



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE
VALPARAÍSO
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR Y
GEOGRAFÍA
ESCUELA DE CIENCIAS DEL MAR
CARRERA DE OCEANOGRAFÍA



Deformación y Acreción de turbiditas en la fosa de Chile junto al
cañón submarino de Cucao frente a la isla de Chiloé

Trabajo de Titulación para optar al Título de Oceanógrafo

CARMINA LORENA GONZALEZ HERNANDEZ
VALPARAISO 2017

Comisión de titulación:

Profesor Guía: Dr. Juan Díaz Naveas

Profesor: Dr. Marco Cisternas Vega

Profesora: Eleonora Barroso Villegas

AUTORIZACIÓN DE USO

Autorizo a la biblioteca de la Escuela de Ciencias del Mar de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, para que disponga libremente del Trabajo de Titulación. Además, autorizo la reproducción parcial o total de este documento sólo con fines académicos.

Nombre del estudiante

DEDICATORIA

“Sólo los que intentan cosas absurdas
son capaces de lograr cosas
imposibles”

Miguel de Unamuno.

----- o -----

Dedico este trabajo de titulación, a mi
padre y a mi hijo, al primero por
apoyarme hasta más allá de lo
absurdo, al segundo, porque desde su
amor incondicional me motiva a lo
imposible.

AGRADECIMIENTOS

Mis primeros agradecimientos van dirigidos a mi familia, la cual me ha apoyado de diversas formas e incondicionalmente en este nuevo proceso en el que decidí embarcarme. En particular mi más grande agradecimiento va dirigido a mi padre quien con su amor y apoyo me ha llevado siempre a buscar la grandeza de las cosas. Mi hermano Felipe, quien con su sabiduría ha sabido controlar mis más grandes temores. Mi hermano Daniel, que siempre ha estado presente para tenderme una mano. Y no menos importante, Olgui quien sin tener ninguna obligación, ha sabido darme durante toda mi vida su amor incondicional y apoyo, como una madre lo haría. Agradezco a mi madre, que, aunque ya no esté aquí conmigo he sentido el apoyo y la confianza que siempre me dio en la vida y que extraño con el alma. A Claudio por el cariño y paciencia al escucharme. Y, por último, y también muy importante a mi hijo hermoso, quien, con su paciencia infinita, su ternura y amor incondicional me ha apoyado hasta más allá de lo imposible.

También quiero agradecer, a mis tíos Pato y Gladys, por todas la ayuda y el apoyo que me han dado durante muchos años. A mis amigas Natalia y Gabriela, quienes siempre han estado ahí para contenerme, ofreciéndome su amistad incondicional. Las mejores amigas que cualquiera pudiera pedir.

Agradecer al profesor Juan Díaz por el apoyo entregado para este proyecto, sus enseñanzas, paciencia y correcciones.

Finalmente agradecer a mis compañeros, quienes se han vuelto mis amigos. A Gabriela Polanco en particular, por su bondad, simpatía y “memes”. A Pablo Vilches por su paciencia y forma de ser, me ha alegrado el día, la semana, el mes y el año.

A todos los antes mencionados y a los que no he mencionado, pero de alguna forma u otra han estado ahí apoyándome, mi más sincero agradecimiento, aquí cuentan con una amiga fiel.

TABLA DE CONTENIDO

Comisión de titulación:	i
AUTORIZACIÓN DE USO	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
TABLA DE CONTENIDO	v
LISTA DE FIGURAS	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT	ix
INTRODUCCIÓN	11
HIPÓTESIS	16
OBJETIVOS	17
MATERIALES Y MÉTODOS	18
RESULTADOS	25
DISCUSIÓN	21
CONCLUSIÓN	24
REFERENCIAS	25
ANEXOS	27

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Instrumentos usado en sísmica de reflexión marina: buque con equipo registrador, cañones de aire y “streamer” con hidrófonos. _____ 4
- Figura 2:** Línea sísmica frente a la isla de Chiloé, junto al cañón de Cucao entre los $42^{\circ} 27' 14,731''$ S, $75^{\circ} 47' 47,133''$ W y los $42^{\circ} 34' 45,528''$ S, $75^{\circ} 09' 25,407''$ W. Esta figura fue generada con el software GeoMapApp. _____ 8
- Figura 3 :** Ejemplo de la función de semblanza (“espectro de velocidad”) en función de la velocidad de stack y del tiempo de ida y vuelta para la distancia fuente receptor igual a cero(t_0). Los valores de semblanza altos están codificados en el color rojo; los valores intermedios, en verde y los valores bajos, en azul. _____ 10
- Figura 4:** Imagen de los datos sísmicos ordenados en CMP y luego corregidos por NMO. _____ 11
- Figura 5:** Comparación entre una imagen sísmica producida por el apilamiento o “stacking” (“Unmigrated image”) y la imagen producida por la migración (“Migrated image”). _____ 12
- Figura 6:** Imagen sísmica migrada, a la cual se le han delineado los estratos y las fallas. 13
- Figura 7:** Ubicación profundidad de las diversas reflexiones. _____ 14
- Figura 8:** Perfil sísmico entre los 1000 y 9500 CMPs, luego de la migración _____ 15
- Figura 9:** Sección del perfil sísmico entre los 2400 y 7200 CMP _____ 16
- Figura 10:** Sección del perfil sísmico entre los 2400 y 7200 CMP _____ 17
- Figura 11:** a) Sección sísmica desde los CMP 4500 a 6000 CMP, b) diagrama en bloque de una estructura en flor positiva (imagen obtenida en Moores (2007)). _____ 18

Figura 12: Sección sísmica entre los 4200 y 8600 CMP _____ 19

Figura 13: Sección sísmica entre los CMP 7000 y 9500. _____ 20

Figura 14: Ilustración de una falla transcurrentes en una zona de subducción de un margen convergente oblicuo. De este modo se acomoda la deformación perpendicular y paralela al margen convergente. _____ 22

RESUMEN

El margen continental de Chile frente a la isla de Chiloé (42° - 43°S) es un margen activo, donde la placa de Nazca converge en forma ligeramente oblicua hacia la placa Sudamericana. En esta región, la subducción se caracteriza por una placa que subducta con bajo ángulo y la fosa presenta un gran relleno sedimentario con turbiditas, producto de los aportes de sedimentos terrígenos, de tal manera que el perfil de la fosa no es en “V”, sino que solamente limitado por el este por el talud continental. Este corresponde a un prisma de acreción, subyacente por un canal de sedimentos que entran en subducción. En enero y febrero de 2017, en el marco del proyecto CEVICHE se adquirieron datos de reflexión sísmica multicanal a bordo del R/V Langseth con un streamer de 15km de largo. Una de las líneas sísmicas (MC43) se ubica ligeramente oblicua al margen continental junto al cañón submarino de Cucao. Esta línea fue procesada e interpretada con el fin de verificar o rechazar la posibilidad que hubiese fallas transcurrentes paralelas al margen cortando verticalmente el relleno sedimentario de turbiditas de la fosa. El procesamiento incluyó las etapas estándar hasta stack y migración poststack en tiempo. La imagen sísmica muestra fallas verticales, con desplazamientos con componente vertical casi despreciable, lo cual indicaría que dichas fallas no son fallas inversas, sino que fallas transcurrentes. Más aún, existen indicios de la existencia de una estructura en flor positiva, lo que reafirmaría la existencia de una tectónica transcurrente. Sin embargo, hacia el este existe un prisma de acreción, el cual requiere de fallas inversas para ser explicado. Aparentemente, dicho fallamiento se manifiesta solamente a partir del frente de deformación y no antes, pero la imagen sísmica no muestra dichas fallas en forma nítida. En conclusión, la sísmica de reflexión muestra indicios de tectónica transcurrente paralela al margen, pero esta no es concluyente, tanto porque la imagen sísmica no es suficientemente nítida, como porque aún no se cuenta con líneas sísmicas, paralelas a la analizada, que permitan confirmar esta posibilidad. En caso de verificarse la hipótesis anterior, sería uno de los primeros lugares en que se reportase la existencia de fallas transcurrentes delante del frente de deformación.

ABSTRACT

The continental margin of Chile off Chiloé island (42° - 43° S) is an active margin, where the Nazca plate converges slightly obliquely against the South American plate. In this region, the subduction is characterized by a plate that subducts with low angle and presents a large sedimentary fill with turbidites, caused by terrigenous sediments, in such a way that the trench profile is not V-shaped, but only limited eastwards by the continental slope. This corresponds to an accretionary prism, underlied by a sediment channel being subducted. In January and February 2017, in the framework of the CEVICHE project, multichannel seismic reflection data was acquired on board the R/V Langseth with a 15km long streamer. One of the seismic lines (MC43) is located slightly oblique to the continental margin next to the Cucao submarine canyon. This line was processed and interpreted in order to verify or reject the possibility of strike-slip faults parallel to the margin cutting vertically the trench sedimentary fill of turbidites. The processing included the standard stages up to stack and poststack time migration. The seismic image shows vertical faults, with displacements with almost negligible vertical components, which indicates that the faults are not reverse faults, but rather strike-slip faults. Moreover, there are indications of the existence of a positive flower structure, which could confirm the existence of strike-slip tectonics. However, towards the east there is an accretionary prism, which requires reverse faults to be explained. Apparently, such faulting is present only from the deformation to the east and not before, but the seismic image does not show these faults in a clear way. In conclusion, reflection seismics shows signs of strike-slip tectonics to the margin, but it is not conclusive, because both the seismic image is not clear enough, and because there are no seismic lines parallel to the one analyzed, which could confirm this possibility. In case of verifying the latter hypothesis, it would be one of the first places where the existence of strike-slip faults would have been reported before of the deformation front.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento sobre el margen continental y sus estructuras geológicas, son de gran importancia, ya que permiten entender, el origen de yacimientos, de cómo se formaron y cómo se dispuso la arquitectura de la superficie terrestre, y ayuda a tomar medidas frente a riesgos geológicos que afecten las características termales, morfológicas y geoquímicas de la litósfera continental (Oncken *et al.*, 2006). El estudio de la deformación de las rocas es la esencia de la geología estructural y de los mecanismos que llevaron a dicha formación.

La geología estructural, estudia la configuración geométrica de rocas, relacionando su distribución y deformación de estructuras geológicas que fueron creadas durante la deformación de la roca (Fossen, 2010). La deformación es una respuesta a un esfuerzo asociado con el movimiento de la tectónica de las placas. Esto muestra que existe una relación estrecha entre la tectónica de placas y la formación de estructuras geológicas (Davis *et al.*, 2012).

Una estructura geológica va a estar expuesta entonces a deformación producida por el movimiento de las placas como por procesos externos como intrusiones, flujos, etc. Cada una de estas causas, generará un estilo tectónico (Fossen, 2010).

Se puede discriminar varios estilos tectónicos, entre estos estilos encontramos; la tectónica de gravedad, la tectónica de placas, la neotectónica, etc

La tectónica de gravedad está definida como el deslizamiento de grandes porciones de rocas y sedimentos provenientes de depósitos de márgenes continentales que suelen generar capas sobre-presionadas (Fossen, 2010). Estos deslizamientos se generan a través de corrientes de turbidez, las que son definidas como flujos o corrientes de gravedad de sedimentos hacia el lecho marino. Estas corrientes pueden ser generadas por movimientos

sísmicos, descargas fluviales, erupciones volcánicas, etc. Y pueden ser transportadas a través de cañones submarinos, estos son, valles submarinos profundos y estrechos que se forman por la erosión en el talud continental (Kneller & Bucke, 2000). El depósito resultante de una corriente de turbidez, se denomina turbidita.

Adicionalmente, muchos sistemas de turbiditas están asociados a ríos, en donde la crecida de sistemas de turbiditas ocurren cuando sistemas fluviales descargan directamente en el margen continental (Kneller & Bucke, 2000).

La neotectónica, se relaciona con el movimiento reciente y en marcha de la corteza. Un ejemplo de estructuras neotectónicas son las formas de fallas y escarpes (Fossen, 2010). Estas últimas, las fallas, aparecen en zonas complejas de deformación, que consisten en múltiples superficies que se han deslizado, fracturado, etc.

Una discontinuidad, está definida como desplazamientos paralelos, dominados por mecanismos de deformación, denominadas fallas. Estas fallas pueden crecer por la creación de un proceso complejo con numerosas fracturas pequeñas. Cuando existe una serie de fallas subparalelas o deslizamientos superficiales muy cercanos unos a otros, se define el término zona de fallas. El ancho de esta zona dependerá de la escala de observación (Fossen, 2010). En particular, las fallas del tipo transcurrentes, desplazan a las rocas lateralmente, volviéndose más continuas a lo largo de una zona de deslizamiento ya existente, es decir, en zonas donde se encuentran dorsales oceánicas o subducción de las placas (Fossen, 2010).

En particular el margen continental chileno, el cual se extiende a lo largo del segmento suroccidental de Sudamérica, se puede dividir en **tres** segmentos según la tectónica de placas. El primero desde Arica hasta la Península de Taitao. El segundo desde allí hasta la boca occidental del estrecho de Magallanes y el tercero desde allí hasta el Cabo de Hornos (Díaz, 2010).

Este corresponde a un margen activo, caracterizado por una serie de factores geológicos, relacionados entre sí, como la deformación activa, magmatismo, engrosamiento cortical, formación de minerales metalogénicos y la liberación de más del 90% de energía sísmica global en márgenes convergentes. Esta conjunción de factores hace que el borde de placa pueda ser considerado como un importante laboratorio natural, que puede ser estudiado en varias escalas (Oncken *et al.*, 2006).

En la zona sur de Chile, en donde la placa de Nazca subducta bajo la placa Sudamericana, se puede reconocer la presencia de una serie de cuencas sedimentarias y cañones submarinos que bajan hasta la fosa y cortan un prisma de acreción. Esta parte de la fosa recibe aportes de sedimentos transportados por corrientes de turbidez que se desplazan por los cañones submarinos, los cuales alcanzan espesores de más de 2.000 metros (Díaz, 2010).

Para el estudio de estructuras geológicas que se encuentran en el subsuelo marino se utiliza un gran número de métodos, los cuales, alguno de los cuales, entregan una imagen de estructuras que están bajo profundidades de miles de metros. Uno de estos métodos es la sísmica de reflexión. Este método, se basa en controlar los tiempos de llegada de ondas acústicas producidas artificialmente por alguna fuente (por ejemplo, cañones de aire) que viajan a través del agua al fondo marino. Al cambiar de medio (de líquido a sólido) generan un eco cuando chocan con el fondo marino u otra discontinuidad litológica, es decir, se genera una onda reflejada; la cual retorna a la superficie, en donde es captada por transductores de sonidos, llamados hidrófonos, que transforman la señal acústica en señal eléctrica, que se disponen a lo largo de un cable registrador, llamado “streamer”.

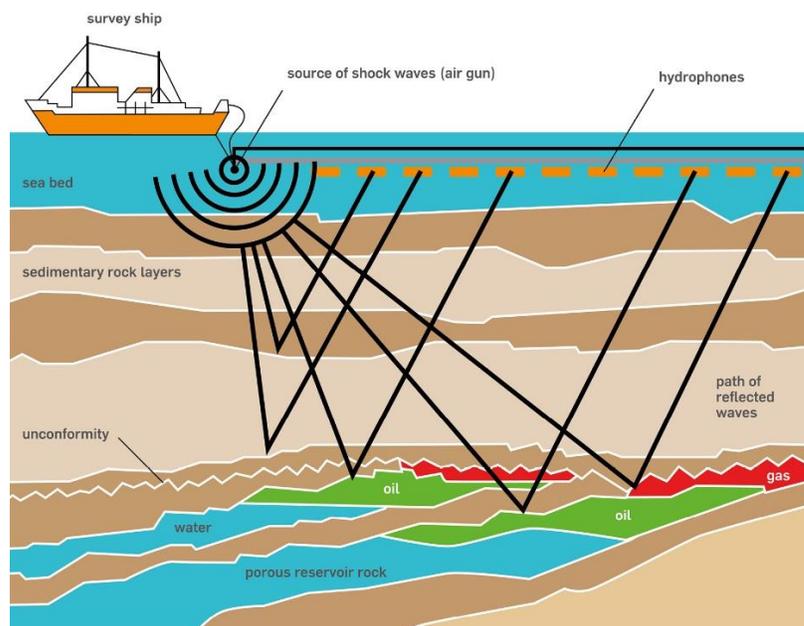


Figura 1: Instrumentos usado en sísmica de reflexión marina: buque con equipo registrador, cañones de aire y “streamer” con hidrófonos.

El presente trabajo de titulación aborda el estudio de reflexión sísmica, en particular la línea MC43, posicionada, frente a Chiloé, junto al cañón submarino de Cucao, en la fosa de Chile. Esta línea sísmica fue adquirida en el marco del proyecto CEVICHE (The Crustal Examination from Valdivia to Illapel to Characterize Huge Earthquake), a bordo del R/V Marcus Langseth entre enero y febrero del año 2017. Donde se trabajó para producir imágenes de la estructura interna del margen continental frente a las costas centro-sur de Chile, desde la región de Illapel (31°S) hasta la región de los Lagos (42°S), en un segmento de 1.400 km de largo; con el fin de caracterizar el contacto Inter placa, en la zona de subducción, donde los mecanismos focales de los terremotos ocurren, pudiendo provocar movimientos telúricos de grandes magnitudes.

La importancia de este segmento y, por tanto, el objetivo del estudio, es entender mejor, las características del contacto inter-placa-, en la zona de subducción (“la zona sismogénica”), donde los mecanismos focales de los terremotos ocurren, pudiendo provocar sismos de gran magnitud. Este segmento, desde Illapel hasta la península de Taitao, ha

presentado importantes terremotos, los cuales se conocen como Illapel (2015), Maule (2010) y Valdivia (1960). En particular los objetivos del proyecto CEVICHE fueron:

- 1) Examinar los factores geológicos que controlan el comportamiento del deslizamiento de los grandes terremotos.
- 2) Descifrar la huella que dejan los diferentes comportamientos de deslizamiento en el registro geológico.
- 3) Analizar como interactúa el lecho marino rugoso y el sedimento superpuesto para controlar la partición entre la acumulación de sedimento en la subducción, y como se desarrollan los procesos en el límite de la placa a profundidades de unos 10 km, debajo del ante-arco.
- 4) Adquirir nuevos datos sísmicos que logren penetrar muy profundo, para examinar la evolución del empuje que existe en la subducción en el centro-sur de Chile, desde la fosa profunda en las zonas sismogénicas.
- 5) Hacer un mapeo de los cambios de estructuras y propiedades físicas, a lo largo de la historia, en el segmento de la zona de subducción, abarcando las superficies de rupturas de los terremotos de 1960,2010,2015 y 2016.
- 6) Examinar directamente la amplia gama de comportamientos en los deslizamientos de los terremotos.

Con el procesamiento y análisis de la línea MC43, se espera, observará las estructuras presentes en la zona y la relación entre ellas. Esto es interesante ya que la zona estudiada, presenta gran actividad sísmica; deformación de estructuras geológicas; y movimiento de capas sedimentarias generadas por corrientes de turbidez que vienen desde el continente, a través del cañón submarino.

HIPÓTESIS

Las capas de turbiditas que rellenan la fosa estaría cortada por fallas transcurrentes con rumbo paralelo al margen, y con un buzamiento muy grande; en algunos casos cercanos a la vertical. Esto implica que en este sector una componente de primer orden de la tectónica correspondería a esfuerzos paralelos al margen, comparables a los esfuerzos compresionales propios de esta zona de subducción.

OBJETIVOS

Objetivo General

Analizar y establecer relaciones en la deformación de estructuras geológicas en la fosa y talud continental inferior, junto al cañón submarino de Cucao frente a la Isla de Chiloé.

Objetivos Específicos

1. Caracterizar las unidades geológicas y rasgos geomorfológicos presentes en la fosa y talud continental inferior junto al cañón submarino de Cucao, tales como estratos, basamento, y morfología del fondo marino.
2. Caracterizar las deformaciones (principalmente fallas y pliegues) que han afectado a las unidades geológicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos analizados en el presente trabajo de titulación, corresponden a la línea MC43 del proyecto “CEVICHE”.

Zona de Estudio

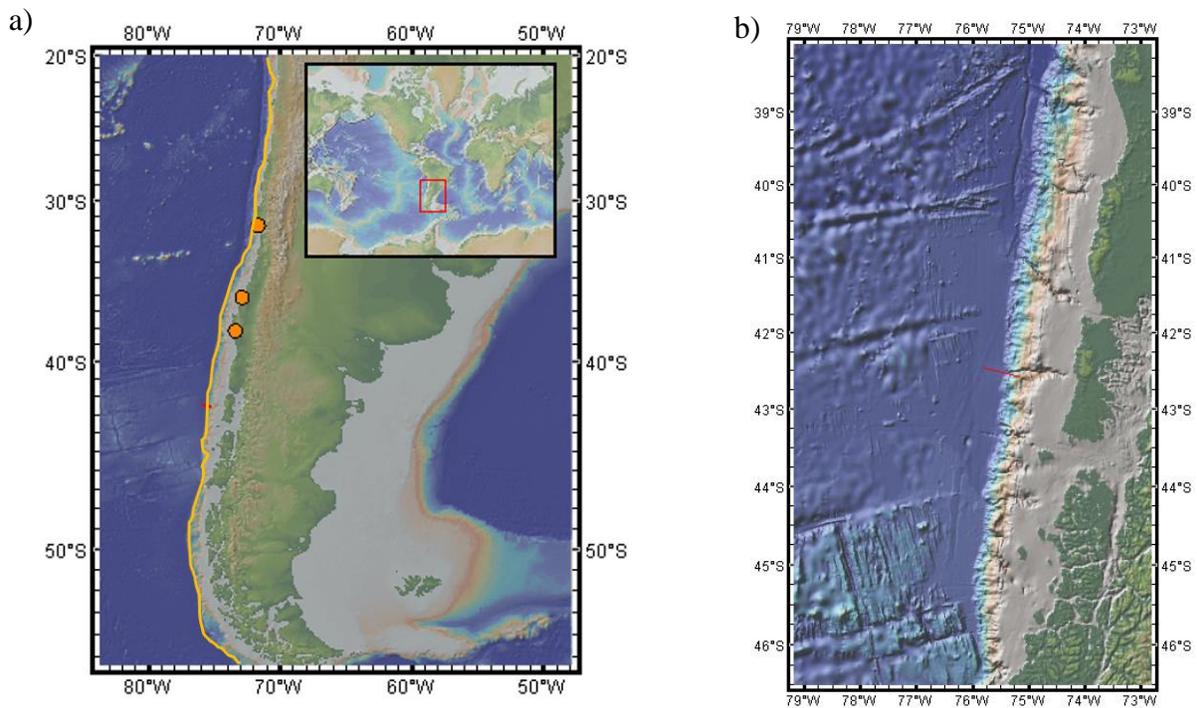


Figura 2: a) Mapa de Chile. Puntos naranjos, de arriba hacia abajo, muestran la zona del epicentro de los terremotos de Illapel 2015, Maule 2010 y Valdivia 1960, respectivamente. La línea amarilla representa la fosa chilena y la línea roja la zona de estudio. b) Mapa regional. Muestra la línea sísmica MC43, frente a la isla de Chiloé, junto al cañón de Cucao entre los $42^{\circ} 27' 14,731''$ S, $75^{\circ} 47' 47,133''$ W y los $42^{\circ} 34' 45,528''$ S, $75^{\circ} 09' 25,407''$ W. Estas figuras se generaron con el software GeoMapApp.

Estos datos fueron procesados con el software Seismic Unix (SU, <http://www.cwp.mines.edu/cwpcodes/>).

Para la transformación de los datos en imagen se realizaron una serie de pasos. Esto se logró a través de un tratamiento de las series de datos temporales, obtenidos en la reflexión de las ondas en función del tiempo.

Estos procesos son:

- Preprocesamiento de los datos sísmicos: Transformación de formato SEG-D a SU
- Ordenamiento de los datos de “shot gathers” en “CMP gathers”.
- Análisis de velocidad.
- Aplicación de corrección por Normal Moveout (NMO).
- Stacking.
- Migración poststack, en el tiempo

Para comenzar, se efectuó un preprocesamiento de los datos de campo, los cuales se entregaron en formato SEG-D y fueron transformados a formato SU (Seismic Unix) a través de un script que definió las distancias entre los hidrófonos, la ubicación del primer disparo, la distancia entre disparos y la distancia entre el disparo y el primer hidrófono.

Luego se continuó con el reordenamiento de las trazas sísmicas de shot gathers en CMP gathers, conjunto definido como “punto medio común”. Es decir, son los puntos a medio camino, entre la fuente (cañones de aire) y los receptores (hidrófonos), los que son compartidos por numerosos pares de fuente-receptor (Onajite, 2014).

El siguiente paso consistió en el análisis de velocidades de las ondas de sonido a través de las capas sedimentarias. En particular, el análisis de velocidades determinó la velocidad que aplanaba las hipérbolas de reflexión antes de apilar los CMP.

En el análisis de velocidad se seleccionaron velocidades de ondas sísmicas, a partir de un panel que relaciona la velocidad con el tiempo de ida y vuelta si la distancia fuente-receptor fuese igual a cero. Los valores seleccionados corresponden a aquellos puntos donde el valor de la semblanza (especie de espectro de velocidad) alcanza máximos de amplitud (Figura 3).

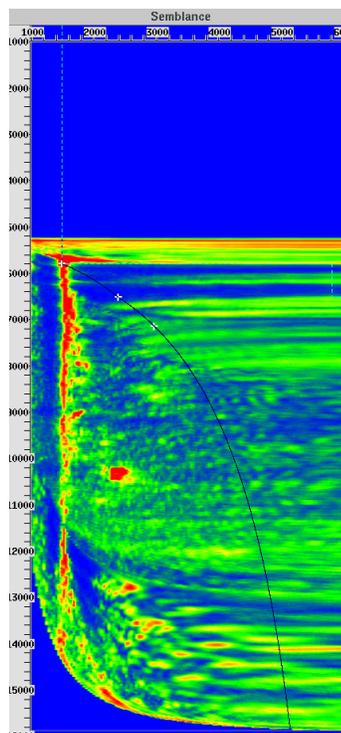


Figura 3 : Ejemplo de la función de semblanza (“espectro de velocidad”) en función de la velocidad de stack y del tiempo de ida y vuelta para la distancia fuente receptor igual a cero(t_0). Los valores de semblanza altos están codificados en el color rojo; los valores intermedios, en verde y los valores bajos, en azul.

Luego, a lo largo de la sección sísmica y en profundidad (tiempo de ida y vuelta) las velocidades se interpolaron linealmente de un lugar del análisis a otro (Onajite, 2014).

A continuación, se corrigieron los datos de cada CMP gather por el correspondiente “normal moveout” (NMO) y luego se apilaron (“stacking”). Es decir, para cada conjunto de CMP, su curva hiperbólica se elimina y las reflexiones aplanadas resultantes se suman o promedian (o apilan) para crear una única traza en cada CMP (Figura 4).

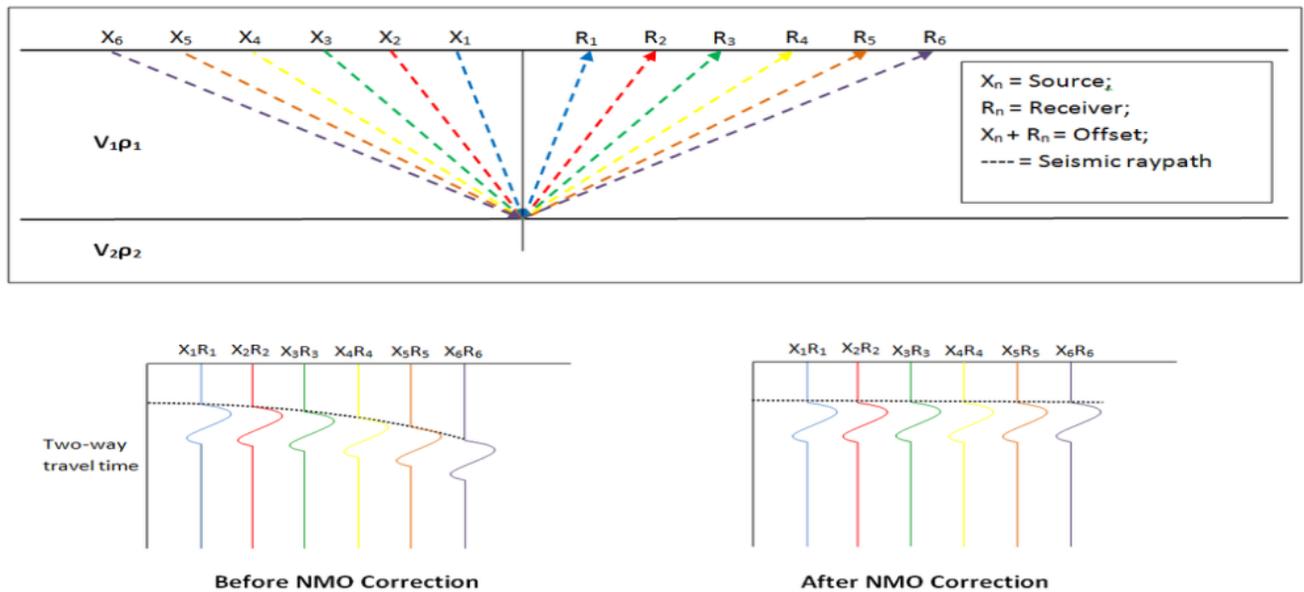


Figura 4: Imagen de los datos sísmicos ordenados en CMP y luego corregidos por NMO.

Al disponer todas las trazas apiladas una junto a la otra, se produce una primera versión de la imagen sísmica, la cual ya muestra una primera aproximación de las estructuras geológicas de debajo del fondo marino. Además, en las trazas sísmicas apiladas el ruido incoherente (aleatorio) se ha atenuado significativamente, logrando que la imagen sísmica tenga más definición. Adicionalmente, el apilamiento permite atenuar el ruido sísmico coherente correspondiente a múltiplos del fondo marino.

El último paso correspondió a la migración (poststack, en tiempo) que consiste en corregir los puntos de reflexión. Todos los pasos anteriormente mencionados explican cómo posicionar correctamente las fuentes y receptores en un punto medio de los cuales se conoce su tiempo de reflexión, no así sus verdaderos puntos de reflexión, ya que las reflexiones se trazan en una sección sísmica no migrada, en un lugar “equivocado”. Por ello, para trasladarlas a su punto de reflexión correcto, se necesita moverlas a lo largo de la curva hiperbólica. Es decir, la migración se utiliza para repositonar los datos desde su punto de reflexión aparente hasta su verdadero punto de reflexión, tanto en el espacio como en el tiempo.

Siguiendo los pasos anteriormente señalados, se obtendría una imagen más nítida del subfondo marino la cual muestra las diferentes estructuras geológicas y sedimentarias que se encuentran en la zona (Figura 5).

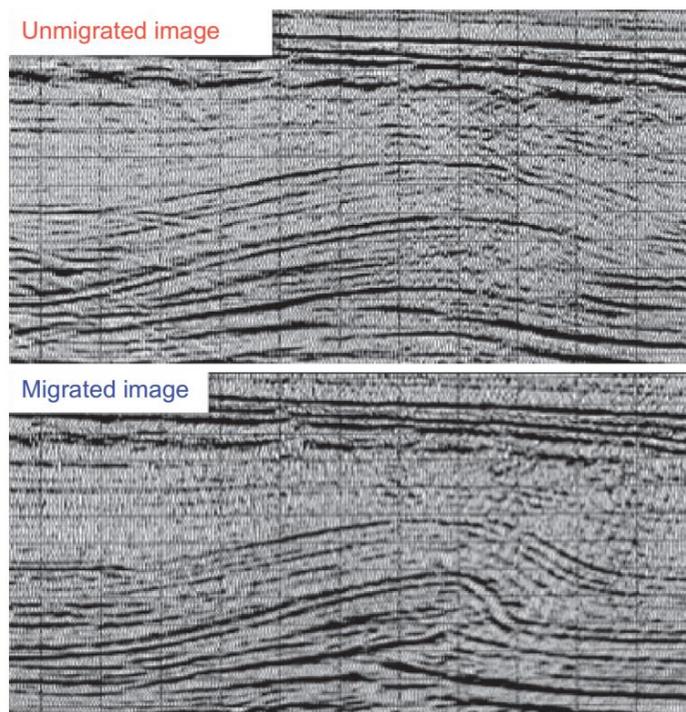


Figura 5: Comparación entre una imagen sísmica producida por el apilamiento o “stacking” (“Unmigrated image”) y la imagen producida por la migración (“Migrated image”). (Imagen de referencia)

A continuación, se procedió a efectuar la interpretación geológica de la imagen sísmica. Para ello se produjo imágenes en formato JPEG y luego se utilizó un software gráfico para trazar los rasgos importantes que muestran dichas imágenes. Lo anterior consistió en el delineamiento sobre la imagen sísmica de (Figura 6):

- el fondo marino
- estratos sedimentarios
- techo del basamento de la corteza oceánica
- “decollement” o falla que separa el contacto entre la placa oceánica subducida y la placa continental suprayacente
- otras fallas
- pliegues
- múltiplos del fondo marino
- otros.

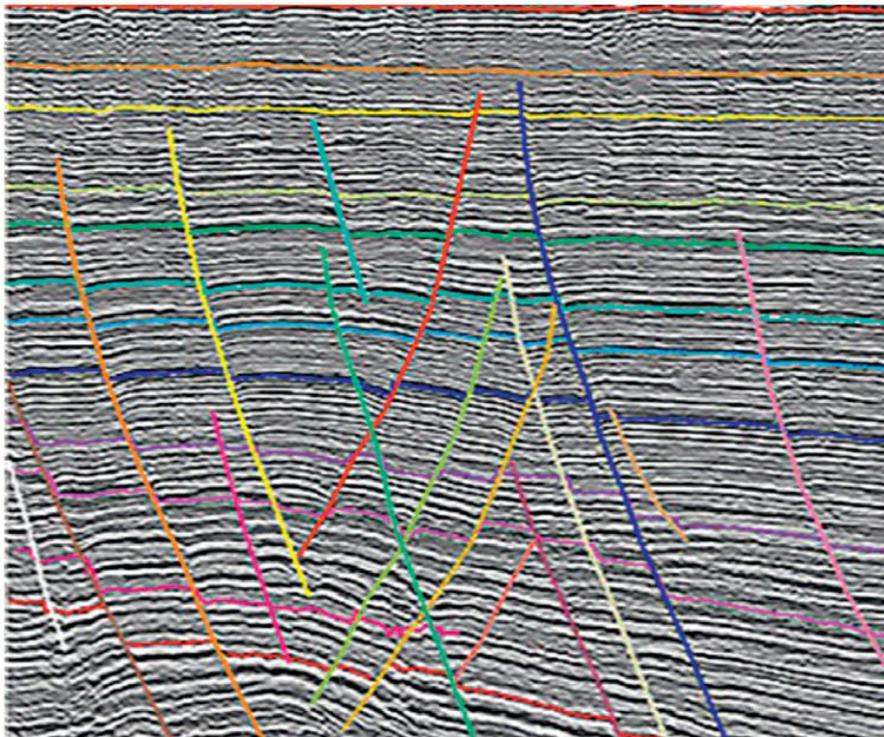


Figura 6: Imagen sísmica migrada, a la cual se le han delineado los estratos y las fallas. (Imagen de referencia)

Posteriormente se procedió a la medición de las estructuras geológicas, tanto en la horizontal, como en la vertical. En particular, se midieron las profundidades de las bases y techos de las unidades geológicas, los espesores de los mismos y los ángulos de inclinación de estratos, fallas y pliegues, entre otros (Figura 7).

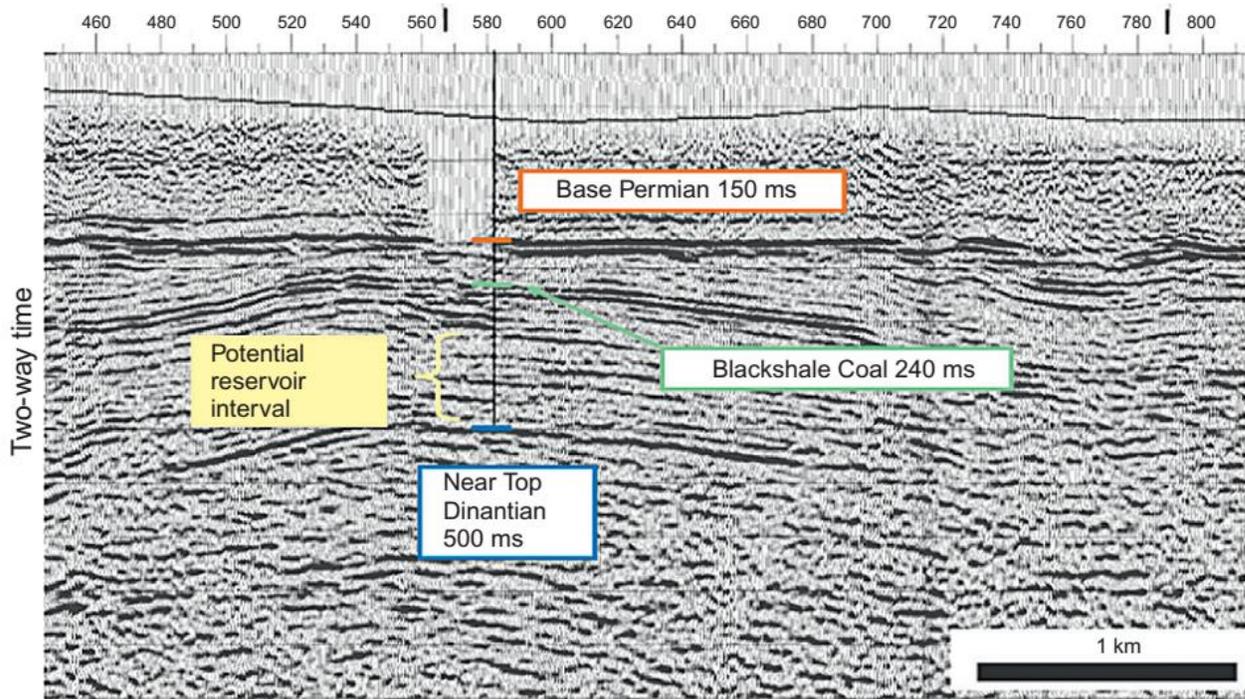


Figura 7: Ubicación profundidad de las diversas reflexiones.

RESULTADOS

Las imágenes que se muestran a continuación fueron procesadas con el software Seismic Unix, creando las imágenes finales luego de la migración.

En adelante se referirá a la posición horizontal y distancia en base a los CMP y a la profundidad como segundos, entendiéndose que se trata del tiempo de ida y vuelta (TTW) que se pueden apreciar en todas las figuras referentes a la MC43.

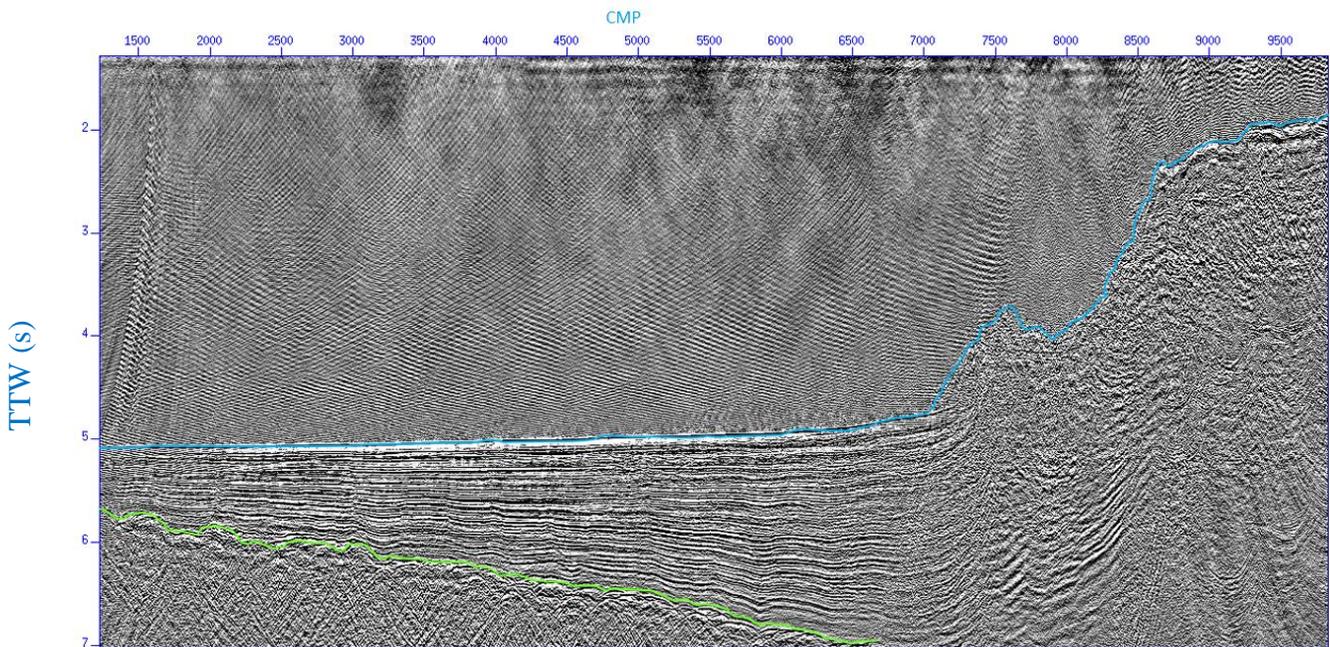


Figura 8: Perfil sísmico entre los 1000 y 9500 CMPs, luego de la migración. Línea azul representa el fondo marino y la línea verde el basamento.

La Figura 8 muestra el perfil sísmico, frente a la isla de Chiloé, pasando por el cañón de Cucao, el cual tiene un largo de ± 59 kilómetros. A la derecha el Este, incluyendo al continente y a la izquierda el Oeste, incluyendo la placa oceánica.

La línea azul en el perfil sísmico representa el fondo marino, el cual en el CMP 1500 aproximadamente comienza a los de 5 s y desde el CMP 7000 en adelante el tiempo fluctúan desde 3,8 s hasta los 2,0 s aproximadamente. El fondo marino presenta una pendiente de $0,087 \text{ (s km}^{-1}\text{)}$. Todo sobre la línea azul es el océano.

La línea verde, representada en el perfil sísmico, delimita el comienzo del basamento en los 5,6 s en el CMP 1000 y 7 s en el CMP 6500, obteniendo un ancho promedio entre el basamento y el fondo marino de aproximadamente 1 s. El basamento presenta una pendiente aproximada de $0,041 \text{ (s km}^{-1}\text{)}$.

Entre el fondo marino (línea azul) y el basamento (línea verde) se encuentra la acumulación de estratos sedimentarios que se extienden desde el CMP 7000 hasta el CMP 1500 (34,3 km).

A continuación, las siguientes imágenes son extractos aumentados de la imagen anterior, las que muestran de mejor forma las estructuras que se encuentran en el perfil sísmico.

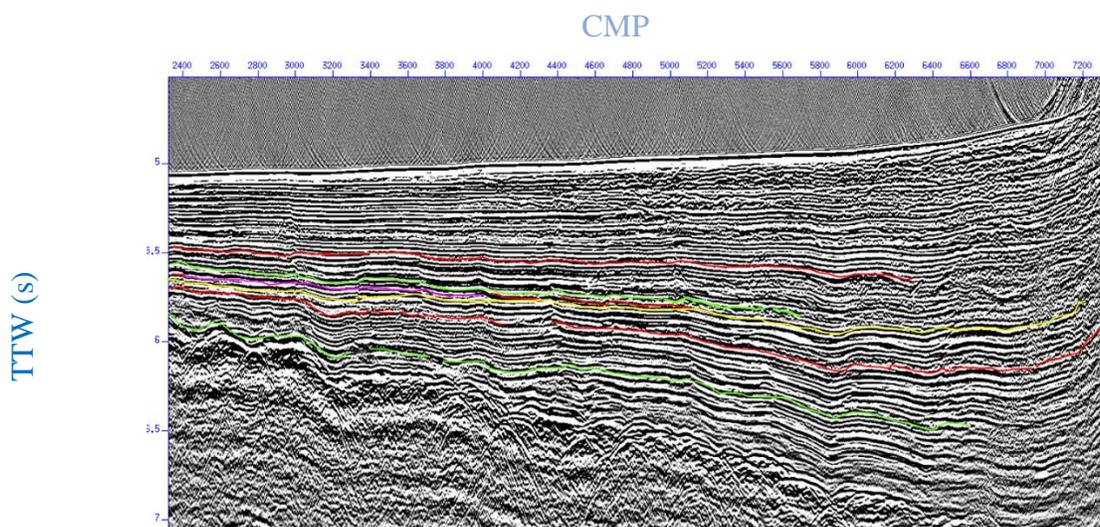


Figura 9: Sección del perfil sísmico entre los 2400 y 7200 CMP

Este perfil sísmico muestra en colores variados los reflectores de las capas sedimentarias, desde los 5 (s) a los 7(s), se ve que la primera línea roja, el reflector va desde el CMP 2400 al 6200 (23,7 km) y tiene una pendiente de 0,008 (s/km). El siguiente reflector representado en color verde empieza en el CMP 2400 y se extiende hasta el CMP 5500 (19,37 km), con una pendiente de 0,005 (s km⁻¹). El reflector amarillo tiene un largo que se extiende entre los CMP 2400 y 7200 (30 km) y una pendiente de 0,010 (s km⁻¹). El segundo reflector rojo comienza en el CMP 2400 y termina en el CMP 7400 (31,25 km) con una pendiente de 0,007 (s km⁻¹). Y el último reflector verde va desde el CMP 2400 al 6800 (27,5 km) y su pendiente es de 0,016 (s km⁻¹). Este último es el que tiene la mayor pendiente.

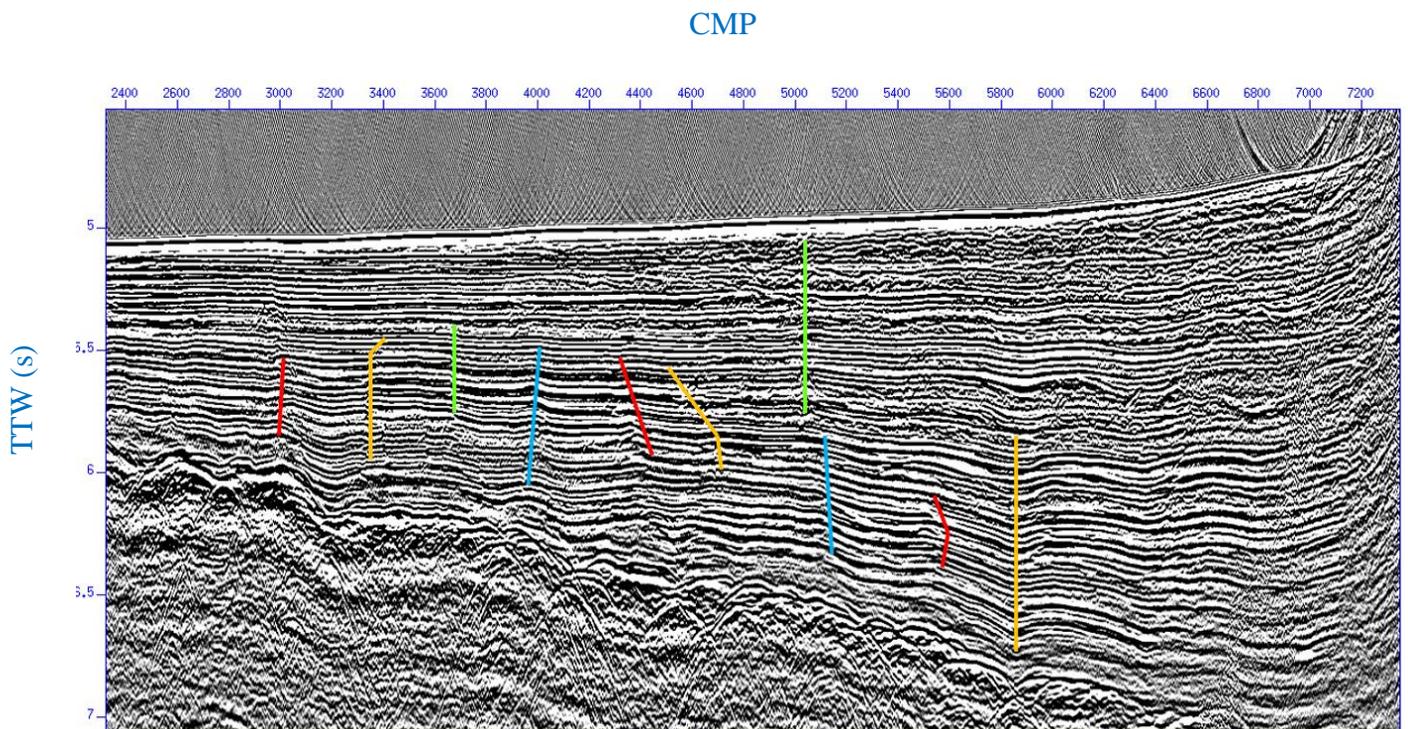


Figura 10: Sección del perfil sísmico entre los 2400 y 7200 CMP

La siguiente sección del perfil sísmico muestra en líneas de color amarillo fallas a lo largo de la sección entre los CMP 3000 y 6500 (21,87 km). Se observa que la mayoría de

estas fallas presentan un buzamiento muy grande, con rumbo aparente paralelo al margen. Y dos fallas inversas, una de las cuales están entre los CMP 4400 y 4600. En promedio, las fallas miden entre 0,3 s y 0,7 s de altura.

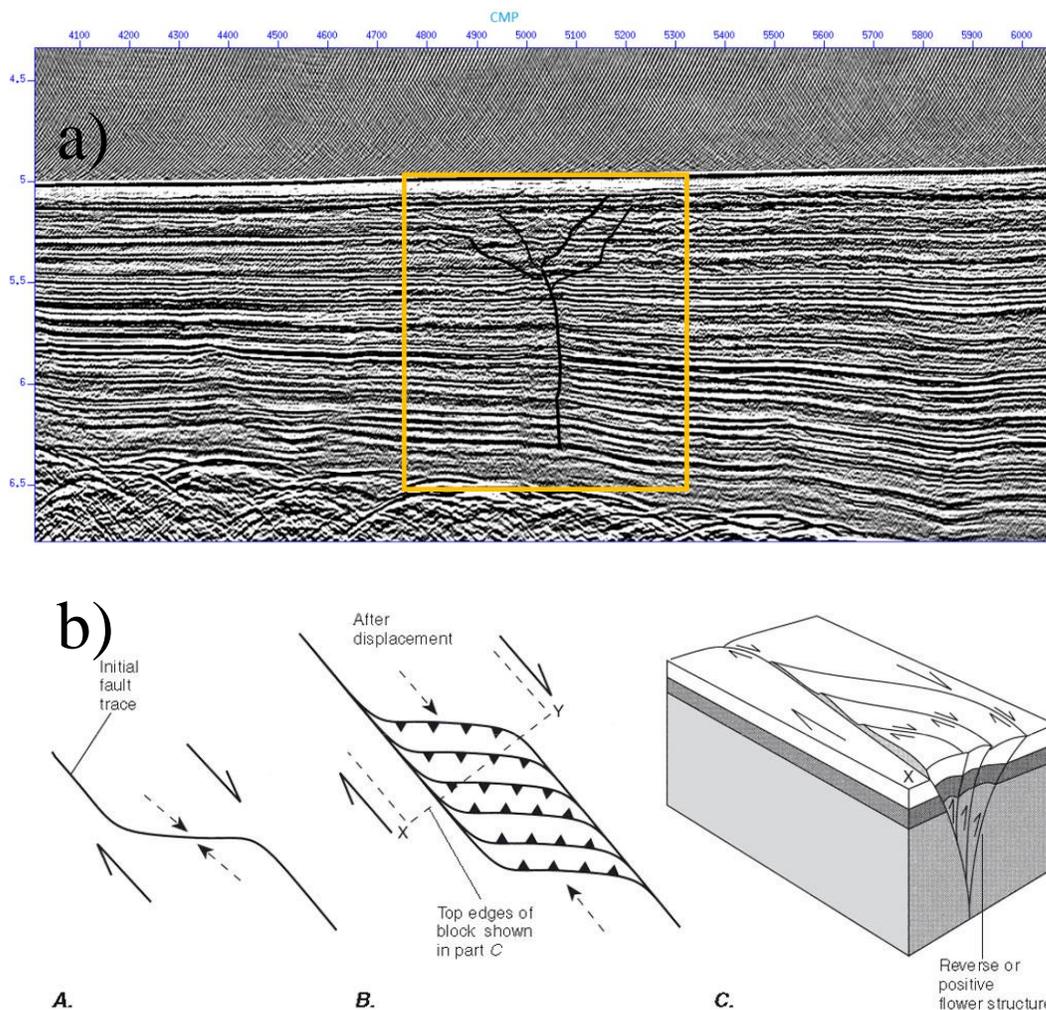


Figura 11: a) Sección sísmica desde los CMP 4500 a 6000 CMP, b) diagrama en bloque de una estructura en flor positiva (imagen obtenida de Moores (2007)).

En la figura 11a se muestra una sección del perfil en donde se observa, dentro del recuadro amarillo y demarcado con líneas negras, lo que correspondería a una estructura en flor positiva. Y la figura 11b es un esquema de una estructura en flor positiva.

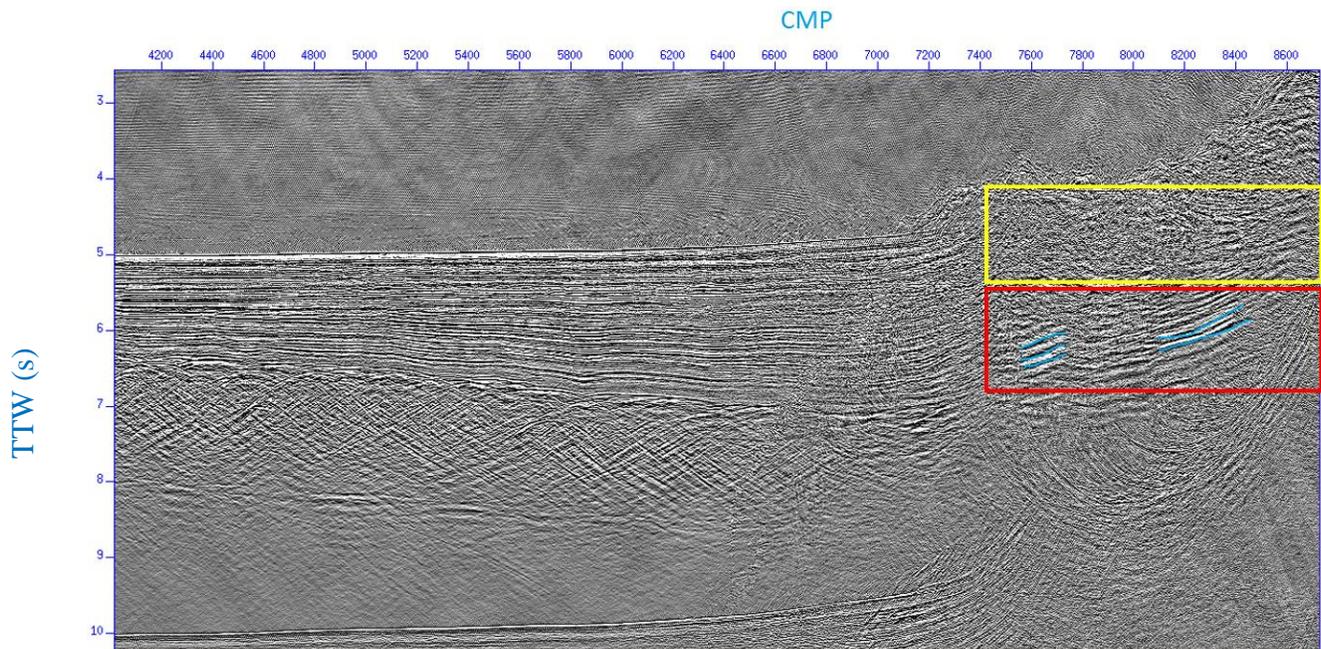


Figura 12: Sección sísmica entre los 4200 y 8600 CMP

La siguiente sección sísmica, muestra un rectángulo amarillo en el cual está contenida la zona donde se encuentra el prisma de acreción, entre los CMP 7400 y 9000 (10 km) con una altura de 1 s aproximadamente. El rectángulo rojo representa lo que podría ser sedimento entrando en subducción, entre los CMP 7400 y 9000 con una altura de 1 s aproximadamente. La zona demarcada por el rectángulo amarillo podría ser la placa superior de la subducción.

Las líneas celestes que son muy parecidas entre sí, se encuentran dentro de la zona en donde el sedimento entra en subducción (rectángulo rojo) se deben a múltiplos provocado por la refracción de la onda.

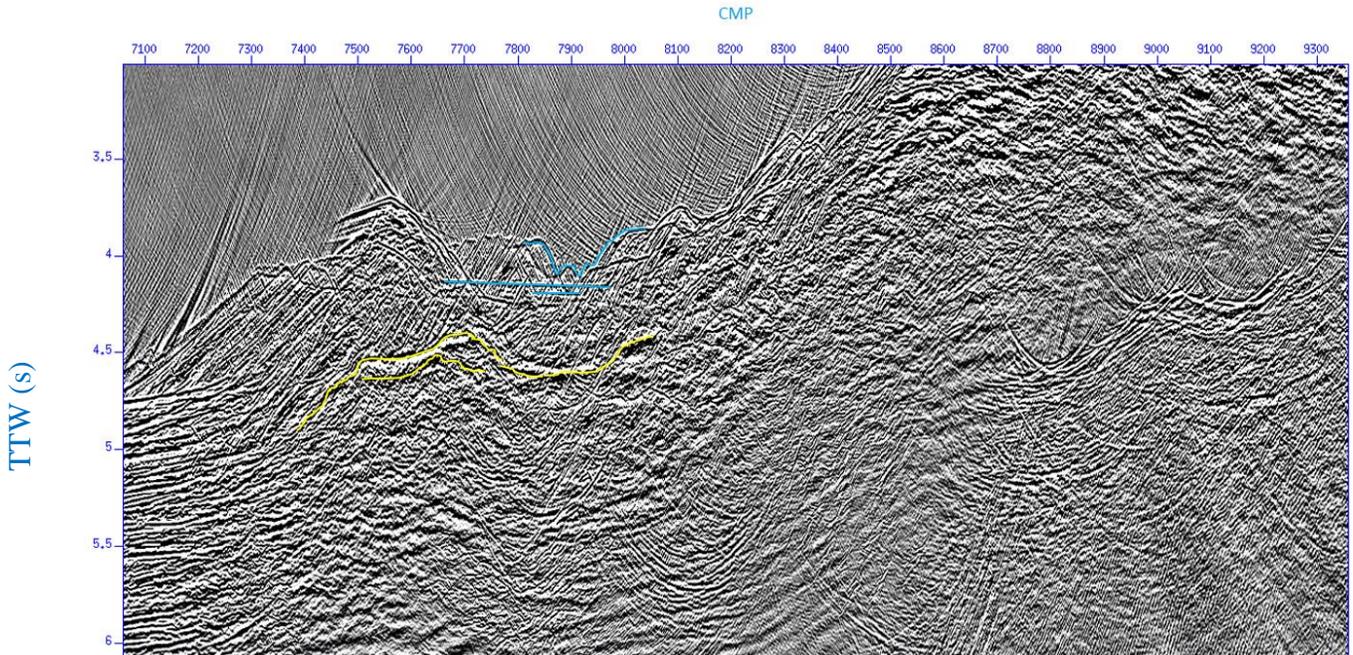


Figura 13: Sección sísmica entre los CMP 7000 y 9500.

En esta sección sísmica se observan líneas de color verde, las cuales representan el cañón submarino de Cucao, las líneas rectas verdes podrían representar el fondo de este cañón submarino, ubicado entre los CMP 7600 y 8000 (2,5 km) y a los 4,2 s de profundidad. La pared lateral derecha del cañón tiene una pendiente de $5,3 \times 10^{-1}$ ($s \text{ km}^{-1}$), la pared lateral izquierda es ligeramente más pequeña.

Las líneas amarillas se observa un pliegue en los estratos sedimentarios, ubicada entre los CMP 7300 y 8100 (50 km).

DISCUSIÓN

En la zona centro-Sur de Chile existe un margen convergente provocado por la subducción de la placa oceánica de Nazca con la placa Sudamericana. En este margen se observa la acumulación de sedimento producto de procesos que han operado a lo largo del margen través de la historia de convergencia (Bangs,1997). Tal como muestra la Figura 8, en donde se observa los estratos sedimentarios acumulados a lo largo de tiempo y en donde el material sedimentado puede tener su origen en el continente. Este sedimento viene a través de corrientes de turbidez, las cuales son transportadas a través de sistemas de cañones. Estos unen el margen continental con el fondo a través de canales que serpentean y se ramifican. Y capturan material sedimentario continental, llevándolo a través de corrientes de turbidez hasta la fosa en donde se acumula en capas sedimentarias (Oncken *et al.*, 2006). Según Díaz-Naveas (2010), la fosa en Chile presenta rellenos sedimentarios progresivamente mayores hacia el sur, en donde además la fosa presenta canales distributario desde los 42° S a los 33° S. Así a través de este canal se transportarán sedimentos provenientes de los cañones submarinos (como el que se observa en la Figura 11) hacia el norte. La presencia de una capa sedimentaria gruesa como la que se muestra en la Figura 9 y el sedimento, en forma de cuña que se acumula en la zona de subducción, que se muestra en la Figura 12, según Bangs (2017) puede llevar a un cierto tipo de comportamiento en el deslizamiento entre las placas que están en subducción. Por lo que existiría una correlación directa entre el grosor de la capa sedimentaria y terremotos de grandes magnitudes. Posiblemente debido a que el sedimento que rellena el espacio entre las placas crea una interfaz uniforme y homogénea, es decir una especie de jaboncillo entre las placas, provocando un mayor deslizamiento entre placas provocando un terremoto de gran magnitud como el de Valdivia de 1960. Este terremoto ha sido uno de los eventos sísmicos más energéticos, siendo lo más notable del segmento donde fue el epicentro del terremoto y en donde los datos históricos indican que la zona de subducción de Chile se ha deslizado repetidamente como un segmento coherente de 1000 km de longitud por cada evento conocido en los últimos 440 años (Bang,2017).

La Figura 10, muestra una serie de fallas con grandes buzamientos que podrían corresponder a fallas transcurrentes. La presencia de este tipo de fallas en esta zona se puede deber a que, a lo largo de Chile, nos encontramos con un margen continental convergente oblicuo, en donde la placa de Nazca entra en subducción oblicua (derecha -lateral) con la placa Sudamericana y su ángulo de oblicuidad del vector de la placa convergente respecto de la ortogonal de la normal de la fosa es de aproximadamente 18° para el sur de Chile (Angermann, *et al.*, 1999). En donde la subducción es oblicua, la componente transcurrentes es comúnmente absorbida por un subempuje oblicuo entre placas, si no por fallas transcurrentes (Molnar & Dayem, 2010).

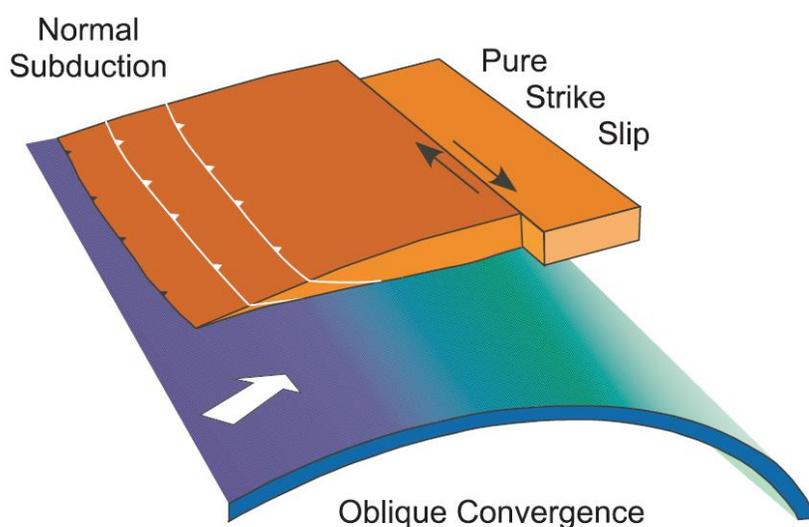


Figura 14: Ilustración de una falla transcurrente en una zona de subducción de un margen convergente oblicuo. De este modo se acomoda la deformación perpendicular y paralela al margen convergente.

Otras de las estructuras encontradas en el presente trabajo, es la representada en la Figura 11, la cual muestra una estructura en flor del tipo positivo, estas estructuras están falladas en sentido ascendente formando una estructura en flor positiva, las que suelen estar presente en márgenes convergentes y en presencia de fallas transcurrentes (Sylvester, 1988).

Lamentablemente, no es posible afirmar que las fallas transcurrentes y la estructura en flor antes descritas, realmente lo sean. Para ello se debería contar con más líneas sísmicas, algo más al norte y al sur de la presente línea MC43, y dispuestas perpendicularmente al frente de deformación.

Lo novedoso de estas posibles fallas transcurrentes y la estructura en flor es que, de ser efectivas, tienen lugar **delante** del frente de deformación (hacia el océano). En circunstancia que todos o la mayoría de los márgenes con convergencia oblicua presentan fallas transcurrentes **detrás** del frente de deformación (hacia tierra firme), estando incluso a varias decenas de kilómetros de distancia por detrás.

CONCLUSIÓN

A través de un estudio de sismica de reflexión en la zona centro-sur de Chile, frente al cañón de Cucao, se pudo observar distintas estructuras geológicas interactuando entre sí. Por ejemplo, nos encontramos con la presencia de un cañón submarino y seguido de este una amplia zona de capas sedimentarias, o también llamadas turbiditas, las cuales se ven cortadas por lo que serían fallas del tipo transcurrente. En un principio no se esperarían que estuvieran localizadas allí. Sin embargo, la presencia de estructuras en flor positiva, que solo se da en presencia de este tipo de fallas, sugiere que el fallamiento observado responde a fallas del tipo transcurrentes.

Sin embargo, los resultados no permiten confirmar ni rechazar la hipótesis acerca del fallamiento transcurrente asociado a la convergencia oblicua.

REFERENCIAS

Angermann, D., Klotz, J., Reigber, C., 1999. Space-geodetic estimation of the Nazca–South America Euler vector. *Earth Planet. Sci. Lett.* 171 (3), 329–334.

Bangs, N (2017). Ceviche cruise report, MGL1701, USA, 59 pp

Bartolomé de la Peña, R. 2002. Evolución tectónica del margen continental oeste de México: Fosa Mesoamericana y golfo de California, Tesis Doctoral, Departamento de Geodinámica y Geofísica de la Universidad de Barcelona, 45pp

Díaz-Naveas, J. 2010. 4.1 Batimetría del margen continental chileno. Díaz-Naveas, J. & J. Frutos (eds). 2010. *Geología Marina de Chile*. Comité Oceanográfico Nacional de Chile - Pontificia Universidad Católica de Valparaíso - Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile, pp. 24-31.

Fossen, H. 2010. *Structural geology*. Cambridge University Press, Cambridge, 463pp.

Kneller, B & C. Buckee. 2000. The structure and fluid mechanics of turbidity currents: a review of some recent studies and their geological implication. *Sedimentology*, 47(1): 62-94.

Niemeyer, H. 1999. Apuntes de geología estructural. Primera parte: Estructuras frágiles. Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, 142pp.

Onajite, E. 2014. Seismic data analysis techniques in hydrocarbon exploration. Elsevier, Amsterdam, 256pp.

Oncken, O., G. Chong, G. Franz, P. Giese, H.-J. Götze, V. Ramos, M. Strecker & P. Wigger (eds.). 2006. The Andes: Active Subduction Orogeny. Springer, Berlin, 568pp.

Molnar, P., Katherine, D. 2010. Major intracontinental strike-slip faults and contrast in lithospheric strength, Geological society of america, V. 6, n° 4, USA, pp. 444-467.

Silvester, A. 1988. Strike-slip faults, Geological society of america, California, v.10, pp 1666-1703

ANEXOS

ANEXO A: TIPOS DE FALLAS

Definición de fallas

Se define como cualquier superficie o zona estrecha rocosa que presenta un desplazamiento formado por un intenso cizallamiento visible a lo largo de una zona que ha sido afectada por una deformación frágil, espacial y genéticamente relacionada con la falla y consistentes con múltiples desplazamientos superficiales, fracturas subsidiarias y a veces bandas de deformación. Las fallas pueden crecer por la acción de fuerzas compresionales o tensionales presentes en la zona, con una serie de pequeñas fracturas, en donde algunas se juntan para formar el desplazamiento, mientras el resto son abandonadas (Fossen,2010).

Fallas de rumbo:

- Fallas transcurrentes

Son aquellas fallas de desgarre, que se originan por una compresión horizontal, que no están limitadas por otras estructuras, y se mueven de modo que la longitud de la falla aumenta a medida que el desplazamiento se acumula, siguiendo una relación de desplazamiento-longitud normal, es decir, su desplazamiento máximo aumenta sistemáticamente con el aumento de la longitud de la falla, en donde el plano de la falla es esencialmente vertical.

- Fallas transformantes

Son fallas de deslizamiento de rumbo oceánica, que transfieren desplazamiento de una falla a otra y define los límites de las placas o las dorsales oceánicas desplazadas. Por lo dicho anteriormente, este tipo de fallas están limitadas y no pueden crecer libremente. Las fallas transformantes, tienen un rango de escala de kilómetros y conectan un amplio rango de estructuras como, por ejemplo, conectan dorsales oceánicas con los límites destructivos de las placas o conectan dos segmentos en límites destructivos entre dos placas.

Fallas de manteo:

- Fallas normales

Son fallas inclinadas de deslizamiento en donde el bloque colgante se ha movido hacia abajo con respecto de un muro base. Generalmente, emplazan rocas más jóvenes encima de rocas más viejas, y en una sección vertical a través de la falla. La mayoría de estas fallas tienen fuertes buzamientos, de aproximadamente 60° , aunque también podemos encontrar como buzamientos más suaves.

- Fallas inversas

Las fallas inversas son el caso opuesto de las fallas normales, es decir, cuando el bloque colgante se ha movido hacia arriba con respecto del muro base.

Fallas oblicuas:

- Fallas transcurrentes – Fallas normales

Son fallas en donde el bloque colgante se ha movido hacia abajo y se han deslizado hacia un lado.

- Fallas transcurrentes – Fallas inversas

Son fallas en donde el bloque colgante se ha movido hacia arriba, además de presentar un deslizamiento hacia el lado.

ANEXO B: CAÑONES SUBMARINOS

Definición de cañón submarino

Los cañones submarinos son un tipo de incisión, barrancos y valles que cortan las laderas continentales y la emersión continental de los océanos. Son sistemas tributarios, estrechos y abruptos con meandros. Estos actúan como conductos que llevan sedimentos a través de corrientes de turbidez, desde los márgenes continentales hasta las profundidades del mar.

Tipos de cañones submarinos

1) Cañón submarino:

Aquí el término cañones submarinos está restringido a los valles sinuosos, de paredes empinadas en forma de V, que se inclinan hacia afuera.

2) Frente- Delta:

La sección transversal tiene forma de U, cursos rectos, algunos o ningún tributario. Y se ubican al frente de algunos grandes deltas.

3) Valles de abanicos:

La continuación hacia el mar de los cañones submarinos y los frente- delta. Los abanicos llegan hasta la base de la pendiente continental. Varios tienen diques limítrofes que se encuentran sobre los abanicos. La mayoría tiene distributario. Las paredes son empinadas y son cortados en abanicos sedimentarios.

4) Barrancos:

Son valles discontinuos de pequeños relieves, con unos pocos tributarios.

5) Valles de fallas:

Valles en forma de canal y piso ancho que sigue una tendencia estructural, tiene casi ningún tributario, pero tiene algunas cuencas profundas.