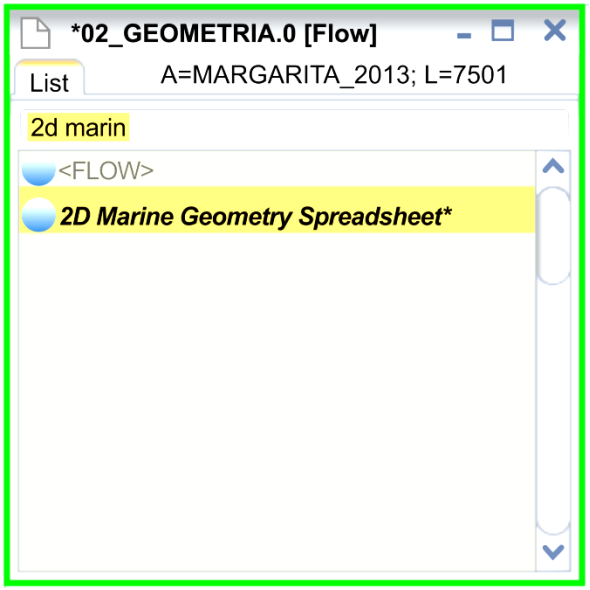


Figura A. 1.Área de trabajo donde se ejecutara la aplicación de geometría mediante la herramienta 2D Marine Geometry Spreadsheet.

2. Una vez llamada la herramienta, presione la opción ejecutar que se encuentra en la parte superior de la ventana de trabajo y aparecerá una ventana como la que se muestra en la Figura A. 2.

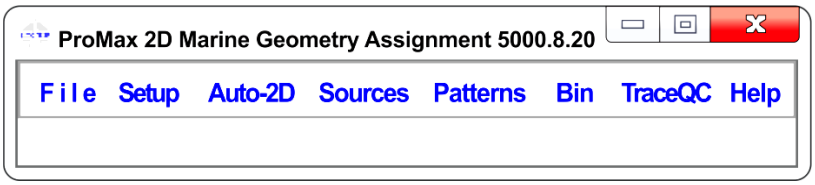


Figura A. 2. Ejecución positiva del flujo de geometría.

2.1 Hoja de cálculo ***Setup.*** Esta hoja se utiliza para especificar la separación entre fuentes y receptores, así como el valor de azimut de cada perfil sísmico para calcular ciertas variaciones del mismo. Seleccione la opción Setup y aparecerá una ventana como en la Figura A. 3. Como se requiere la asignación de patrones se escoge la opción **Matching pattern number in the SIN and PAT spreadsheets** (Figura A. 4), en esta opción se calcula el número de patrones utilizando el primer canal de grabación y la primera estación de tiro. Llene la información necesaria que se encuentra en la cabecera de los datos en formato SGY o, en el reporte del observador.

SEG-Y Reel Header

C01	PEMEX EXPLORACION Y PRODUCCION	
C02	REGION	:NORTE
C03	ZONA	:ZM
C04	AREA	:BAJA CALIFORNIA
C05	PROSPECTO	:S-D (511)
C06	No DE LINEA	:7501
C07	FECHA DE OBSERVACION	:17-06-79
C08	INFORMACION DE CAMPO	
C09	BRIGADA	:511
C10	EQUIPO	:SERCEL
C11	No DE CANALES	:48
C12	TIEMPO DE GRABACION [ms]	:6000
C13	INTERVALO DE MUESTREO [ms]	:2
C14	FORMATO DE GRABACION	:SEGB
C15	FUENTE DE ENERGIA	:AIRGUN
C16	VOLUMEN [cu inc]	:1710
C17	PRESION [psi]	:1800
C18	FILTRO BAJO¨[Hz]	:OUT
C19	FILTRO ALTO¨[Hz]	:125
C20	DISTANCIA ENTRE ESTACIONES [m]	:50
C21	DISTANCIA ENTRE P. T. [m]	:25
C22	PATRON DE TIRO [m]	:0-307-2682

Figura A. 3. Encabezado de los datos en formato SGY donde se muestran los parámetros del registro. Estos datos pertenecen al prospecto Santo Domingo y fueron tomados en 1976.

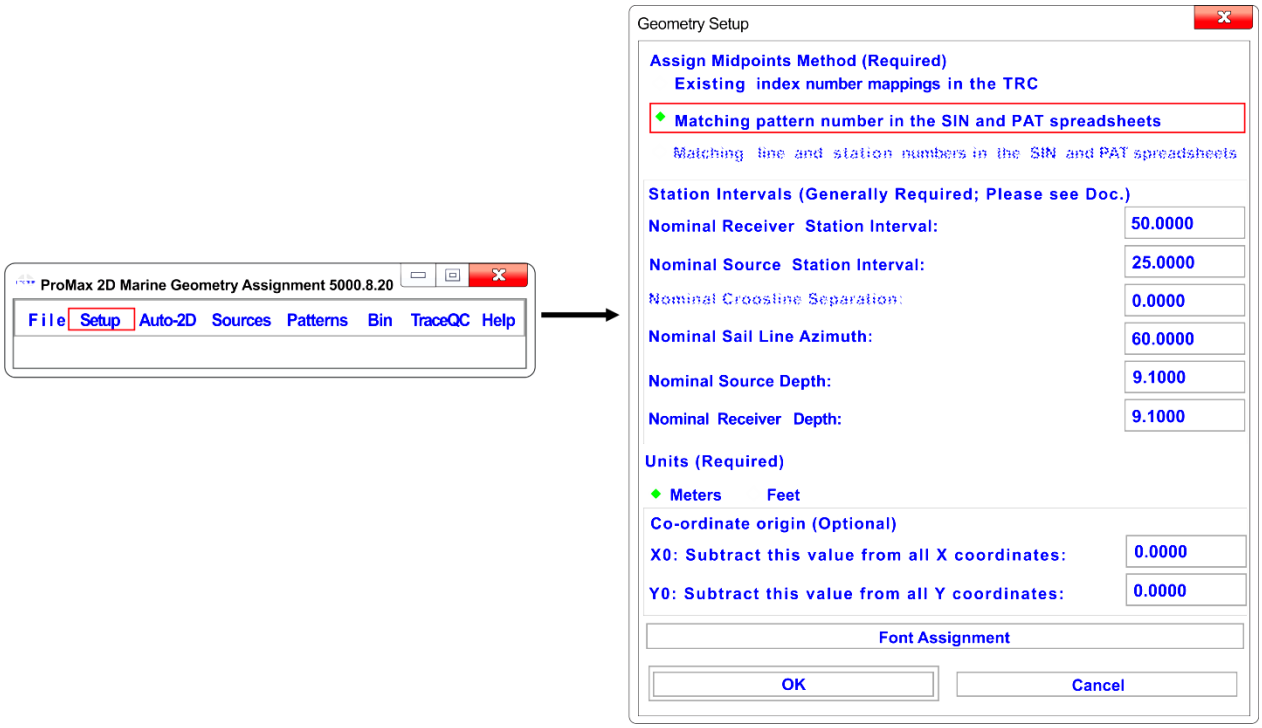


Figura A. 4. Asignación de distancia entre Fuentes y receptores y su profundidad. Asignación de azimut.

2.2 Hoja de cálculo **Auto-2D**. Se identifica el canal más cercano y más lejano. En este caso, el canal más cercano es el 48, es decir, es el primer canal en registrar la señal proveniente de la fuente y, de acuerdo a los datos de cabecera, se encuentra a 307m de la fuente. Se especifica el número de fuentes en el perfil y las coordenadas de la primera fuente (Figura A.5).

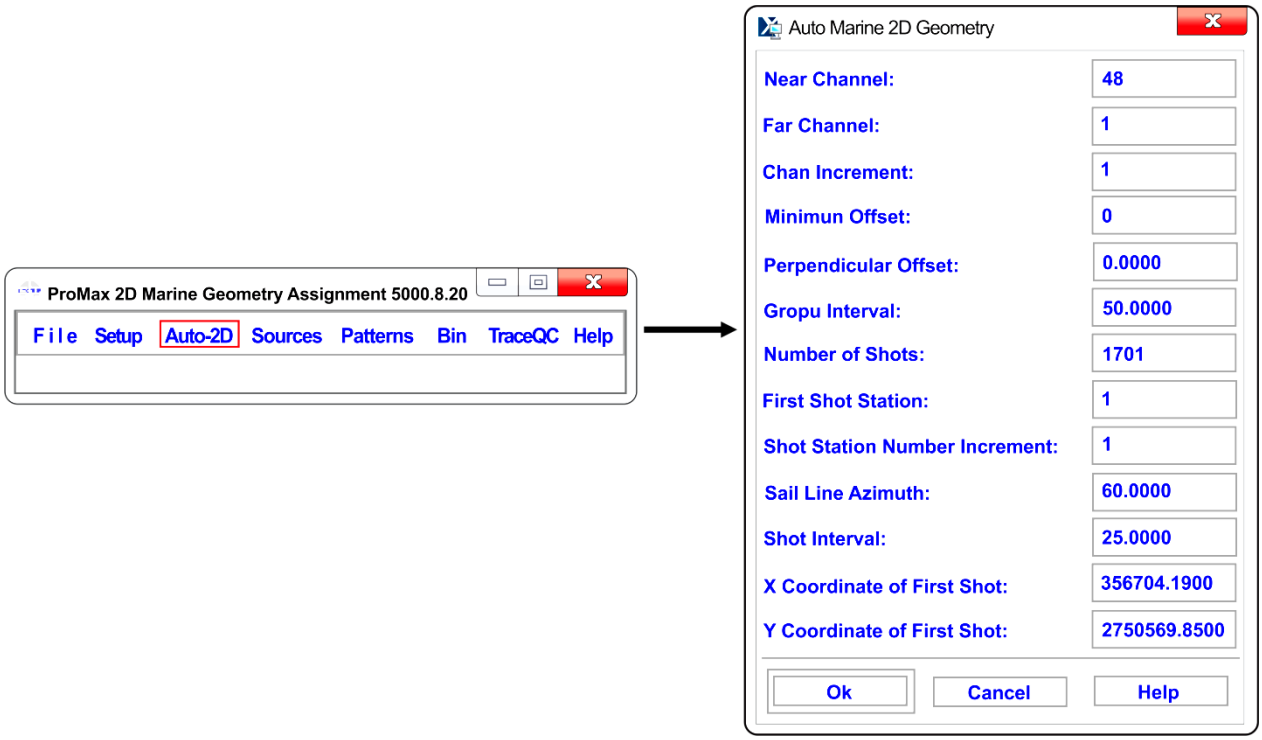
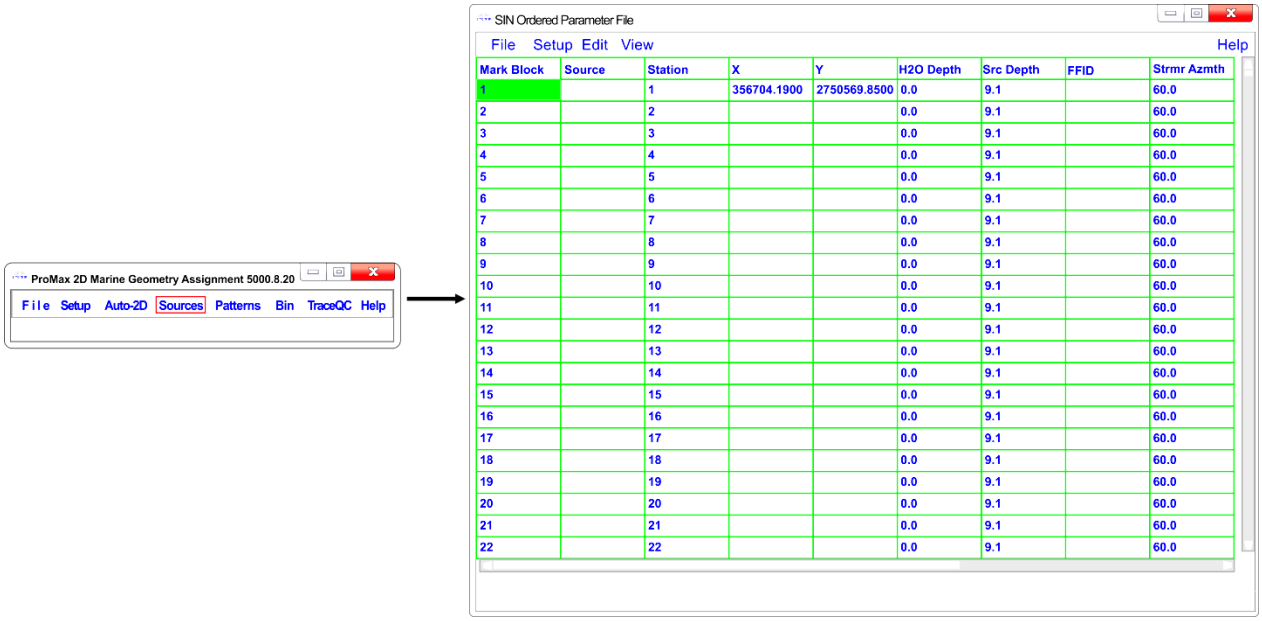


Figura A. 5. Asignación de los canales y las coordenadas de la primera fuente.

2.3 Hoja de cálculo ***Source.*** Se mostrará una ventana como en la Figura A. 6. En esta hoja se asignarán las coordenadas (X, Y) de las fuentes.



Mark Block	Source	Station	X	Y	H2O Depth	Src Depth	FFID	Strmr Azmth
1		1	356704.1900	2750569.8500	0.0	9.1		60.0
2		2			0.0	9.1		60.0
3		3			0.0	9.1		60.0
4		4			0.0	9.1		60.0
5		5			0.0	9.1		60.0
6		6			0.0	9.1		60.0
7		7			0.0	9.1		60.0
8		8			0.0	9.1		60.0
9		9			0.0	9.1		60.0
10		10			0.0	9.1		60.0
11		11			0.0	9.1		60.0
12		12			0.0	9.1		60.0
13		13			0.0	9.1		60.0
14		14			0.0	9.1		60.0
15		15			0.0	9.1		60.0
16		16			0.0	9.1		60.0
17		17			0.0	9.1		60.0
18		18			0.0	9.1		60.0
19		19			0.0	9.1		60.0
20		20			0.0	9.1		60.0
21		21			0.0	9.1		60.0
22		22			0.0	9.1		60.0

Figura A. 6. Hoja de cálculo donde se asignaran las coordenadas a las Fuentes.

Se deberán llenar las columnas Source y FFID con los mismos valores (Figura A. 7). Estos valores corresponden a la primera fuente, primer disparo y así sucesivamente.

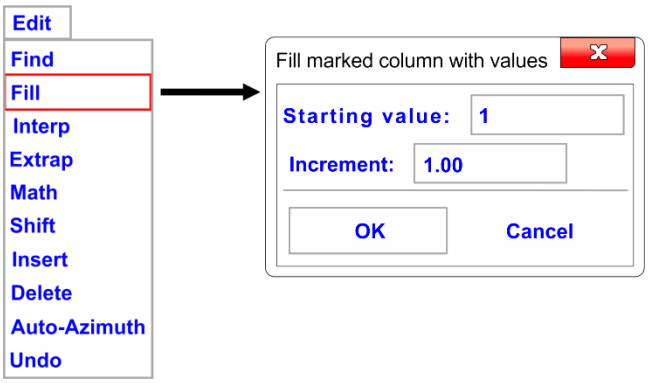


Figura A. 7.Los valores iniciaran en 1 y su incremento será de uno en uno para ambas columnas.

Una vez llenadas las columnas, se procede a importar el archivo que contiene las coordenadas para cada fuente y que deberá estar en formato ASCII para poder ser importados por **ProMAX** (Figura A.8).

Figura A. 8.Figura A.1 Comando para la importación de los datos ASCII que contiene las coordenadas.

El archivo debe de constar de cuatro columnas, las primeras dos corresponden al número de fuentes y estaciones y las dos últimas a las coordenadas X, Y. Esta información se obtiene de los reportes de observación o en nuestro caso de un mapa que contenga los perfiles sísmicos y georeferenciado para poder hacer una interpolación con el número de fuente. Una vez encontrada la ubicación de los datos, se presentan como lo muestra la Figura A.9, donde las columnas 3 y 4 reportan las coordenadas de las fuentes.

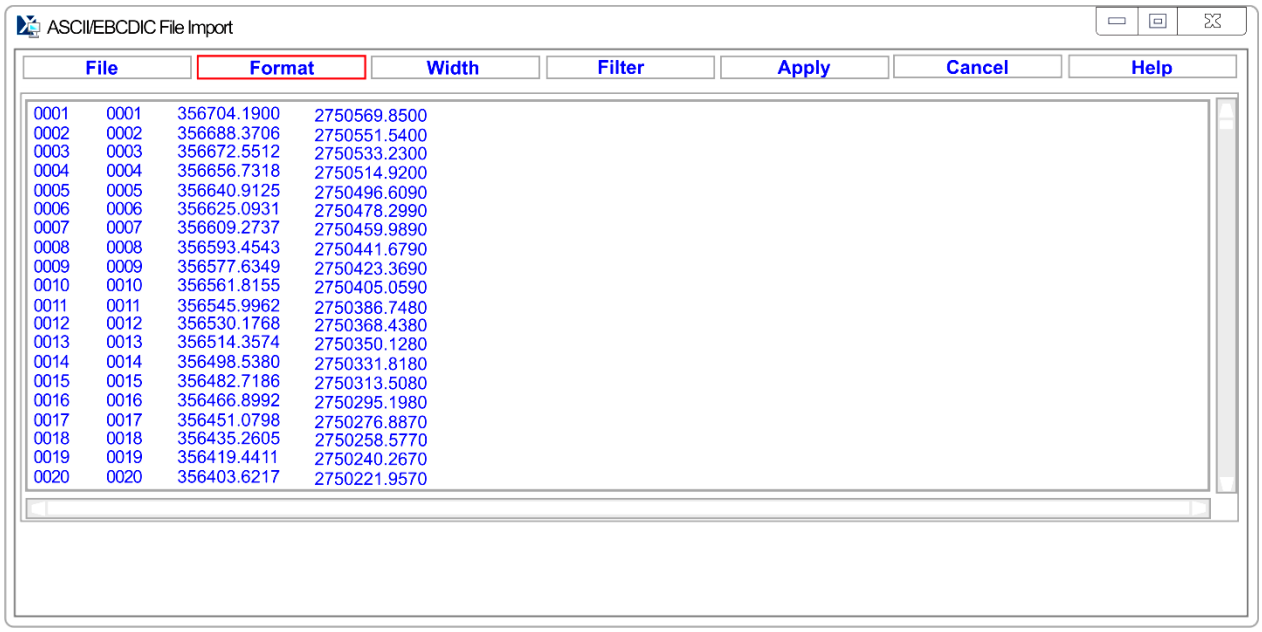


Figura A. 9. Importación de las coordenadas de las fuentes

Se selecciona la opción **Format** y aparecerá una ventana como muestra la Figura A.10, donde se nos pedirá que seleccionemos el archivo donde se guardaran las asignaciones o bien, que creemos uno**.**

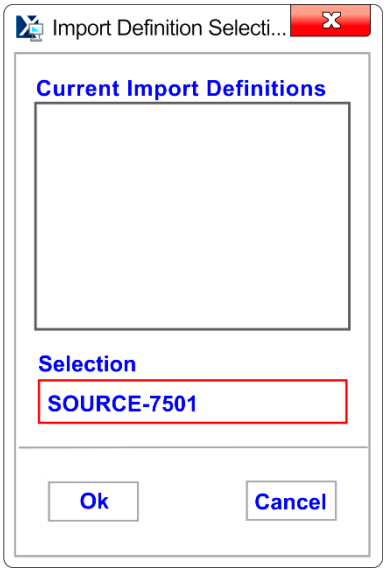


Figura A. 10. Creación del archivo donde se guardaran las especificaciones de los datos.

Una vez creado el archivo aparecerá una nueva ventana (Figura A. 11) donde se especificará que los valores se encuentran desde la 1 uno hasta la columna 4,

pertenecen al número de las estaciones, de la 6 a la 9 corresponden al número de las fuentes. De la columna 11 a la 21, los valores pertenecen a la coordenada X y de la columna 23 a la 34 los valores pertenecen a la coordenada Y.

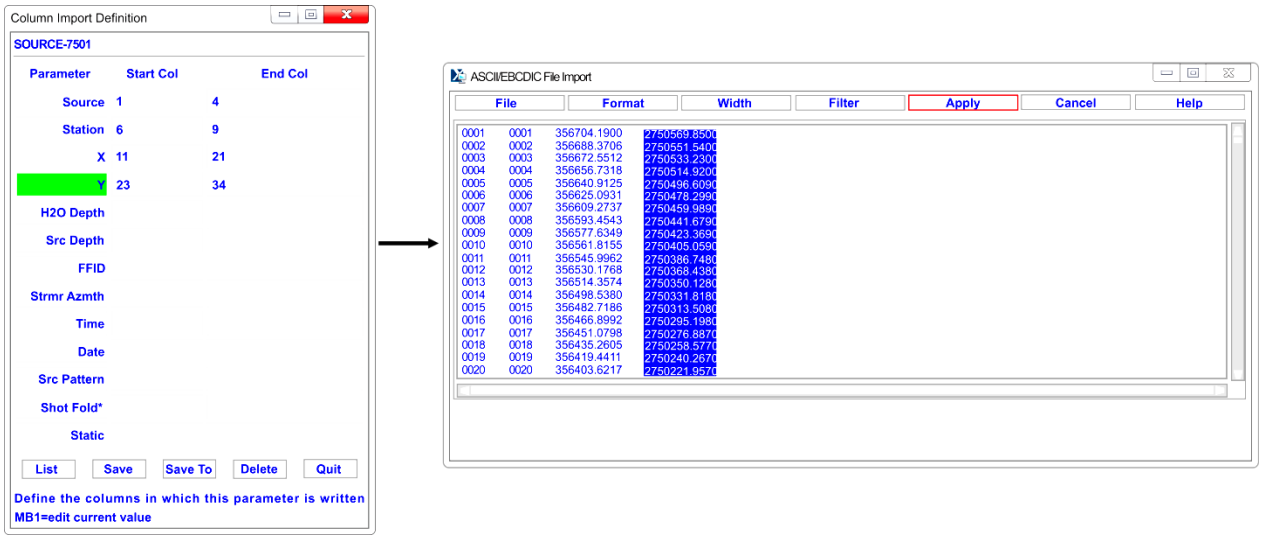


Figura A. 11. Selección del número de espacios para cada elemento de la hoja de los receptores.

Se guarda la información con la opción **Save** y aparecerá la ventana que se muestra en la Figura A. 12, se selecciona la opción Overwrite para cargar toda la información guardada y finalmente se selecciona **Ok**. La Figura A. 13 muestra las columnas cargadas con la información.

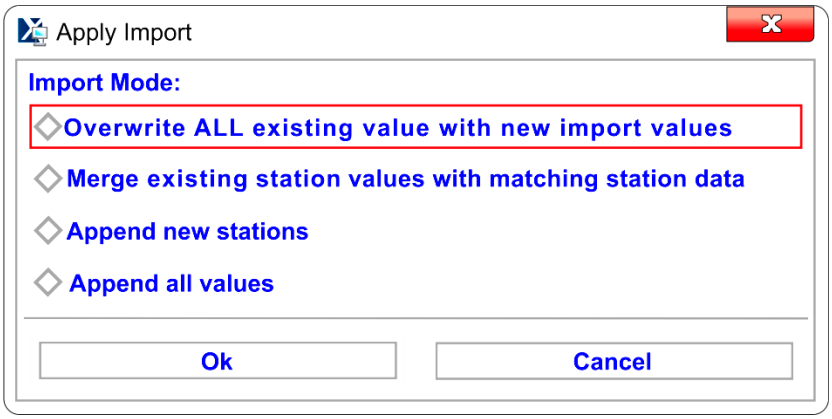


Figura A. 12. Ventana que nos da la opción de guardar las coordenadas de las fuentes.

SIN Ordered Parameter File

File Setup Edit View Help

Mark Block	Source	Station	X	Y	H2O Depth	Src Depth	FFID	Strmr Azmth
1	1	1	356704.19000	2750569.8500	0.0	9.1	1	60.0
2	2	2	356688.3706	2750551.5400	0.0	9.1	2	60.0
3	3	3	356672.5512	2750533.2300	0.0	9.1	3	60.0
4	4	4	356656.7318	2750514.9200	0.0	9.1	4	60.0
5	5	5	356640.9125	2750496.6090	0.0	9.1	5	60.0
6	6	6	356625.0931	2750478.2990	0.0	9.1	6	60.0
7	7	7	356609.2737	2750459.9890	0.0	9.1	7	60.0
8	8	8	356593.4543	2750441.6790	0.0	9.1	8	60.0
9	9	9	356577.6349	2750423.3690	0.0	9.1	9	60.0
10	10	10	356561.8155	2750405.0590	0.0	9.1	10	60.0
11	11	11	356545.9962	2750386.7480	0.0	9.1	11	60.0
12	12	12	356530.1768	2750368.4380	0.0	9.1	12	60.0
13	13	13	356514.3574	2750350.1280	0.0	9.1	13	60.0
14	14	14	356498.5380	2750331.8180	0.0	9.1	14	60.0
15	15	15	356482.7186	2750313.5080	0.0	9.1	15	60.0
16	16	16	356466.8992	2750295.1980	0.0	9.1	16	60.0
17	17	17	356451.0798	2750276.8870	0.0	9.1	17	60.0
18	18	18	356435.2605	2750258.5770	0.0	9.1	18	60.0
19	19	19	356419.4411	2750240.2670	0.0	9.1	19	60.0
20	20	20	356403.6217	2750221.9570	0.0	9.1	20	60.0
21	21	21	356389.8023	2750203.6470	0.0	9.1	21	60.0
22	22	22	356371.9829	2750185.3370	0.0	9.1	22	60.0

Figura A. 13.Hoja de Cálculo en la que ya se han cargado las coordenadas para cada una de las fuentes.

Una vez llenada la tabla, se guardan los datos seleccionando la opción **File** y **Save**. Ya guardada la tabla, en la misma opción **File** seleccionar **Exit**.

2.4 Finalizar la carga de geometría. la ventana **Bin** se utiliza para calcular el ordenamiento por CDP, asignar puntos medios entre fuentes, generar parámetros para la realización de controles de calidad y para finalizar la base de datos correspondiente a la geometría (Figuras B. 14-16).

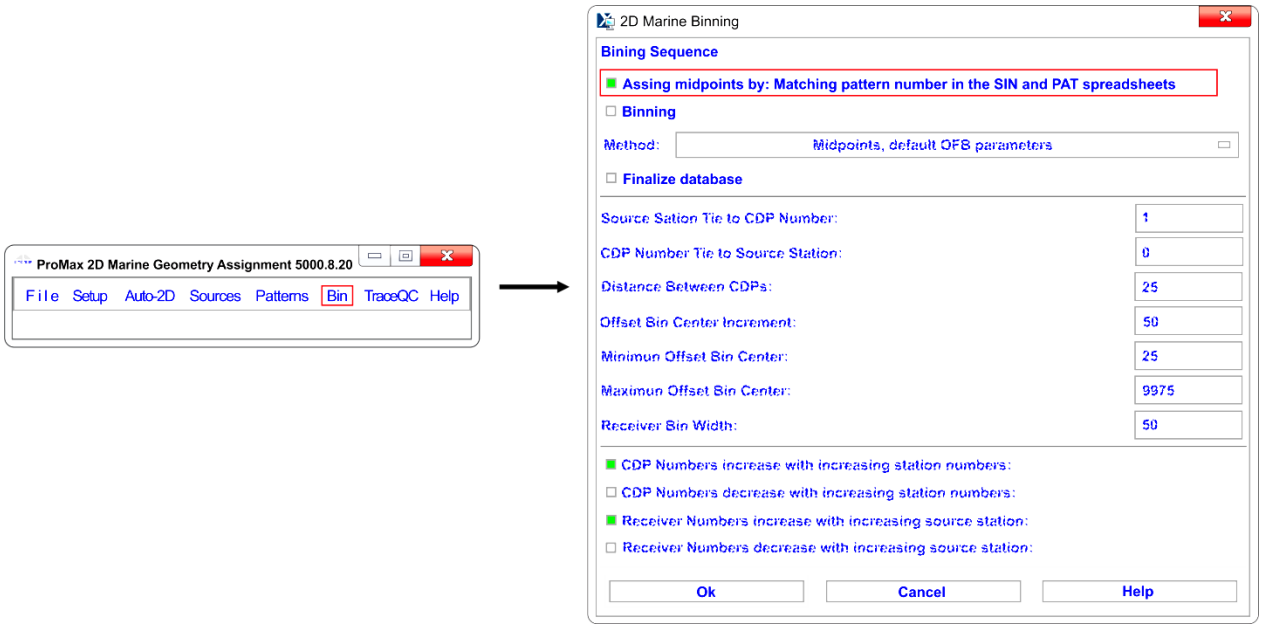


Figura A. 14.Se calcula el ordenamiento por CDP asignando puntos medios entre Fuentes.

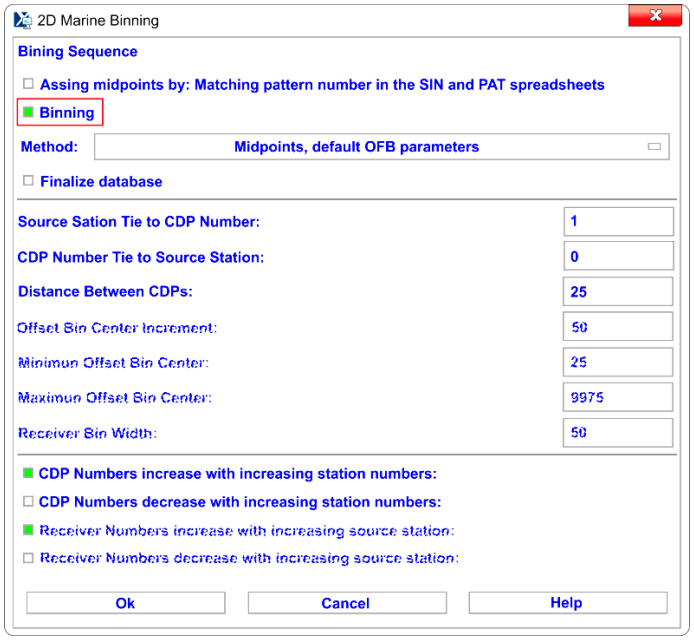


Figura A. 15.Se generan parámetros para el control de calidad a partir del método de puntos medios. Se usa una separación de CDPs de 25m.

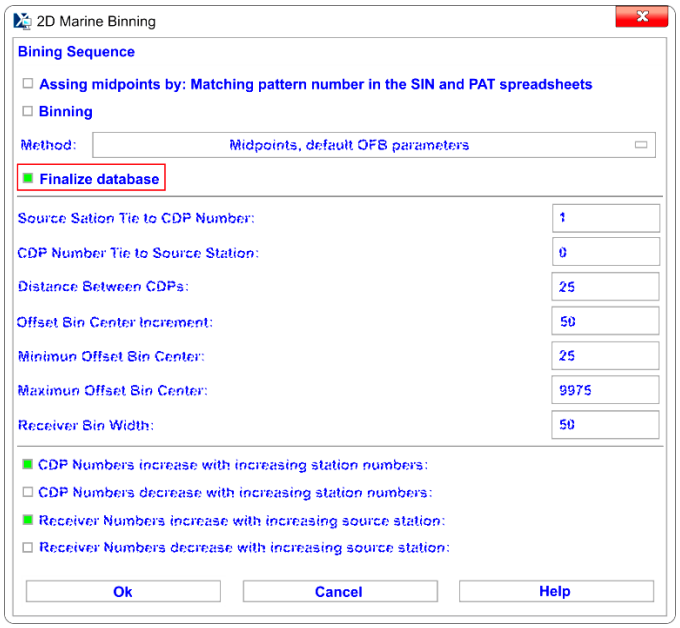


Figura A. 16. Paso final para la carga complete de la geometría.

Seleccione la opción de **File** desde el menú de la ventana de Geometría y **Exit** para finalizar.

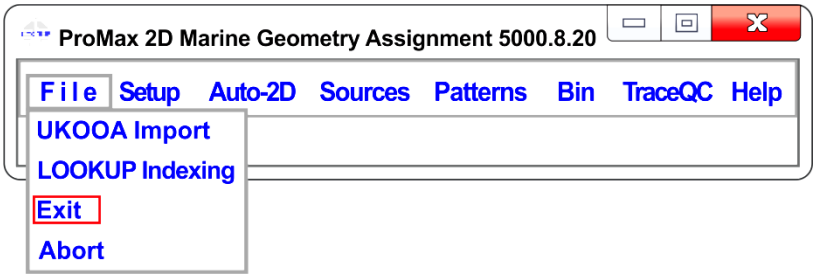


Figura A. 17. Opción para finalizar por completo la carga de geometría