



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estudio de Una Falla Superficial en el
Cinturón Extensional Quetzalcóatl,
Golfo de México – Usando Datos de
Batimetría Multihaz, Magnetometría
Marina y Perfiles Sísmicos de Alta
Resolución**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Geofísica

P R E S E N T A

Araceli Sánchez Salazar

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Carlos Ángel Q. Mortera Gutiérrez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

RESUMEN

El Golfo de México es un área de sumo interés para la industria petrolera, por lo que desde la mitad del siglo pasado se han estado realizando múltiples estudios exploratorios con metodología de geofísica para conocer las reservas de hidrocarburos en el sector mexicano.

La UNAM ha dedicado el uso de sus buques oceanográficos al estudio de las condiciones físicas del lecho marino en aguas territoriales de México con los sistemas de ecosondeo hidroacústicos multihaz desde 2006. Durante una de las campañas, organizadas por investigadores del grupo de Geofísica Marina en el Instituto de Geofísica, el registro de batimetría multihaz proveyó datos del lineamiento de una gran falla (con una longitud de casi 7 km) que parece cortar la superficie del lecho marino en el quiebre de la plataforma y el talud continental frente a las costas de Veracruz. Las dimensiones de esta estructura despertaron la curiosidad de los científicos a bordo del buque oceanográfico Justo Sierra de estudiar su forma geológica en el margen occidental del Golfo de México, para este objetivo se llevó a cabo un levantamiento sistemático de mediciones multihaz del relieve del lecho, acompañado de la adquisición de secciones de reflexión sísmica de alta resolución y perfiles magnéticos para estudiar las estructuras en su subsuelo.

Este trabajo de investigación analiza los datos adquiridos de batimetría multihaz, perfiles sísmicos de alta resolución y mediciones del campo geomagnético total para conocer la naturaleza de esta estructura que parece ser una falla de desplazamiento de rumbo y ubicarla dentro del marco tectónico de la región. Resultados de este análisis indican que esta falla observada en la superficie es una estructura que solo afecta a la sección sedimentaria del margen. Mientras que los registros magnéticos no presentan una anomalía asociada a la falla, indicando que posiblemente la falla no se extiende hasta el basamento.

ABSTRACT

The Gulf of Mexico is an area of great interest for the oil industry, so since the middle of the last century, there have been multiple exploratory studies using geophysics methodology to know the reserves of hydrocarbons in the Mexican sector.

UNAM has dedicated the use of its oceanographic vessels to the study of the physical conditions of the seabed in territorial waters of Mexico with multi-beam hydroacoustic sounding systems since 2006. During one of the campaigns organized by researchers from the Marine Geophysics group at the Institute of Geophysics, the multibeam bathymetry record provided data of a large surface fault (with a length of almost 7 km) at the break of the continental shelf and the continental slope off the coast of Veracruz. The dimensions of this structure aroused the curiosity of the scientists aboard the oceanographic vessel Justo Sierra to study its geological form on the western margin of the Gulf of Mexico, for this purpose a systematic survey of multibeam measurements of the relief of the seabed was carried out, accompanied by the acquisition of high-resolution seismic reflection sections and magnetic profiles to study the structures in its subsoil.

This research work analyzes the acquired data of multibeam bathymetry, high-resolution seismic profiles and measurements of the total geomagnetic field to know the nature of this structure that seems to be a normal fault and locate it within the tectonic framework of the region. Results of this analysis indicate that this observed fault in the surface is a structure that only affects the sedimentary section of the margin. While the magnetic records do not present an anomaly associated with the fault, indicating that the failure may not extend to the basement.

ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN	3
2.	ANTECEDENTES.....	5
2.1.	Ubicación del área de estudio	5
2.2.	Fisiografía de la Cuenca del Golfo de México	5
2.3.	Marco Geológico y Tectónico	10
3.	METODOLOGÍA	15
3.1.	Campaña y adquisición de datos.....	16
3.1.1.	Batimetría.....	17
3.1.2.	Magnetismo	19
3.1.3.	Perfiles Sísmicos	21
3.2.	Procesamiento.....	24
3.2.1.	Batimetría.....	24
3.2.2.	Datos magnéticos	25
3.2.3.	Perfiles Sísmicos	29
4.	RESULTADOS	32
4.1.	Relieve batimétrico	32
4.2.	Estructuras someras del subsuelo	33
4.3.	Anomalía magnética	40
5.	CONCLUSIONES.....	41
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	42

7. ANEXO A.....	45
Perfil 1.....	45
Perfil 2.....	46
Perfil 3.....	46
Perfil 4.....	47
Perfil 5.....	48
Perfil 6.....	48
Perfil 7.....	49
Perfil 8.....	49
Perfil 9.....	50
Perfil 10.....	51
Perfil 11.....	52
Perfil 12.....	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Ubicación de la zona de estudio.....	5
Figura 2.2. Ubicación y límites estructurales de la Cuenca del Golfo de México	7
Figura 2.3. Mapa batimétrico del Golfo de México y sus principales subprovincias fisiográficas. Modificado de Salvador (1991)	10
Figura 2.4. Ubicación del área de estudio respecto a las provincias geológicas en el margen occidental del Golfo de México. El rectángulo en rojo marca el área de estudio	11
Figura 2.5. Mapa tectónico regional del Cinturón Extensional Quetzalcóatl y Cordilleras Mexicanas en el Golfo de México (Salomón Mora, Aranda García, & Román Ramos, 2009)	13
Figura 2.6. Mapa regional mostrando elementos tectónicos del sur de México. Las líneas negras denotan las fallas principales y flechas negras el movimiento en los límites de placa, Andreani et. al. (2008)	13
Figura 2.7. Deformación transpresional dextral a lo largo del margen occidental del Golfo de México, Le Roy et. al. (2008).....	14
Figura 3.1. Esquema de la metodología empleada en este trabajo de investigación....	15
Figura 3.2. Ubicación del levantamiento.....	16
Figura 3.3. Derrotero del barco en la adquisición de los 12 perfiles. En gris el levantamiento completo, en colores los 12 perfiles	17
Figura 3.4. Ejemplos de funcionamiento de ecosondas monohaz (A) y multihaz (B) (NOAA, 2017)	18
Figura 3.5. Esquema de configuración de la ecosonda EM300 a bordo del buque Justo Sierra (Kongsberg, 2002)	19

Figura 3.6. Magnetómetro Geometrics G877; (a) Partes: Montura, cuerpo (con partes electrónicas), sensor y cable de arrastre; (b) Junction Box; (c) Dimensiones de la configuración del magnetómetro G877: (1) distancia del GPS a la popa, (2) largo del cable desde la popa al magnetómetro, y (3) distancia lateral de GPS al cable de comunicación, (Valle Hernández, 2015).....	20
Figura 3.7. Levantamiento magnético. En rojo la zona de interés.....	21
Figura 3.8. Diagrama de descomposición de un pulso de sonido en un medio acuático	22
Figura 3.9. Funcionamiento de una ecosonda monocanal. En la zona A se pueden observar diferentes estratos que actúan como reflectores y la onda acústica reflejada al receptor relacionada a cada uno de ellos.....	23
Figura 3.10. Corte transversal AB de dos perfiles dentro del área del levantamiento	24
Figura 3.11. Módulo Odicce	25
Figura 3.12. Campo geomagnético total, valores en [nT].....	26
Figura 3.13. Campo geomagnético de referencia IGRF-12 de la zona de estudio, valores en [nT].....	27
Figura 3.14. Cruces usados para el cálculo de la curva de variación diurna.....	28
Figura 3.15. Curva estimada de la variación diurna durante la campaña GMET11.....	29
Figura 3.16. Sección sísmica en TOPAS Replay.....	30
Figura 3.17. Metodología de procesamiento de secciones sísmicas en SonarWiz	31
Figura 3.18. Presentación 3D de los perfiles sísmicos de alta resolución registrados en la zona de estudio	31
Figura 4.1. Relieve batimétrico obtenido	32
Figura 4.2. Representación 3D de las secciones sísmicas interpretadas	33

Figura 4.3. Derrotero de adquisición. En rojo los perfiles a analizar, en azul los puntos de cada perfil en los que se observó la falla de interés	33
Figura 4.4. Sección sísmica del perfil 10	34
Figura 4.5. Recuadro I de la sección sísmica del perfil 10.....	34
Figura 4.6. Recuadro II de la sección sísmica del perfil 10	35
Figura 4.7. Sección sísmica del perfil 5.....	35
Figura 4.8. Recuadro III de la sección sísmica del perfil 5	36
Figura 4.9. Recuadro IV de la sección sísmica del perfil 5	36
Figura 4.10. Recuadro V de la sección sísmica del perfil 5	36
Figura 4.11. Sección sísmica del perfil 4	37
Figura 4.12. Recuadro VII de la sección sísmica del perfil 4	37
Figura 4.13. Recuadro VIII de la sección sísmica del perfil 4.....	38
Figura 4.14. Recuadro VI de la sección sísmica del perfil 4.....	38
Figura 4.15. Sección sísmica del perfil 9	38
Figura 4.16. Sección sísmica del perfil 11	39
Figura 4.17. Recuadro IX de la sección sísmica del perfil 11	39
Figura 4.18. Interpolación de la anomalía magnética de la zona de interés, valores en [nT]. En negro el lineamiento de la falla.	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de adquisición de los perfiles sísmicos de alta resolución obtenidos en la campaña GMET2011	24
---	----

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ingeniería de la UNAM por los años de formación.

A mi asesor y mentor el Dr. Carlos Ángel Q. Mortera Gutiérrez, quien me ofreció siempre sus palabras de ánimo y me mostró lo fascinante que es la geofísica marina.

Gracias a mis amorosos padres por su apoyo incondicional y por siempre confiar en mí y mi capacidad.

A mis hermanas por acompañarme de principio a fin y escucharme cuando lo necesité.

Al M.C. Victor Manuel Ramón, gracias por tomarte el tiempo y echarle un vistazo a esta tesis y por tus comentarios siempre atinados.

Al Ing. Francisco Ponce por sus consejos, enseñanzas y apoyo durante mi formación como ingeniera geofísica y durante los arduos meses de trabajo.

Al M.C. Daniel Pérez Calderón por su ayuda técnica, sus enseñanzas a bordo de los buques de la UNAM.

Al Dr. William Bandy por su disposición para ayudarme a resolver algunas dudas.

A la Ing. Tania por su disposición y el tiempo que se tomó para ayudarme a concluir este proceso de titulación.

Al M.C. Diego Aguilar por su apoyo y recomendaciones.

A la Ing. Carmen Millán por sus palabras de ánimo.

Y a mis compañeros del grupo de Geofísica Marina por hacer siempre más llevaderas las horas de trabajo.

DEDICATORIA

A mi familia

1. INTRODUCCIÓN

La Cuenca del Golfo de México es una cuenca estructural semicerrada conectada al Océano Atlántico por el estrecho de Florida y el canal de Yucatán, teniendo la Isla de Cuba entre ambos canales. Geológicamente, el Golfo de México es una cuenca sedimentaria cuyo lecho marino está conformado al oriente por plataformas de carbonatos y al oeste por la acumulación de grandes volúmenes de sedimentos detríticos.

El proceso de apertura de la Cuenca del Golfo de México se dio durante el Jurásico con el movimiento hacia el sur del bloque de Yucatán a través de un margen transformante que coincide con el quiebre entre la plataforma y el talud continental del margen oriental de México (Moore & del Castillo, 1974), este límite ha servido también como separación entre las provincias fisiográficas, geológicas, tectónicas y petroleras ubicadas dentro de la cuenca .

Una de las principales estructuras en las regiones de la plataforma y el talud continental en el margen occidental del Golfo de México es el sistema extensional presente en la plataforma continental, caracterizadas por fallas normales, fallas lítricas y fallas por gravedad; mientras que el talud continental es una zona de compresión, caracterizada por plegamientos como las Cordilleras Mexicanas.

En octubre de 2011, el grupo de geofísica marina llevó a cabo la campaña oceanográfica GMET2011 a bordo del B/O Justo Sierra, con el objetivo de adquirir datos de batimetría y magnetismo para un estudio del gradiente térmico a lo largo de un perfil transversal que cruzó el sector sur del Golfo de México, desde su margen occidental del sur de Veracruz hasta la plataforma carbonatada de Campeche. Al inicio de este perfil, el barrido lateral de la ecosonda multihaz evidenció en el relieve del lecho marino una estructura parecida a una falla entre los límites de la plataforma y el talud continental frente a las costas de Veracruz.

El enfoque de este trabajo de investigación es de analizar los datos hidroacústicos del relieve y subsuelo en asociación a los registros magnéticos para determinar si esta estructura corresponde a una falla que pudiese cortar las capas sedimentarias someras o penetrar hasta el basamento de este margen. Para este análisis, datos de

batimetría adquiridos con una ecosonda multihaz (EM300 de Kongsberg), perfiles sísmicos de alta resolución registrados con una ecosonda de penetración (TOPAS PS18 de Kongsberg) y datos de geomagnetismo medidos con un magnetómetro marino (G877 de Geometrics) durante la campaña GMET2011 son procesados para obtener una carta batimétrica del relieve del lecho marino, secciones sísmicas del subsuelo y la anomalía magnética del área de estudio y en su conjunto definir qué tipo de estructura se observó.

2. ANTECEDENTES

2.1. Ubicación del área de estudio

El área de estudio está ubicada en la Cuenca del Golfo de México a 30 km al oriente de las costas de Veracruz, entre los municipios Nautla y Vega de Alatorre y entre las latitudes $20^{\circ}18'N$ y $20^{\circ}13'50''N$ y las longitudes $96^{\circ}28'30''W$ y $96^{\circ}18'30''$ cubriendo un área de aproximadamente 110 km^2 en el quiebre de la plataforma y el talud continental, dentro de la provincia tectónica Cinturón Extensional Quetzalcóatl [Figura 2.1].

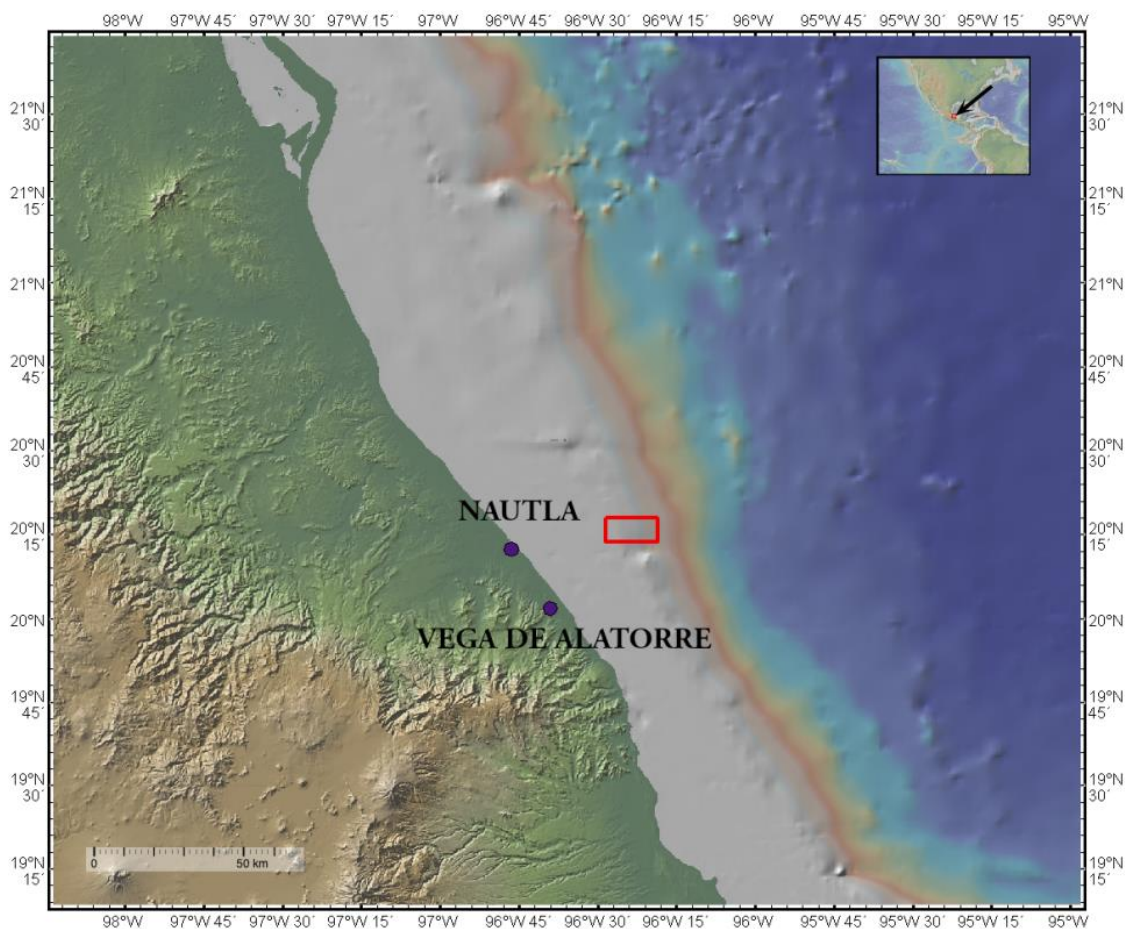


Figura 2.1. Ubicación de la zona de estudio

2.2. Fisiografía de la Cuenca del Golfo de México

La cuenca del Golfo de México es una cuenca estructural circular de aproximadamente $1,500 \text{ km}$ de diámetro y un área de 2.7 millones km^2 , rellena con depósitos sedimentarios entre 10 a 15 km desde el Triásico tardío [Figura 2.2]. El sector norte de la cuenca es zona económica de los EE. UU., mientras que el sector

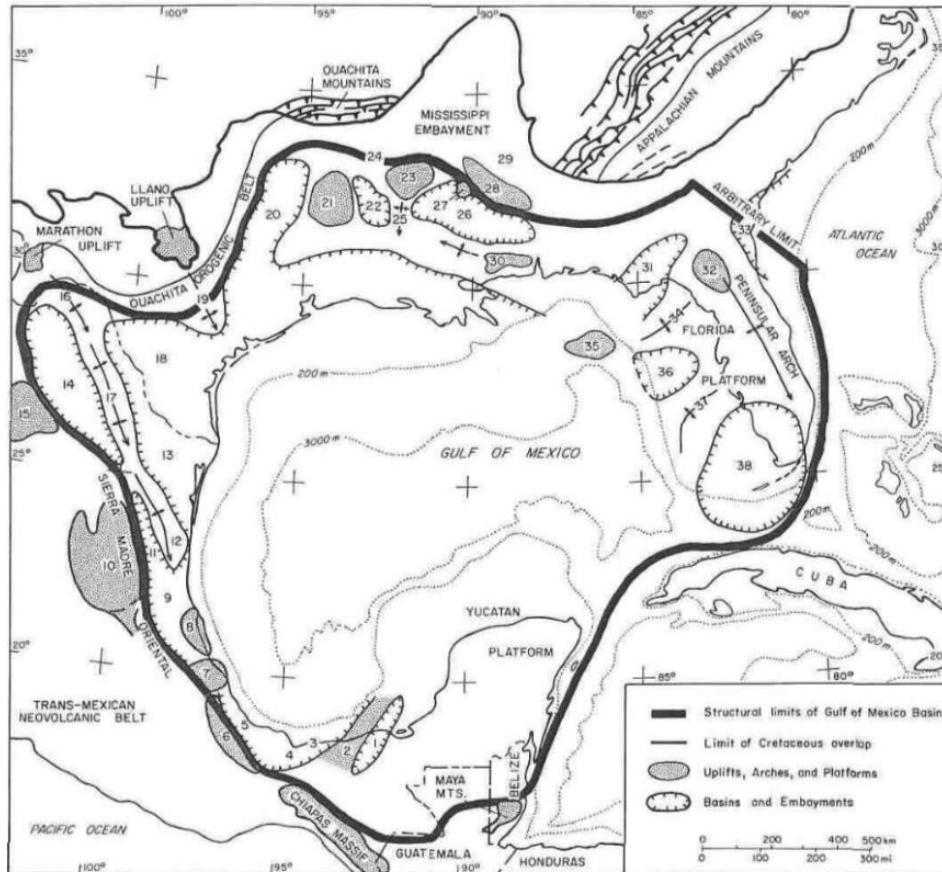
sur forma parte de la zona económica de México. Su parte marina está ocupada por el Golfo de México que cubre un área de 1.5 millones km² y alcanza profundidades de hasta 3,750m en su planicie abisal. El lecho marino del Golfo de México se eleva abruptamente en la parte este y sur, a lo largo de los escarpes de Florida y Campeche que forman los límites del golfo de las partes poco profundas de las plataformas carbonatadas de Florida y Yucatán; mientras que en su margen occidental se eleva paulatinamente hacia la costa con una inclinación gradual y generalmente bien definida.

Los límites de la Cuenca del Golfo de México corresponden principalmente con características estructurales [Figura 2.2], la plataforma carbonatada de Florida al este y la plataforma carbonatada de Yucatán al sur, al oeste limitado por el macizo de Chiapas, la Sierra Madre Oriental y el límite oriental de la plataforma de Coahuila y al norte el cinturón orogénico de Ouachita, las montañas Ouachita, el cinturón deformado central del Mississippi y la parte sur de las montañas Apalaches (Salvador, 1991).

El estudio de la cuenca del Golfo de México se puede abordar en base a la fisiografía de las provincias caracterizadas por las principales estructuras como: (a) Fisiografía terrestre, constituida por subprovincias de las penínsulas de Florida y Yucatán, las llanuras costeras norte y occidental y finalmente las tierras altas del norte de México y (b) Fisiografía submarina del Golfo de México, siendo esta última de mayor interés para la zona de estudio.

Fisiografía submarina del Golfo de México. El Golfo de México es una cuenca oceánica semicerrada rodeada por el continente de Norte América y la Isla de Cuba, conectada al Océano Atlántico por el estrecho de Florida y por el canal de Yucatán con el Mar del Caribe. Al norte, este y sur del Golfo, la plataforma continental es amplia, extendiéndose hasta 170 km de ancho desde la costa y en su parte más angosta al oeste alcanza tan solo 13 km. En su parte central, la planicie abisal Sigsbee es un lecho homogéneo plano con algunas elevaciones producto de intrusiones de diapiros salinos. La fisiografía actual del Golfo de México es reflejo de los eventos que le dieron origen: 1) *Rifting (apertura tectónica)*, 2) Subsistencia (acumulación de grandes depósitos de sedimentos), 3) Desarrollo de las plataformas carbonatadas

(mares someros), 4) Cambios eustáticos en el nivel del mar, 5) Diapiros salinos (movimiento de cuerpos salinos), 6) *Slumping* en el talud (movimiento de masas de sedimentos por gravedad) y 7) Turbiditas (afluencia de carga de sedimentos a causa de tormentas) (Salvador, 1991).



Outline of the Gulf of Mexico basin as defined in this volume. Second-order structural features within the basin: 1, Macuspana basin; 2, Villahermosa uplift; 3, Comalcalco basin; 4, Isthmus Saline basin; 5, Veracruz basin; 6, Cordoba platform; 7, Santa Ana massif; 8, Tuxpan platform; 9, Tampico-Misantla basin; 10, Valles-San Luis Potosi platform; 11, Magiscatzin basin; 12, Tamaulipas arch; 13, Burgos basin; 14, Sabinas basin; 15, Coahuila platform; 16, El Burro uplift; 17, Peyotes-Picachos arches; 18, Rio Grande embayment; 19, San Marcos arch; 20, East Texas basin; 21, Sabine uplift; 22, North Louisiana salt basin; 23, Monroe uplift; 24, Desha basin; 25, La Salle arch; 26, Mississippi salt basin; 27, Jackson dome; 28, Central Mississippi deformed belt; 29, Black Warrior basin; 30, Wiggins uplift; 31, Apalachicola embayment; 32, Ocala uplift; 33, Southeast Georgia embayment; 34, Middle Ground arch; 35, Southern platform; 36, Tampa embayment; 37, Sarasota arch; 38, South Florida basin.

Figura 2.2. Ubicación y límites estructurales de la Cuenca del Golfo de México

La Figura 2.3 muestra las principales provincias y subprovincias fisiográficas del Golfo de México:

Plataformas carbonatadas. Las plataformas de Florida y Yucatán fueron separadas por un canal profundo durante el Cretáceo y Cenozoico, desde entonces su posición se ha mantenido relativamente sin cambios.

Plataforma continental. Esta subprovincia fisiográfica abarca el margen occidental y norte de la cuenca y está dividida principalmente en la plataforma continental de Texas-Luisiana y la plataforma continental oriental de México. La plataforma de Texas-Luisiana es una plataforma amplia y plana del margen continental, con una anchura que varía en extensión entre 32 y 90 km. El lecho marino de esta plataforma presenta canales producto de la glaciación en la época de Wisconsin, rellenos con sedimentos. Además, esta plataforma presenta numerosas fallas y los efectos de la tectónica derivada por el movimiento de los diapiros salinos y de esquistos. La Plataforma este de México se extiende desde la desembocadura del río Bravo (referido en los EE. UU como Río Grande) hasta la Bahía de Campeche. Esta plataforma se extiende de 72 a 80 km de ancho en el norte y hacia el sur se hace más angosta, teniendo de 33 a 37 km en 23° N, y reduciéndose de 6 a 16 km de extensión cerca del macizo de los Tuxtlas al sur de Veracruz. La plataforma se ensancha de nuevo hacia el extremo oriental de la Bahía de Campeche.

Talud continental. Dividido en tres partes principales que son: (1) Talud de Texas-Luisiana, (2) Talud del Río Bravo (Río Grande) y (3) Talud oriental de México. El Talud de Texas-Luisiana está bordeado al norte con la plataforma continental, al sur por el escarpe de Sigsbee y al este por el flanco occidental del cañón del Mississippi. El relieve de este talud es una superficie compleja, esculpida por la actividad diapírica de las capas de evaporitas subyacentes. El Talud del Río Bravo (Río Grande) está conformado por el Cinturón Plegado Mexicano al sur, el Cinturón Plegado Perdido al este y al norte una provincia salina. El Talud oriental de Méxicopresenta una de las topografías más inusuales en mares marginales; en el sector norte presenta diapiros salinos que constituyen la extensión sur de los diapiros de evaporitas y macizos del talud Texas-Luisiana contenidos en el talud del río Bravo, al sur se encuentra una depresión conocida como La Lengua de Veracruz (por su forma geométrica de una lengua) que se extiende hacia la zona más profunda del Golfo y está limitada al este por los domos salinos de Campeche. Entre el talud del río Bravo y la lengua de Veracruz se encuentran las Cordilleras Mexicanas que consiste en una serie de dorsales formadas por pliegues anticlinales paralelos a la costa.

Veracruz Tongue. Lengua de Veracruz, en español, es una depresión en forma de lengua en el Golfo de México posicionada entre las Cordilleras Mexicanas al oeste y los Domos Salinos de Campeche al este; lo que provoca una gran acumulación de sedimentos. Mientras que la plataforma continental colindante es la más angosta del Golfo de México.

Domos salinos de Campeche. Localizados en la bahía de Campeche con una topografía influenciada por diapiros salinos.

Cañones submarinos. Varios cañones submarinos erosionan las laderas del talud continental y algunos presentan meandros como su afluencia se aproxima a la planicie abisal Sigsbee.

Abanico del Mississippi. Es un abanico que se extiende desde la plataforma continental de Luisiana hasta profundidades abisales, dividido en tres subprovincias fisiográficas, abanico superior con profundidades de 1,300 a 2,500 m y una pendiente promedio de 1° , abanico medio, con un gradiente menor a 0.25° y abanico inferior compuesto de varios lóbulos de sedimentos.

Planicie abisal Sigsbee. Es la superficie más plana del planeta cubriendo un área de $103,600 \text{ km}^2$ con sedimentos de hasta 9 km interrumpidos por una serie de diapiros salinos que forman los domos salinos Sigsbee.

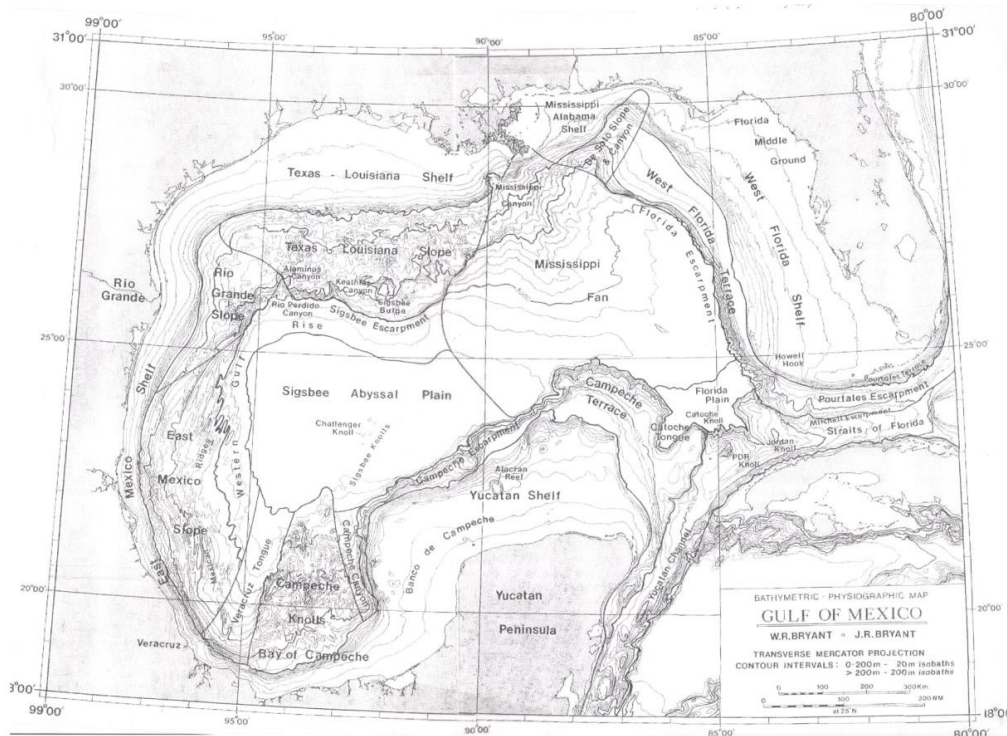


Figura 2.3. Mapa batimétrico del Golfo de México y sus principales subprovincias fisiográficas. Modificado de Salvador (1991)

2.3. Marco Geológico y Tectónico

El área de estudio que compete a este trabajo de investigación se localiza en el quiebre de la plataforma continental y talud continental del margen occidental del Golfo de México. El área de estudio está sobre los límites de las provincias geológicas Tampico-Misantla y Cordilleras Mexicanas [Figura 2.4].

La provincia Tampico-Misantla, abarca parte de la planicie costera en los estados de Veracruz, San Luis Potosí y Puebla. La provincia se extiende al oriente del Cinturón Plegado de la Sierra Madre Oriental y costa afuera en la plataforma continental del Golfo de México, limitada por el Cinturón Extensional Quetzalcoatl. La columna estratigráfica en esta provincia consiste principalmente de secuencias clásticas del Terciario poco deformadas, que descansan sobre rocas predominantemente carbonatadas del Cretácico y Jurásico, y sobre algunas rocas ígneas extrusivas, las cuales se incrementan hacia el límite sur con la Faja Volcánica Transmexicana. (PEMEX, 2010)

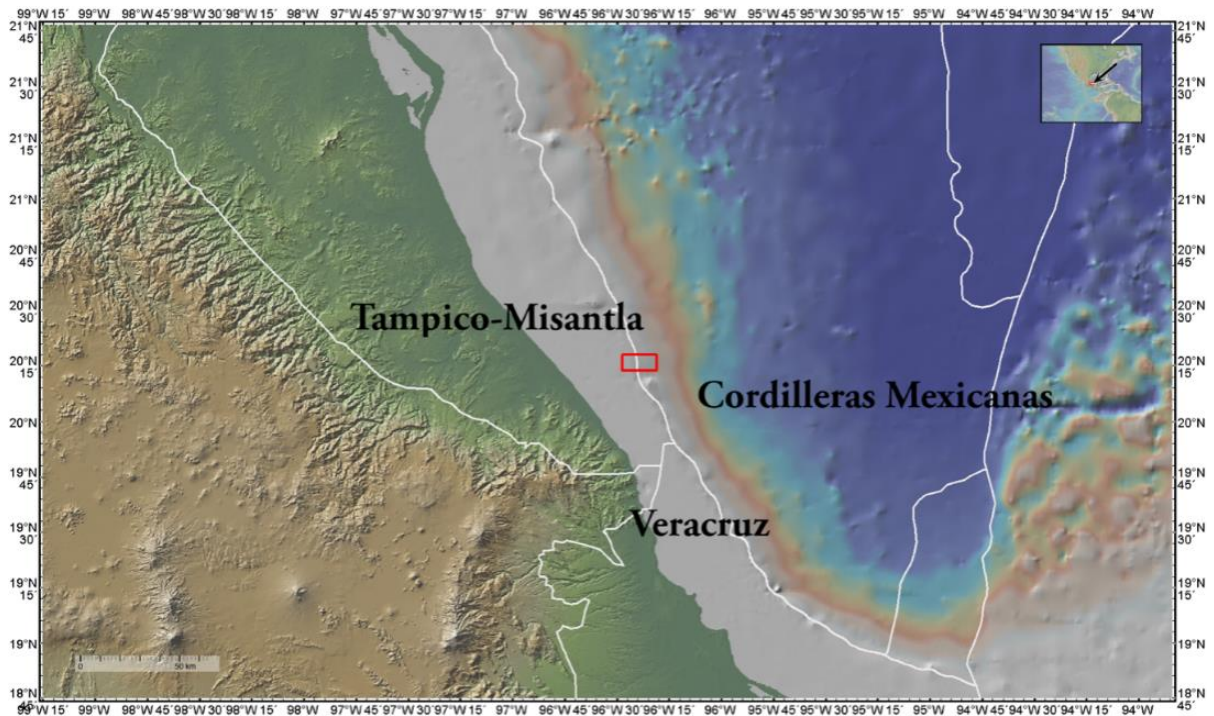


Figura 2.4. Ubicación del área de estudio respecto a las provincias geológicas en el margen occidental del Golfo de México. El rectángulo en rojo marca el área de estudio

La provincia Cordilleras Mexicanas se localiza al este de la plataforma continental del Golfo de México. En esta zona se formó un amplio cinturón plegado, desde la parte Sur de la Provincia Salina del Bravo hasta el Sur del Golfo de México. Se extiende a lo largo de 500 km y cubre cerca de 70,000 km² con tirantes de agua de entre 1,000 y 3,000 m, generado como respuesta a la extensión gravitacional desarrollada desde el Sur de la Cuenca de Burgos y la Cuenca Tampico - Misantla. Se compone de anticlinales simétricos, con leve vergencia hacia el oriente, alargados y angostos. El sistema combinado extensión-compresión de la Provincia Geológica de Cordilleras Mexicanas se transmite a través de más de una superficie de despegue principal dentro del Paleógeno, así como también superficies de despegue secundarias dentro de la secuencia Terciaria. Las estructuras están presentes principalmente en la serie sedimentaria Terciaria, en particular del Mioceno al Reciente. Los pliegues más jóvenes y de mayor amplitud se localizan hacia la parte central de las Cordilleras Mexicanas. (CNH, 2015)

Fuertemente ligado a la provincia Cordilleras Mexicanas y localizado hacia el margen occidental del Golfo de México se estableció un sistema de fallas lítricas conocido como Cinturón Extensional Quetzalcóatl y que corresponde a una serie de

anticlinales largos y angostos, con buzamiento dominante hacia el oriente y en algunos casos en sentido opuesto. Este sistema de fallas está asociado con deformaciones por gravedad de los sedimentos de la plataforma y el talud continental. (CNH, 2015)

El Sistema Extensional Quetzalcóatl y Cordilleras Mexicanas son dos provincias tectónicas del Golfo de México que se desarrollaron simultáneamente debido a deslizamientos por gravedad desde la plataforma continental. La Figura 2.5 muestra las principales estructuras tectónicas del Cinturón Extensional Quetzalcóatl y Cordilleras Mexicanas. Ambos sistemas están controlados por la subsidencia de bloques de sedimentos del Neógeno a través de fallas lístricas conectadas a una zona de desprendimiento del Eoceno (Salomón Mora, Aranda García, & Román Ramos, 2009). Estos dos sistemas se dividen en tres subprovincias tectónicas basándose en la interpretación de nueve pozos de exploración y estudios sísmicos multicanal desde la plataforma continental hasta la zona abisal del Golfo de México, siendo: (1) sistema de fallas en dominó, con fallas normales de crecimiento algunas de las cuales son lístricas, (2) sistema de graben, que está constituido por un grupo de fallas lístricas homotéticas-antitéticas que forman grabenes con numerosas fallas secundarias, (3) sistema de fallas lístricas de crecimiento, algunas con zonas de desprendimiento difusas a profundidad y otras muestran una clara estructura lístrica con rollovers.

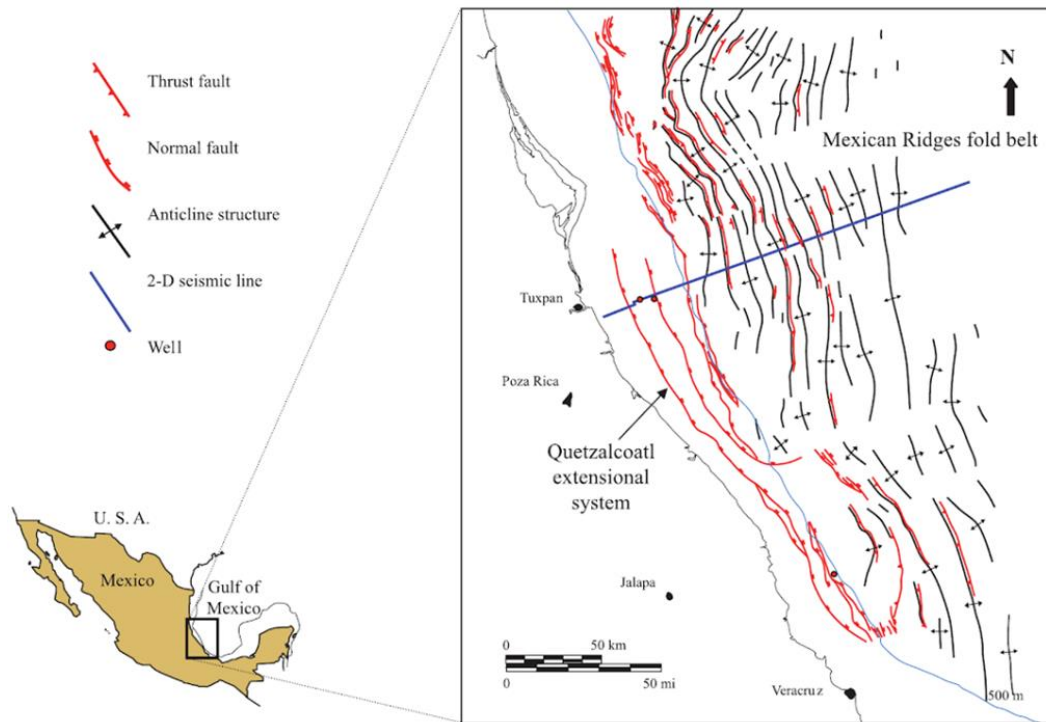


Figura 2.5. Mapa tectónico regional del Cinturón Extensional Quetzalcóatl y Cordilleras Mexicanas en el Golfo de México (Salomón Mora, Aranda García, & Román Ramos, 2009)

Al sur del área de estudio se encuentra una estructura predominante, la falla transtensional sinistral de Veracruz [Figura 2.6] que afecta unidades volcánicas en la cuenca de Veracruz, en la zona este del Cinturón Volcánico Transmexicano y es considerada el límite este del Bloque Sur de México. (Andreani, y otros, 2008)

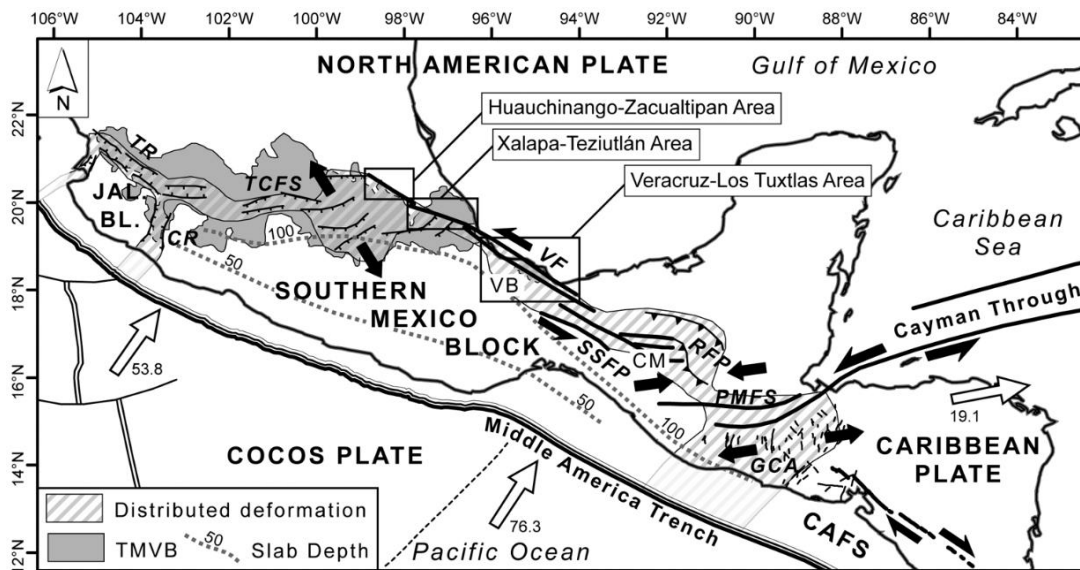


Figura 2.6. Mapa regional mostrando elementos tectónicos del sur de México. Las líneas negras denotan las fallas principales y flechas negras el movimiento en los límites de placa, Andreani et. al. (2008)

A pesar de que la actividad sísmica en el Golfo de México es escasa, Franco, Canet, Iglesias y Valdés González (2013) publicaron un estudio sismo-estratigráfico basado en el análisis de los sismos con magnitudes mayores a $M \geq 3.5$ detectados por el Servicio Sismológico Nacional (SSN) en el Golfo de México entre 1998 y 2012, incluyendo 5 sismos con magnitudes $M \geq 4.4$. Franco et. al. concluye que la actividad sísmica en el Golfo de México se debe a la tectónica salina; la zona norte del Istmo de Tehuantepec, cerca de las costas de Tabasco y sur de Veracruz reveló una actividad sísmica alta con sismos a profundidades mayores a 70 km que fueron atribuidos a eventos intraplaca y sismos poco profundos cuyos mecanismos focales sugieren un desplazamiento de rumbo posiblemente originados por la falla de Veracruz. Uno de los sismos de mayor magnitud ocurrido en las costas de Tuxpan Veracruz puede asociarse a la deformación transpresional dextral presente en las Cordilleras Mexicanas y a la falla del este de México que se asume activa desde el Neógeno.

La Figura 2.7 muestra el marco geodinámico de referencia de la zona. La línea en rojo señala el movimiento transpresional dextral de la Falla del Este de México, la línea en azul marca la falla sinistral de Veracruz que ha estado activa desde el Mioceno tardío.

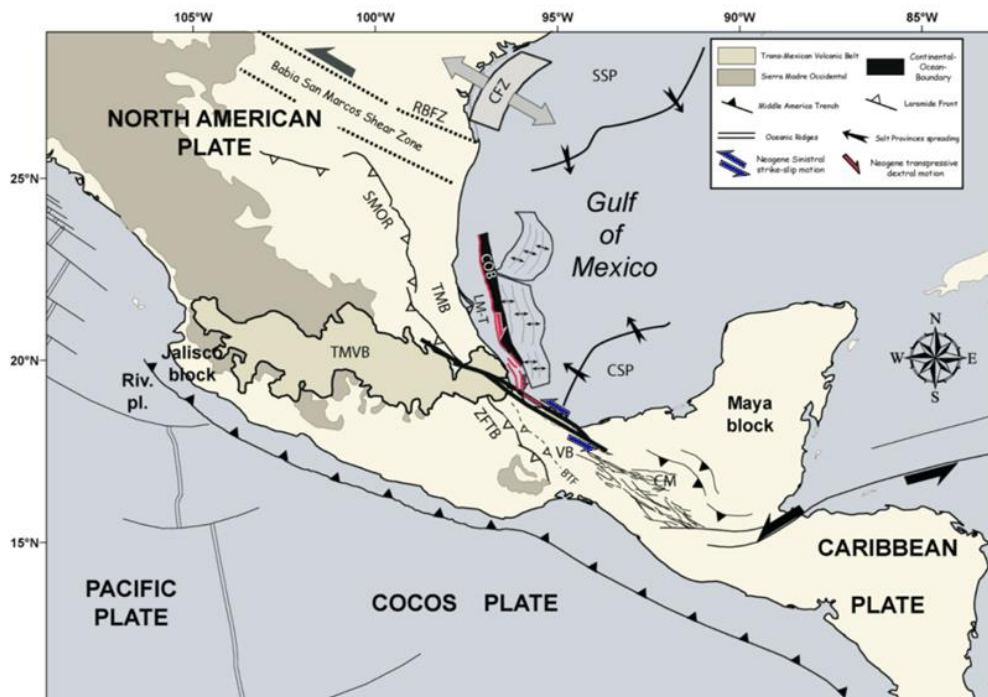


Figura 2.7. Deformación transpresional dextral a lo largo del margen occidental del Golfo de México, Le Roy et. al. (2008)

3. METODOLOGÍA

La metodología empleada en este trabajo de investigación está dividida en cuatro etapas como se muestra en la Figura 3.1: (1) Adquisición de datos, (2) Revisión bibliográfica, (3) Procesamiento y (4) Análisis de resultados. Cada una de las etapas principales será descrita a continuación.

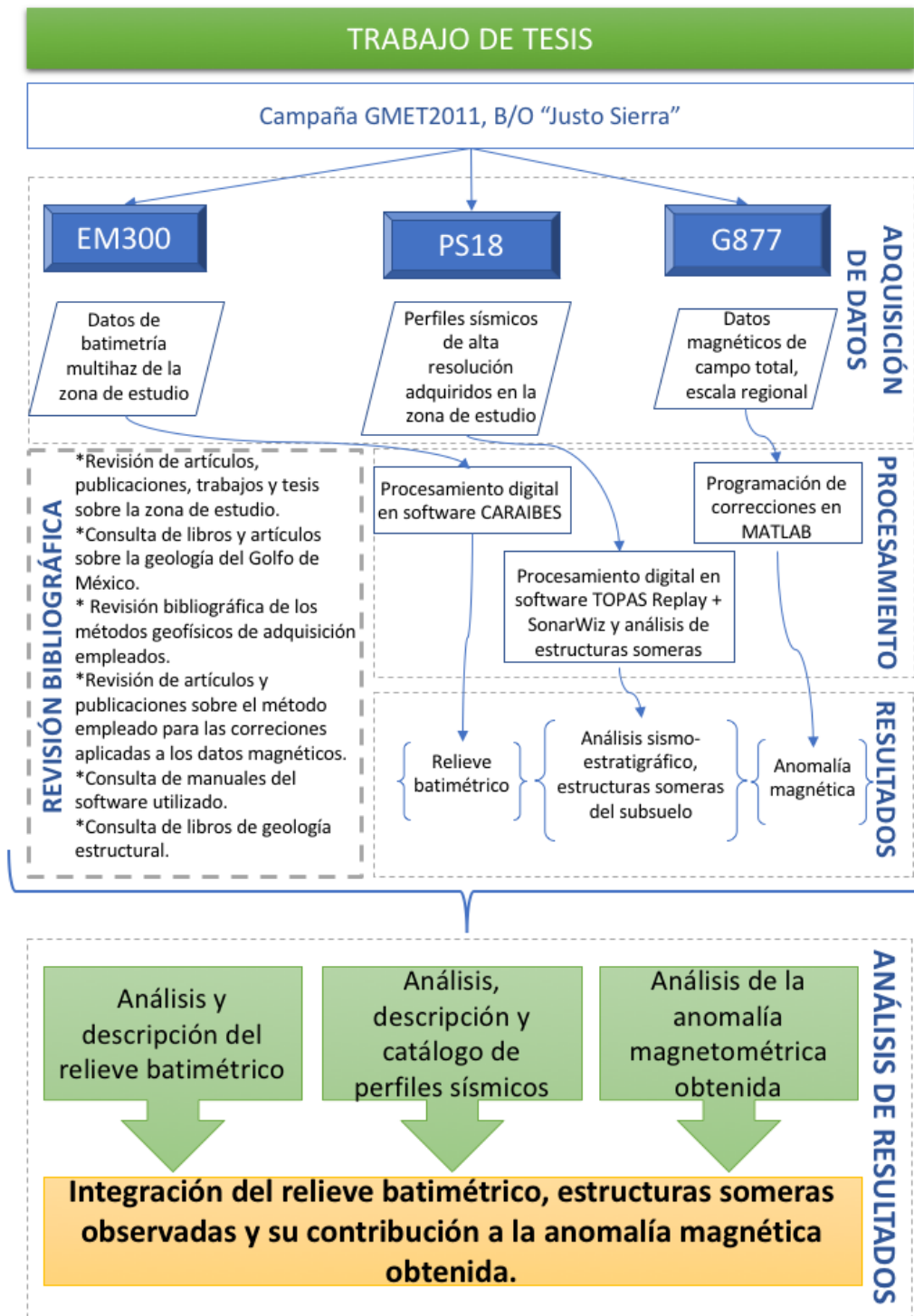


Figura 3.1. Esquema de la metodología empleada en este trabajo de investigación

3.1. Campaña y adquisición de datos

Los datos empleados en este estudio se obtuvieron durante la campaña GMET2011 a bordo del Buque Oceanográfico Justo Sierra de la UNAM del 23 al 27 de octubre de 2011.

La campaña (dirigida por el Dr. Carlos Ángel Q. Mortera Gutiérrez del Instituto de Geofísica de la UNAM) tuvo como objetivo principal realizar un perfil W-E de datos magnéticos a través del Golfo de México como parte del proyecto dirigido por el Dr. William Lee Bandy que contribuyó a la tesis doctoral “Profundidad de la base de la fuente magnética y estructura termal del Golfo de México” (Rosales Rodríguez, 2014). Durante el registro de estos datos es observada una estructura con forma de falla que afecta el lecho marino, en consecuencia al desconocer su naturaleza se llevó a cabo un levantamiento de 12 perfiles con direcciones E-W, W-E, N-S, S-N, SE-NW y NE-SW alrededor de la zona ubicada a 30 km de la costa de Veracruz, frente a la población Nautla [Figura 3.2]. Este levantamiento adquirió registros geofísicos continuos de magnetometría, batimetría y perfiles sísmicos de alta resolución.



Figura 3.2. Ubicación del levantamiento

El derrotero del barco [Figura 3.3] se planteó con la intención de cubrir el área que ocuparía la continuación de la estructura de interés atendiendo además la dirección de navegación del barco e incluyendo perfiles del levantamiento correspondiente al registro magnético del objetivo principal de la campaña oceanográfica.

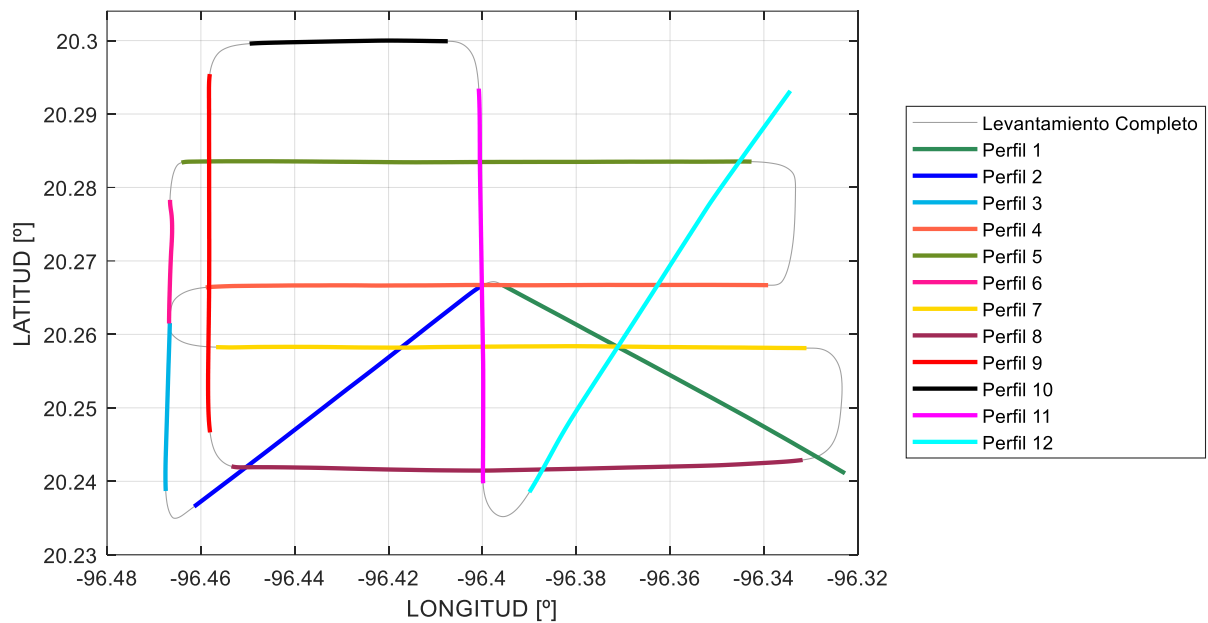


Figura 3.3. Derrotero del barco en la adquisición de los 12 perfiles. En gris el levantamiento completo, en colores los 12 perfiles

3.1.1. Batimetría

La batimetría es el estudio de las profundidades alcanzadas en cuerpos de agua, y constituye una de las observaciones fundamentales que se pueden obtener del fondo marino. Una batimetría detallada nos permite ubicar elementos específicos de la topografía marina, características del terreno y su distribución espacial de tal forma que podemos obtener modelos tridimensionales y mapas detallados de su relieve.

El método acústico constituye la principal técnica de mapeo del relieve del fondo marino. Las mediciones batimétricas son obtenidas haciendo uso de ecosondas monohaz (*single beam*) o multihaz (*multi beam*) fijas en los cascos de las embarcaciones [Figura 3.4]. Actualmente vehículos sumergibles autónomos realizan mediciones de manera automática en área de particular interés y envían sus registros a los científicos a bordo. El método acústico está basado en la medición del tiempo que transcurre en transmitir una onda acústica en un medio acuático; recibiendo su rebote proveniente del lecho y conociendo la velocidad acústica en el medio acuático se obtienen los valores de profundidades. La velocidad acústica en la columna de agua está sujeta a los cambios de temperatura, salinidad y presión correspondientes a la zona del levantamiento. En consecuencia, durante el

levantamiento es necesario realizar mediciones de las velocidades a diferentes intervalos de profundidades con una variedad de sensores y sondas que registran los parámetros físicos en dichos intervalos y a su vez estas mediciones son integradas para obtener el perfil de velocidades acústicas en una zona en particular de interés.

Los datos batimétricos utilizados en este estudio fueron obtenidos a través de la ecosonda multihaz EM300, fabricada por la empresa noruega Kongsberg, instalada en el buque Justo Sierra. Esta ecosonda está diseñada para hacer levantamientos a profundidades de 10 m hasta una profundidad de aproximadamente 5,000 m, trabaja a una frecuencia de 30 kHz con cobertura angular de 150 grados, una cobertura lateral de hasta 5,000 m y 135 mediciones por disparo o *ping*. La variación de la cobertura angular y la separación entre haces puede ser configurada automáticamente en función de la profundidad o manualmente a consideración del operador a cargo. La ecosonda está constituida por un arreglo de transductores emisores, un arreglo de transductores receptores, un *transceiver* conectado a los sistemas de posicionamiento, movimiento y tiempo del buque y una consola de operación [Figura 3.5] (Kongsberg, 2002).

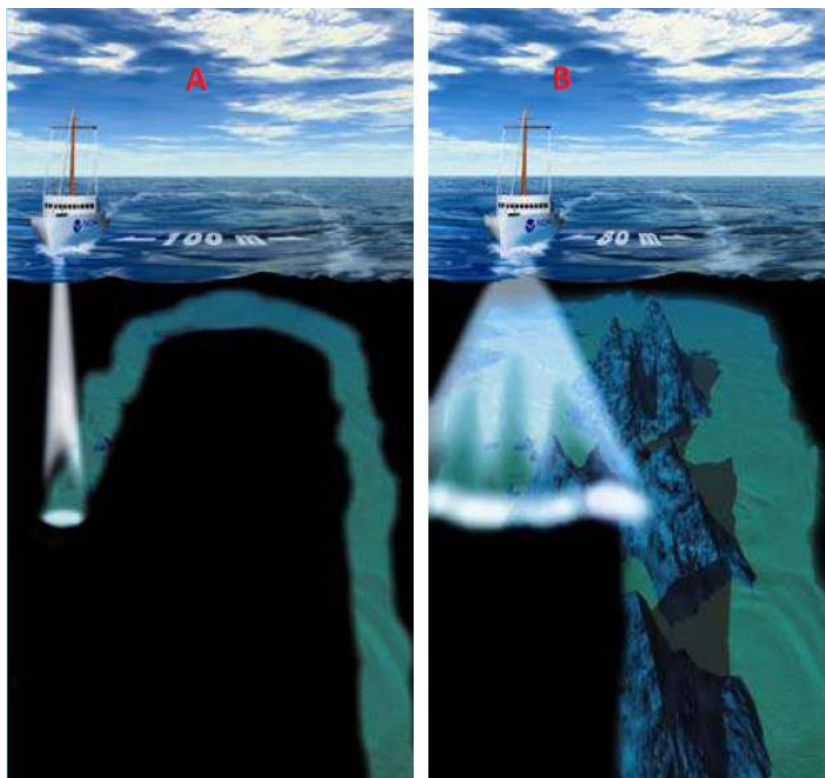


Figura 3.4. Ejemplos de funcionamiento de ecosondas monohaz (A) y multihaz (B) (NOAA, 2017)

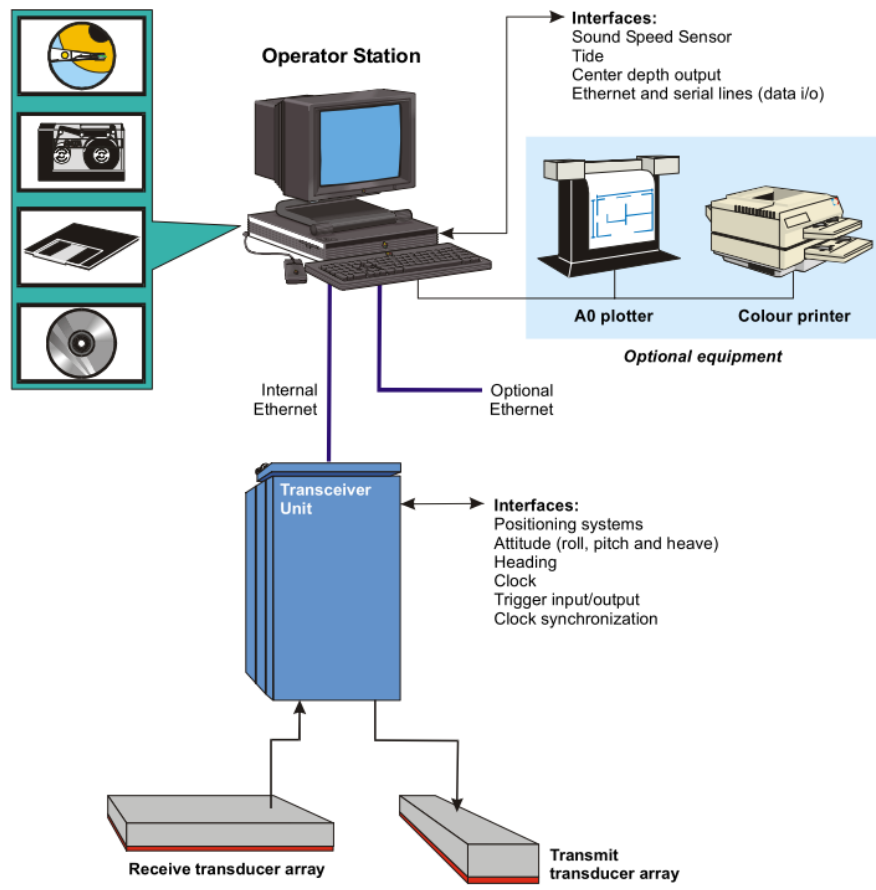


Figura 3.5. Esquema de configuración de la ecosonda EM300 a bordo del buque Justo Sierra (Kongsberg, 2002)

3.1.2. Magnetismo

La adquisición de datos magnéticos se realizó con el magnetómetro de precesión protónica G877 de la marca GEOMETRICS [Figura 3.6a], que obtiene valores de campo geomagnético total con una resolución de 0.1 nT a lo largo de los perfiles que concuerdan con los perfiles batimétricos y sísmicos registrados.

El funcionamiento del magnetómetro está basado en la medición de la frecuencia de precesión, es decir, el cambio en la orientación del eje de rotación, de los protones presentes en el sensor del magnetómetro respecto al campo total presente. Originalmente los protones permanecen inertes o alineados con el campo geomagnético, al introducir una corriente los protones se alinean con el campo magnético generado, después de unos segundos la corriente es interrumpida de tal forma que los protones vuelven a alinearse con el campo geomagnético después de una serie de precesiones. Es con estas variaciones y con la geometría detallada de ubicación del GPS y magnetómetro respecto del barco [Figura 3.6c] que el

magnetómetro es capaz de calcular el campo geomagnético total presente en la zona. Dada la resolución y sensibilidad del magnetómetro y para evitar interferencias ocasionadas por el casco del barco, el magnetómetro es arrastrado a una distancia de 250 m de la popa del B/O Justo Sierra.

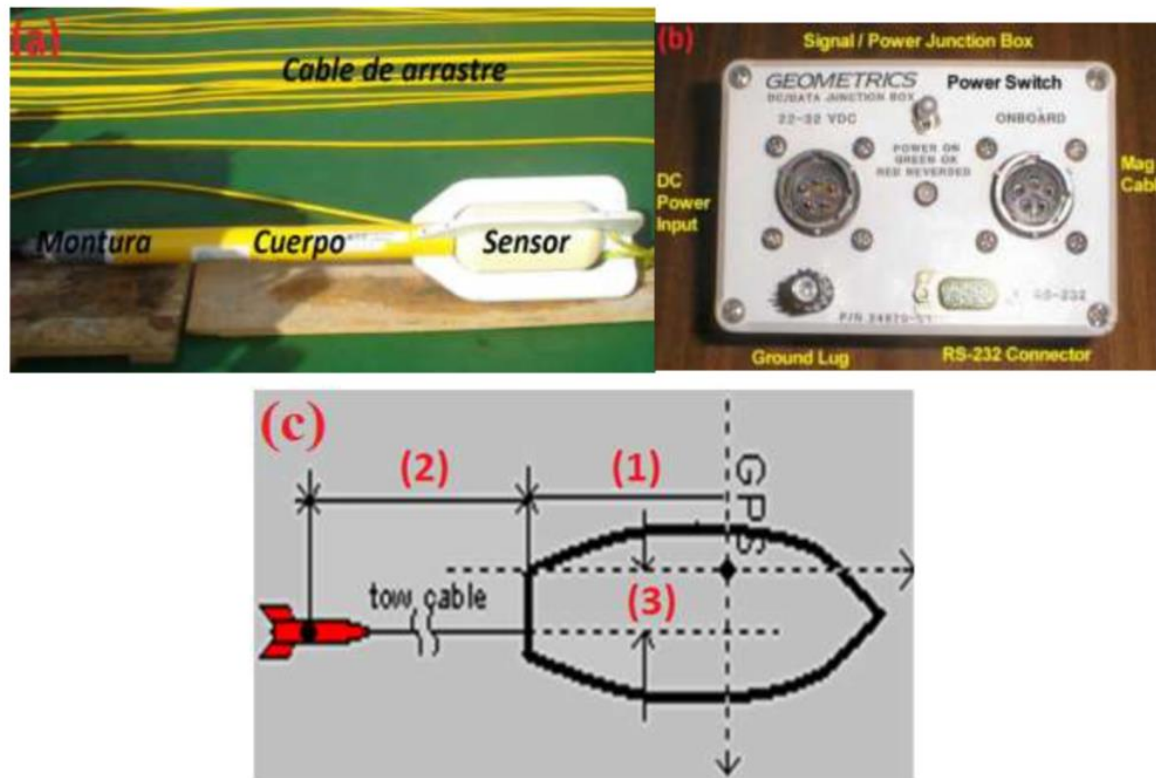


Figura 3.6. Magnetómetro Geometrics G877; (a) Partes: Montura, cuerpo (con partes electrónicas), sensor y cable de arrastre; (b) Junction Box; (c) Dimensiones de la configuración del magnetómetro G877: (1) distancia del GPS a la popa, (2) largo del cable desde la popa al magnetómetro, y (3) distancia lateral de GPS al cable de comunicación, (Valle Hernández, 2015)

El levantamiento magnético [Figura 3.7] fue almacenado en un solo archivo en formato *Survey.INTERPOLATOR.INT* directamente en la estación de cómputo conectada al conmutador o “Junction Box” [Figura 3.6b]. El magnetómetro registró un total de 142,980 mediciones de campo geomagnético total, los cuales fueron tomados cada 2 segundos. La Figura 3.7 muestra en rojo la zona de interés para este trabajo de investigación, mientras que el levantamiento en sierra, en negro, contiene los registros utilizados para el estudio de Rosales Rodríguez (2014). La geometría del levantamiento es usada para el cálculo del error por variación diurna.

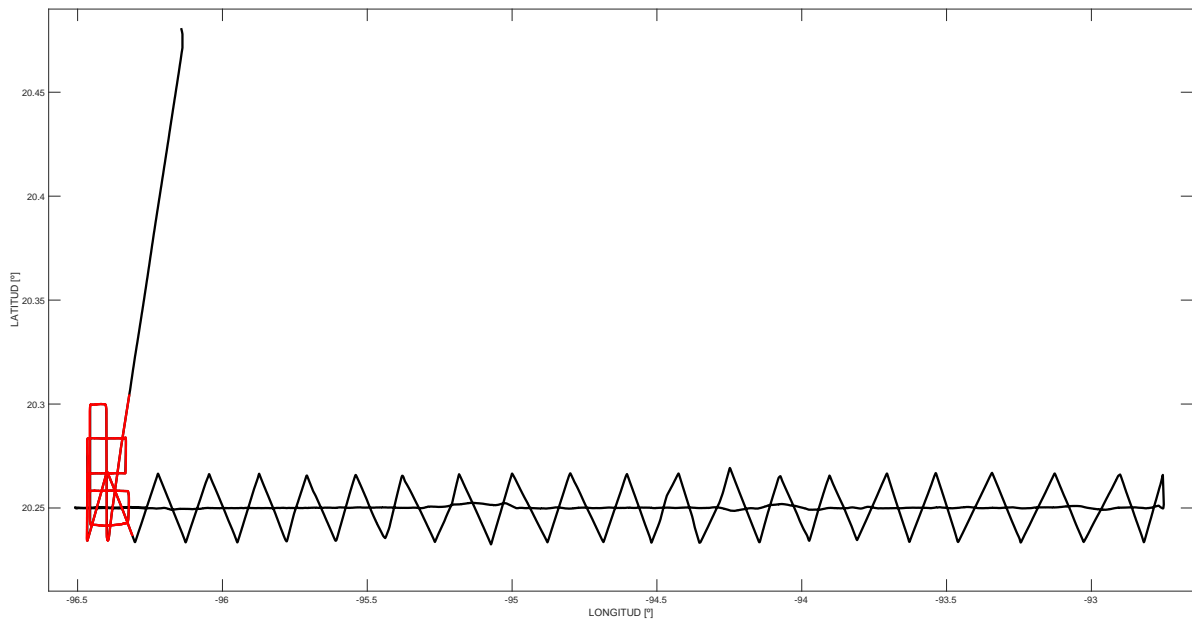


Figura 3.7. Levantamiento magnético. En rojo la zona de interés

3.1.3. Perfiles Sísmicos

Conceptos básicos de sísmica de reflexión. Actualmente el método de reflexión sísmica es el más utilizado en la exploración geofísica debido a la precisión, alta resolución y penetración logradas. La técnica básica consiste en generar ondas sísmicas y medir el tiempo en que viajan de la fuente a una serie de sensores dispuestos usualmente en línea recta en dirección de la fuente. Del conocimiento de tiempos de arribo y velocidad de las ondas es posible reconstruir su trayectoria. (Telford, Geldart, & Sheriff, 1990)

En un medio acuático, la sísmica de reflexión utiliza el tiempo que le toma a un frente de onda recorrer la columna de agua desde la ubicación de la fuente de la ecosonda hasta las estructuras ubicadas en el fondo y el regreso de la onda reflectada [Figura 3.8]. El comportamiento de la onda acústica depende de las características físicas de las rocas o sedimento que conforman cada una de las capas del subsuelo del lecho marino que actúan como reflectores y de la geometría en la que se encuentran formando el fondo, generando una imagen más clara del lecho marino.

Este método está basado en la ley de Snell, desarrollada originalmente en el estudio de la óptica pero que se utiliza de igual forma en el estudio de ondas sísmicas, su principal aplicación es determinar los ángulos de reflexión y refracción de la incidencia de una onda sísmica, con ángulos diferentes de 90° , en los límites de capa

del subsuelo. La Ley de Snell establece que el ángulo en que un rayo es reflejado es igual al ángulo de incidencia. Ambos ángulos son medidos desde la normal al límite entre dos capas de diferente impedancia. Aunque es difícil relacionar la impedancia acústica directamente con propiedades de las rocas, se ha observado que generalmente las rocas con mayor dureza tienen una impedancia acústica mayor. (Gadallah & Fisher, 2009)

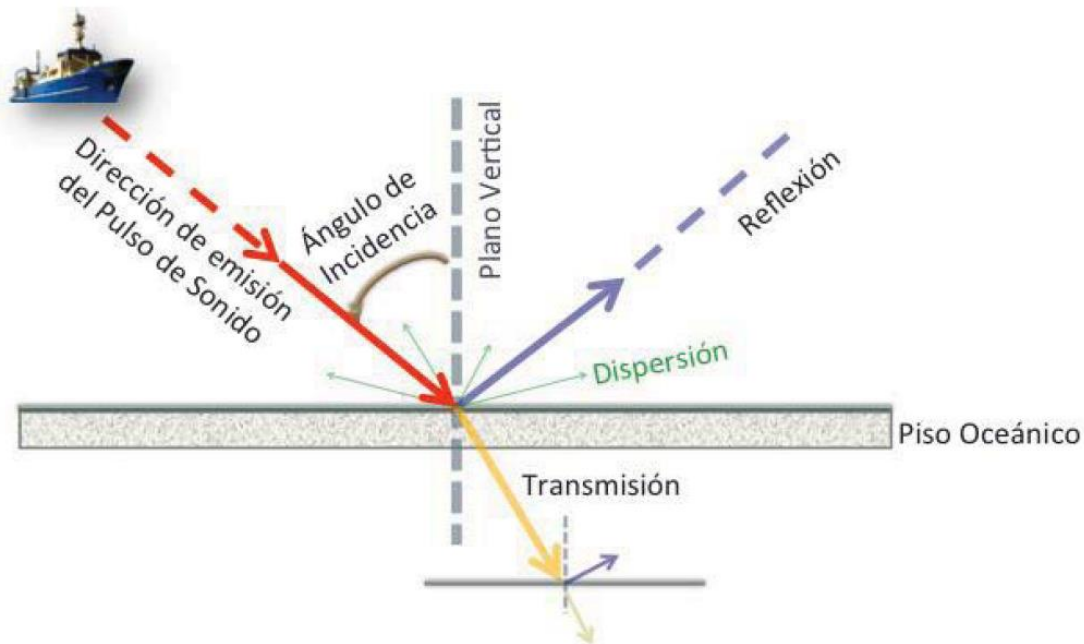


Figura 3.8. Diagrama de descomposición de un pulso de sonido en un medio acuático

Adquisición de perfiles sísmicos. La ecosonda paramétrica del perfilador TOPAS (Topographic Parametric Sonar) modelo PS18 de la marca Kongsberg a bordo del B/O Justo Sierra, fue utilizada para obtener perfiles sísmicos de alta resolución con un sistema monocanal, el cual consiste de un transductor que es fuente y receptor a la vez, colocado debajo de la quilla del buque [Figura 3.9].

La ecosonda PS18 actúa como fuente y receptor, utiliza un haz angosto de alta resolución capaz de perfilar la geometría de los sedimentos y estructuras en el fondo marino. La calidad de los datos registrados depende de la resolución espacial del sistema, influenciada por el tamaño y geometría del haz, la distancia entre pings y la velocidad del buque a la que se hace el levantamiento, así como el ángulo de incidencia del haz transmitido. Las frecuencias de transmisión disponibles se encuentran en el rango de 0.5 a 6 kHz, con una resolución vertical de

aproximadamente 0.2 ms y un ancho de haz de 4° a 6°, dependiendo de la frecuencia. (Kongsberg, 2005)

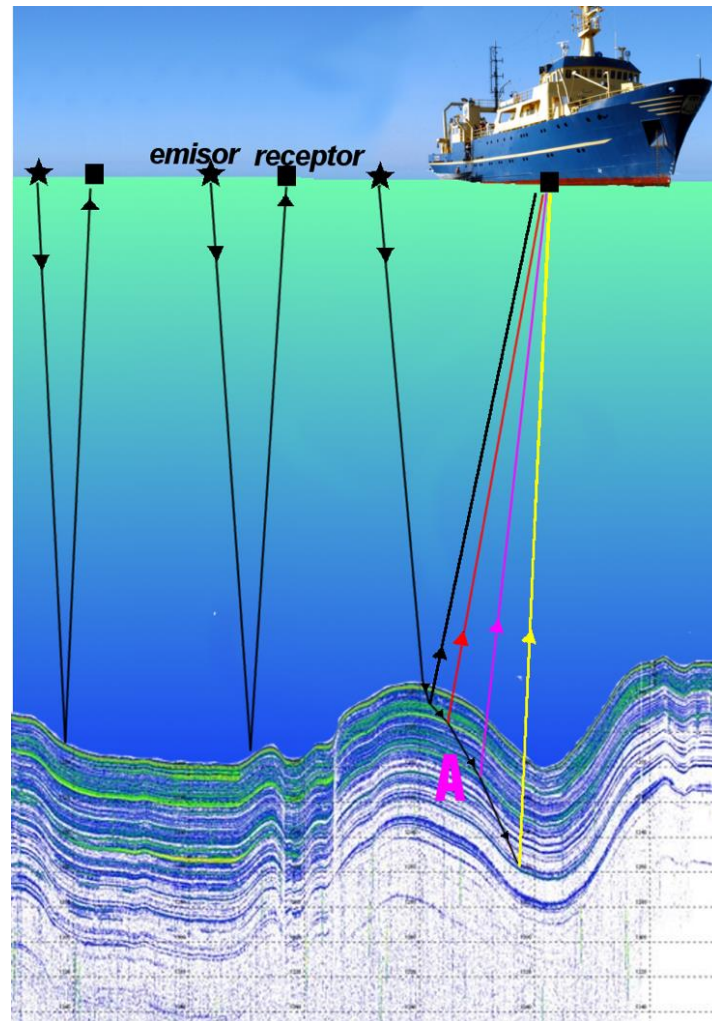


Figura 3.9. Funcionamiento de una ecosonda monocal. En la zona A se pueden observar diferentes estratos que actúan como reflectores y la onda acústica reflejada al receptor relacionada a cada uno de ellos

Doce perfiles sísmicos fueron obtenidos a una velocidad promedio de aproximadamente 7.7 kn (nudos) ó 4 m/s, y son capturados en formato digital RAW (Anexo A). La Tabla 1 enlista los parámetros de adquisición de todos los perfiles.

Líneas	Pulso [kHz]	Longitud [ms]	Muestreo [kHz]	Intervalo [ms]
1	Chirp2.5-5.5	15	30	1600
2	Chirp2.5-5.5	15	30	1200
3	Chirp2.5-5.5	15	30	800
4	Chirp2.5-5.5	15	30	800

5	Chirp2.5-5.5	15	30	1600
6	Chirp2.5-5.5	15	30	800
7	Chirp2.5-5.5	15	30	800
8	Chirp2.5-5.5	15	30	1600
9	Chirp2.5-5.5	15	30	800
10	Chirp2.5-5.5	15	30	1200
11	Chirp2.5-5.5	15	30	1600
12	Chirp2.5-5.5	15	30	1200

Tabla 1. Parámetros de adquisición de los perfiles sísmicos de alta resolución obtenidos en la campaña GMET2011

3.2. Procesamiento

3.2.1. Batimetría

La visualización de los perfiles batimétricos se realizó con el software CARAIBES de la agencia francesa IFREMER; una vez importados los datos se inició el procesamiento de los mismos con el módulo CalBat para determinar la distorsión del fondo marino, en la Figura 3.10 se observa un efecto cóncavo y discontinuidad del relieve batimétrico. Este efecto cóncavo es inducido por tener un perfil erróneo de velocidades, haciéndose más notorio en los extremos de la adquisición debido a que el ángulo de incidencia es mayor.

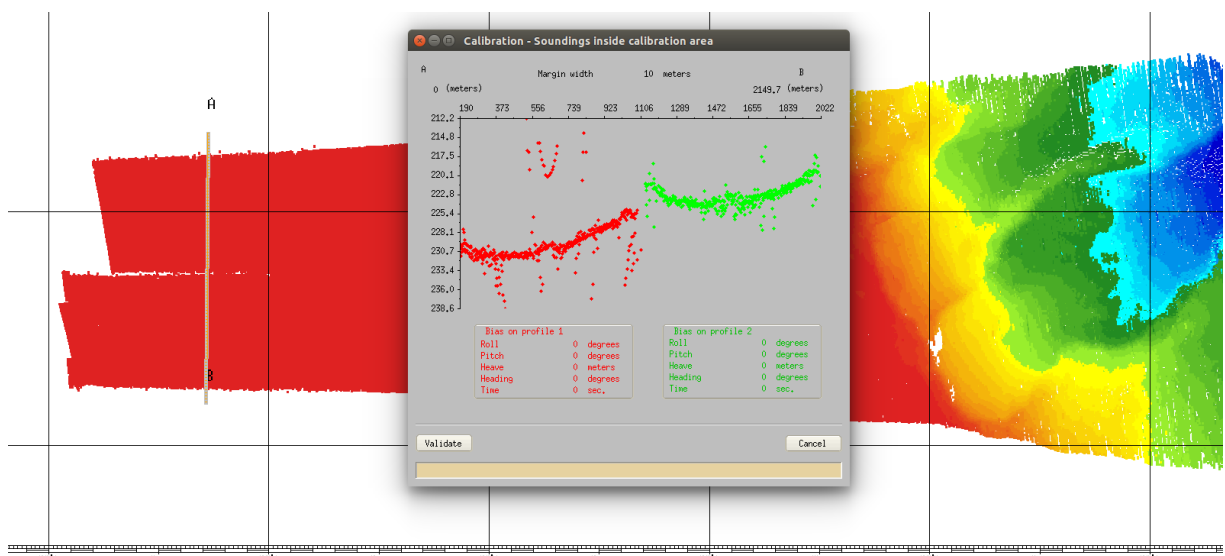


Figura 3.10. Corte transversal AB de dos perfiles dentro del área del levantamiento

Dada la existencia de este error no es posible continuar con las correcciones por rumbo, cabeceo, balanceo y elevación del barco, sin embargo se realizó una limpieza general eliminando ruido generado por mediciones anómalas para mejorar el modelo del terreno en el módulo Odicce del software CARAIBES [Figura 3.11], los puntos en amarillo fueron invalidados para eliminar su contribución a la construcción del modelo del terreno.

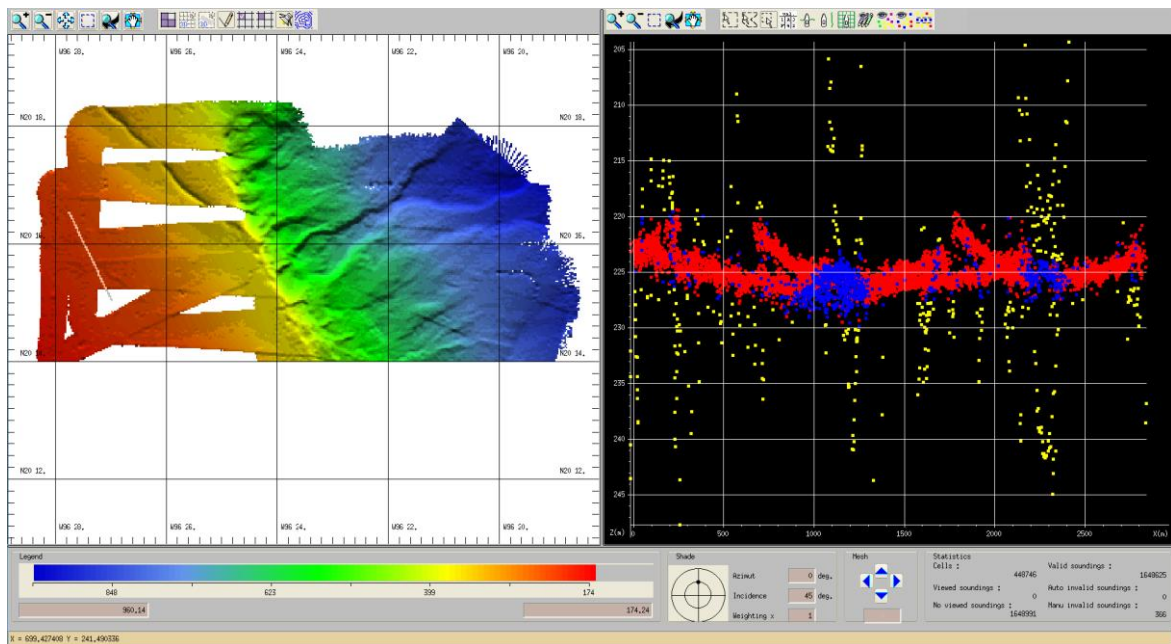


Figura 3.11. Módulo Odicce

3.2.2. Datos magnéticos

Las mediciones de campo total obtenidas con el magnetómetro G877 [Figura 3.12] son reducidas a los valores de anomalía magnética usando la fórmula:

$$\Delta F = F_{obs} - F_{IGRF} \pm F_{ER} \pm F_{VD}$$

En donde:

ΔF : Anomalía magnética

F_{obs} : Valores magnéticos marinos de campo total medidos durante la campaña

F_{IGRF} : Valores teóricos de campo total, IGRF-12

F_{ER} : Valores inducidos por el rumbo del buque respecto del norte geográfico

F_{VD} : Valores de variación diurna

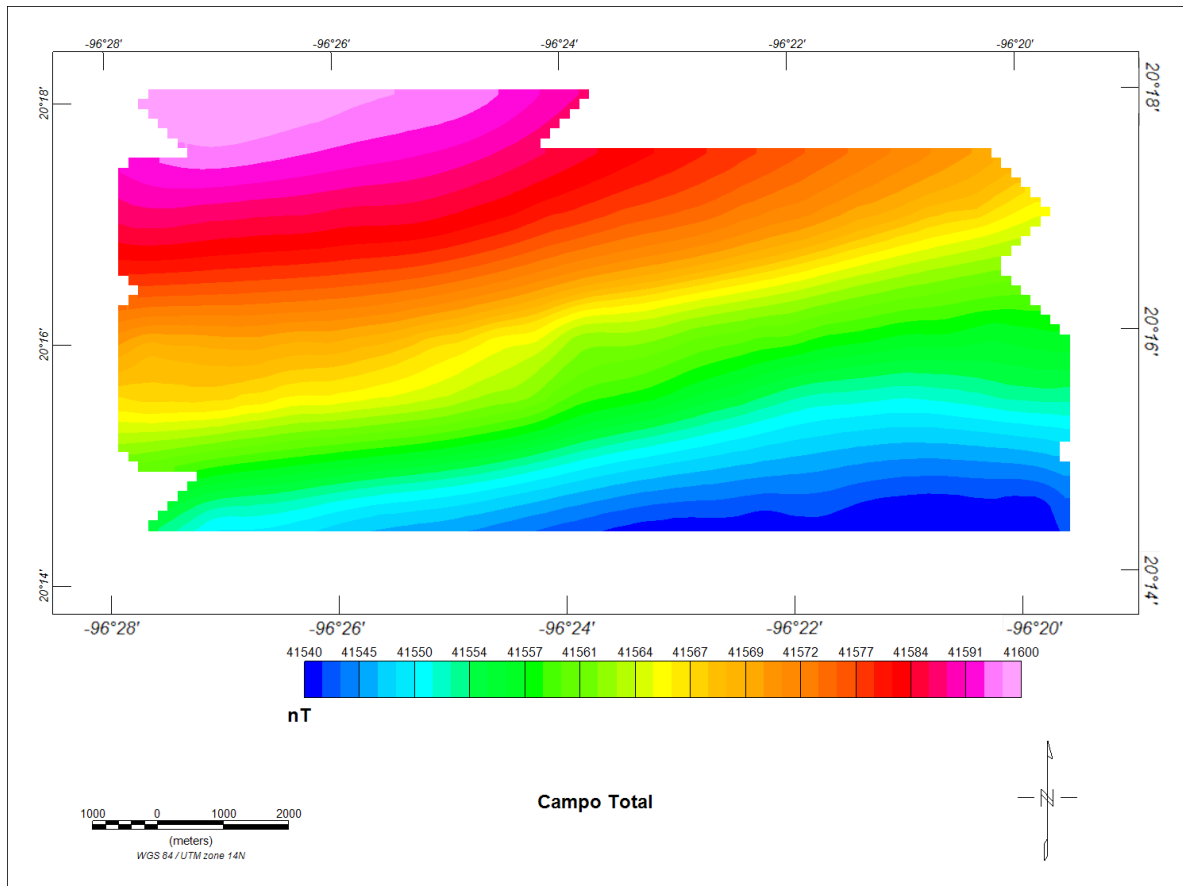


Figura 3.12. Campo geomagnético total, valores en [nT]

Para el procesamiento de los datos magnéticos se escribió un programa en MATLAB con la intención de manejar todos los datos obtenidos y aplicar las siguientes correcciones:

Reducción por Campo Magnético Teórico (IGRF). El IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) es el campo geomagnético internacional de referencia, un modelo matemático del campo geomagnético generado al interior de la Tierra debido principalmente a las corrientes eléctricas en la parte líquida del núcleo (Mandea & Korte, 2011). Debido a su naturaleza dinámica, el modelo matemático es publicado cada cinco años por la IAGA (*International Association of Geomagnetism and Aeronomy*) o Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía. El modelo más reciente es la generación IGRF-12 (Thébault et al., 2015) usada para el procesamiento de los datos de este trabajo, el campo obtenido se muestra en la Figura 3.13.

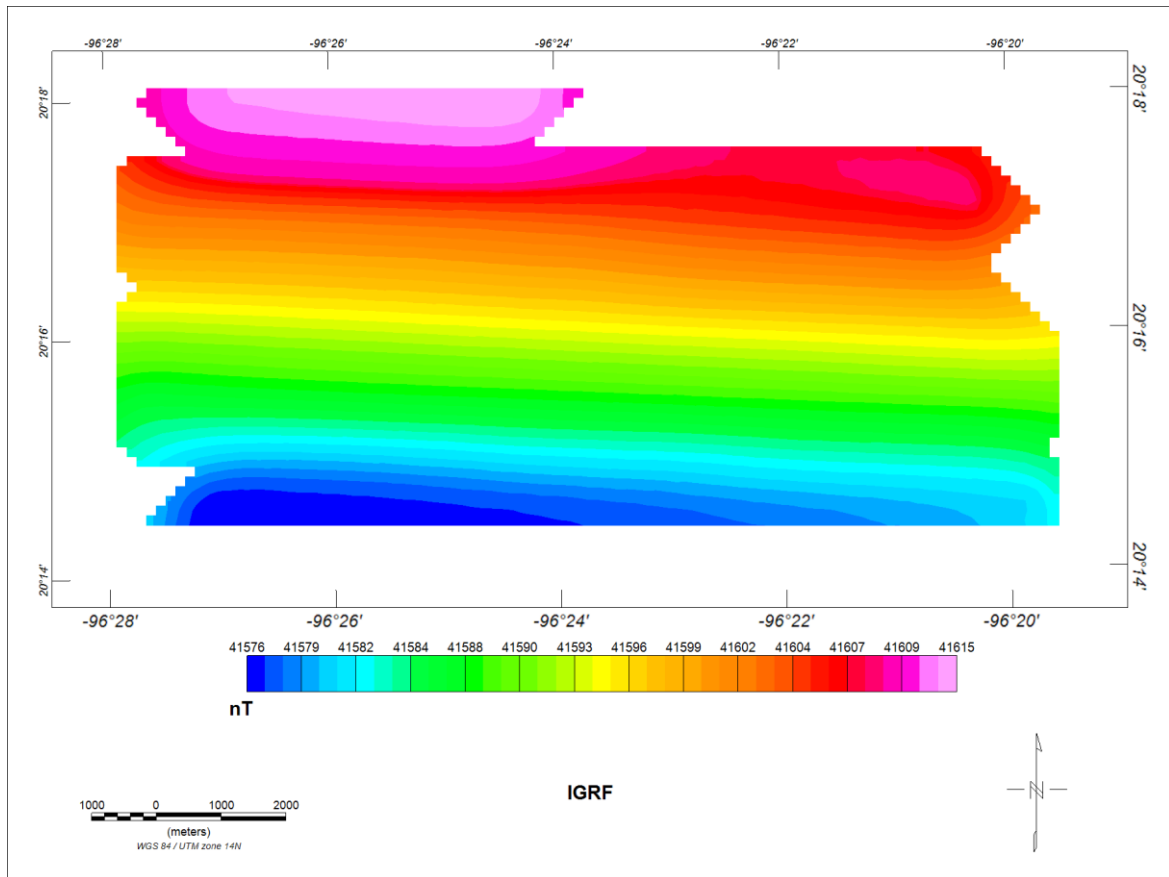


Figura 3.13. Campo geomagnético de referencia IGRF-12 de la zona de estudio, valores en [nT]

Corrección por rumbo del barco. El casco del barco genera un efecto de magnetización que afecta las mediciones de campo realizadas por el magnetómetro. Esta magnetización es dependiente del rumbo del barco, las características del campo geomagnético presente en la zona de adquisición, geometría del barco y de la posición relativa del magnetómetro respecto al barco. La fórmula para calcular la corrección por rumbo es descrita por Bullard & Mason (1961) y es:

$$F_Q = F + C_0 + C_1 \cos \theta + C_2 \cos(2\theta) + S_1 \sin \theta + S_2 \sin(2\theta)$$

Donde:

F_Q : Campo total en un punto Q

F : Campo observado

θ : Rumbo del barco

C_0, C_1, C_2, S_1, S_2 : Constantes dependientes de la geometría y las propiedades magnéticas del barco

El cálculo de las constantes de magnetización del buque oceanográfico Justo Sierra fueron calculadas anteriormente y presentadas en la tesis de maestría de Valle Hernández (2015) siguiendo el experimento descrito por Bullard & Mason (1961) y son:

$$C_0 = 12.38, \quad C_1 = 7.59, \quad C_2 = 0.54, \quad S_1 = -2.47, \quad S_2 = -1.21$$

Por lo que la corrección por rumbo del barco está dada por:

$$F_Q = F + 12.38 + 7.59 \cos \theta + 0.54 \cos(2\theta) - 2.47 \sin \theta - 1.21 \sin(2\theta)$$

Corrección por variación diurna. La radiación solar que recibe la Tierra genera corrientes en la ionósfera y magnetósfera que afectan el campo magnético total, la magnitud de la magnetización generada por el Sol depende de la latitud, estaciones del año y ciclo solar (Carrier, Pulkkinen, & Heinz, 2016).

La corrección por variación diurna es generalmente calculada tomando las mediciones de campo de una base u observatorio magnético fijo cercano a la región del levantamiento a lo largo del día. Sin embargo, al momento de la adquisición no se estableció una base y el observatorio magnético de Teoloyucán en el Estado de México, el observatorio más cercano, no registró datos para las fechas de la campaña GMET2011. Debido a esta falta de registros en estaciones fijas, la variación diurna fue estimada en base al método descrito por Buchanan, Scrutton, Edwards y Whitmarsh (1996) haciendo uso de los cruces en la navegación [Figura 3.14], en negro y verde el derrotero del barco a diferentes horas, en círculos naranja los puntos de cruce usados.

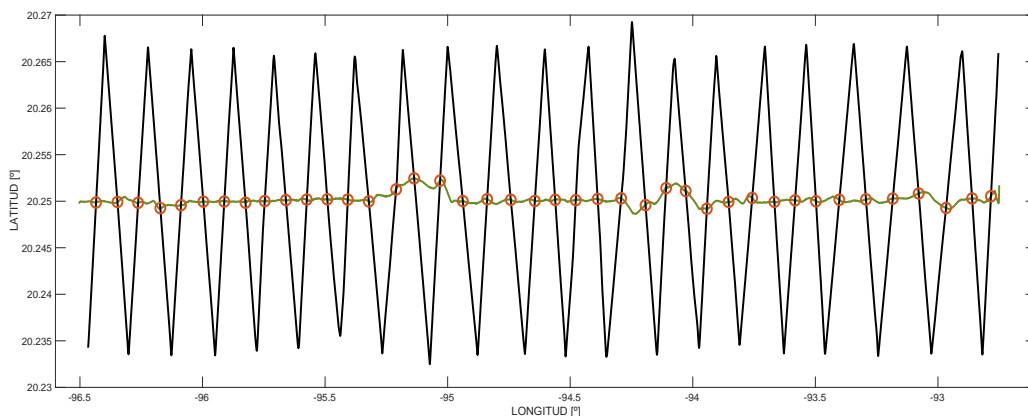


Figura 3.14. Cruces usados para el cálculo de la curva de variación diurna

La curva de variación diurna es obtenida a partir de los cruces entre los transectos de ida y regreso, aplicando la función *shape preserving interpolat* dentro de las herramientas de figuras en MATLAB. A partir de la curva obtenida [Figura 3.15] son calculados los valores de variación diurna para la zona de interés.

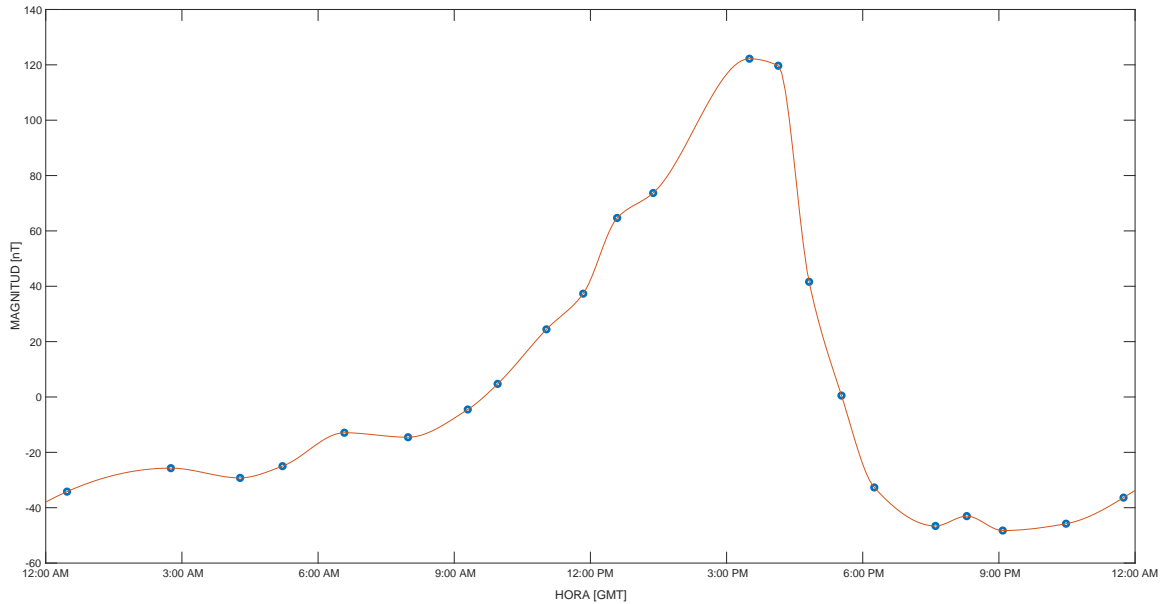


Figura 3.15. Curva estimada de la variación diurna durante la campaña GMET11

La carta de anomalía magnética es generada utilizando únicamente los perfiles con direcciones E-W y W-E.

3.2.3. Perfiles Sísmicos

La naturaleza de adquisición de los perfiles sísmicos usados en este trabajo de investigación propicia la presencia de ruido, no sólo por la columna de agua como tal sino también por la fauna y sedimentos dispersos en el agua, condiciones atmosféricas y velocidad de adquisición por lo que es necesario optimizar la señal aplicando diversos filtros y módulos en el software nativo de la empresa fabricante de las ecosondas: TOPAS Replay.

Los módulos utilizados (Kongsberg, TOPAS PS 18 Parametric Sub-botom Profiler, 2005) para el registro de datos sísmicos fueron:

Matched Filter, mejora la relación señal-ruido

"AGC" o Control Automático de la Ganancia, optimiza la visualización de datos, acentuando trazas con menor energía y atenuando aquellas con mayor energía logrando así un efecto de filtrado que reduce el ruido y evita reverberaciones.

“Bottom Tracker”, usado para la búsqueda y detección del lecho marino.

Amplitud Instantánea, acentúa horizontes en donde existe algún tipo de cambio litológico.

La Figura 3.16 presenta una comparación del ecograma del perfil 10; la imagen A muestra el perfil al momento de la adquisición sin filtros aplicados; y la imagen B es el ecograma resultado de aplicar los módulos mencionados anteriormente.

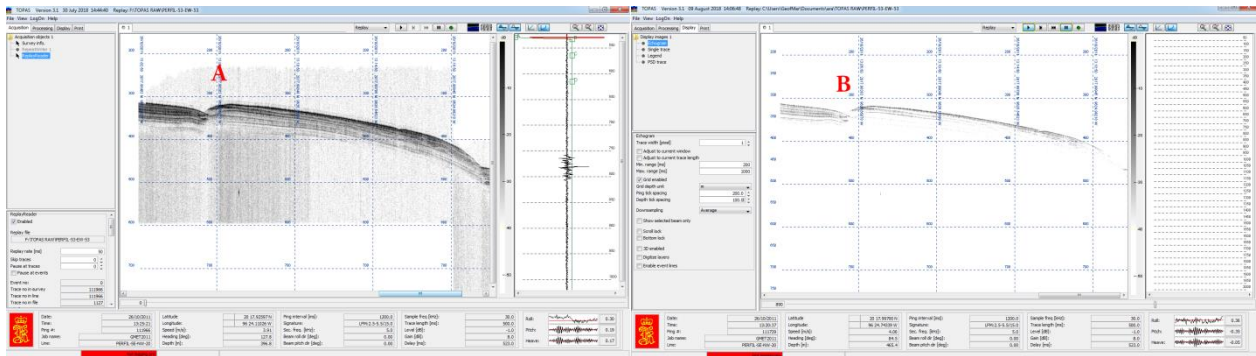


Figura 3.16. Sección sísmica en TOPAS Replay

Los perfiles procesados son almacenados en formato *seg* para facilitar la importación de los datos a cualquier software especializado. En este estudio los datos son procesados usando SonarWiz. La Figura 3.17 muestra un resumen visual en cuatro ventanas del tratamiento aplicado a los perfiles sísmicos del estudio:

- (1) Perfil importado en formato *.seg*, la línea roja representa la estimación inicial de fondo oceánico hecha por el software, toma la forma de la ventana de adquisición.
- (2) Después de unos ajustes es posible seguir el fondo real y hacer modificaciones manualmente según sea necesario.
- (3) En la sección de apariencia se modifican los valores de ganancia y se activa la instrucción de blanqueamiento de la columna de agua.
- (4) Perfil resultado.

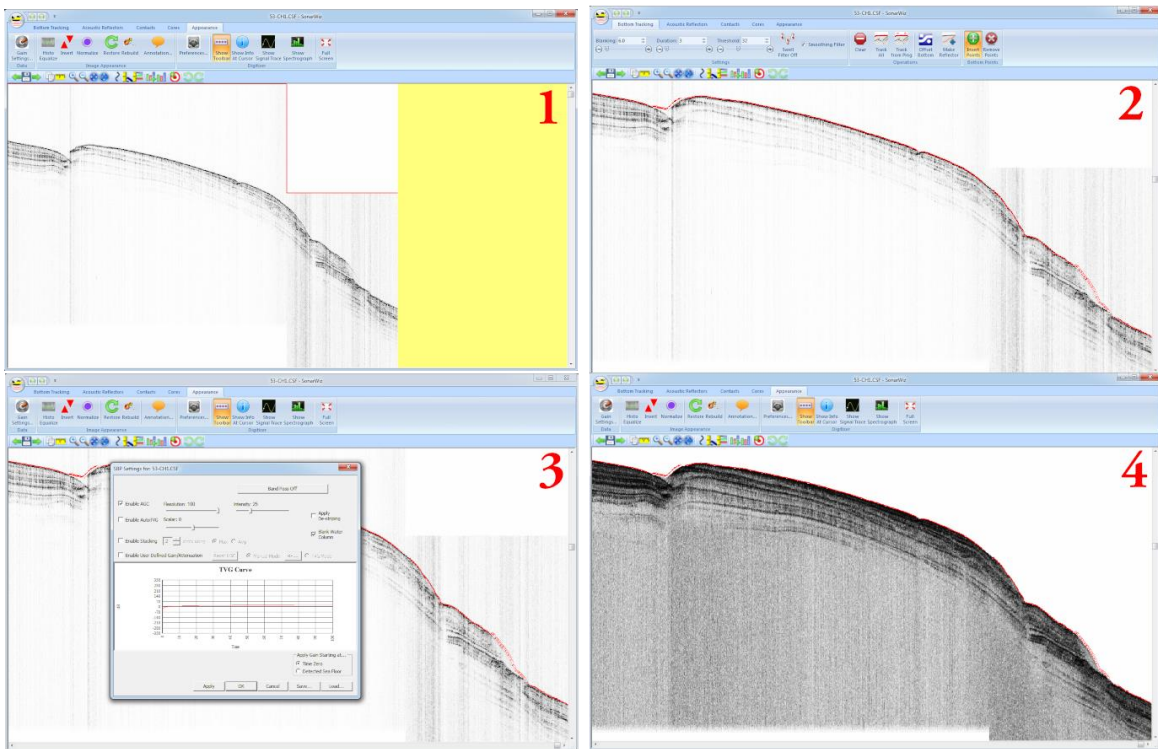


Figura 3.17. Metodología de procesamiento de secciones sísmicas en SonarWiz

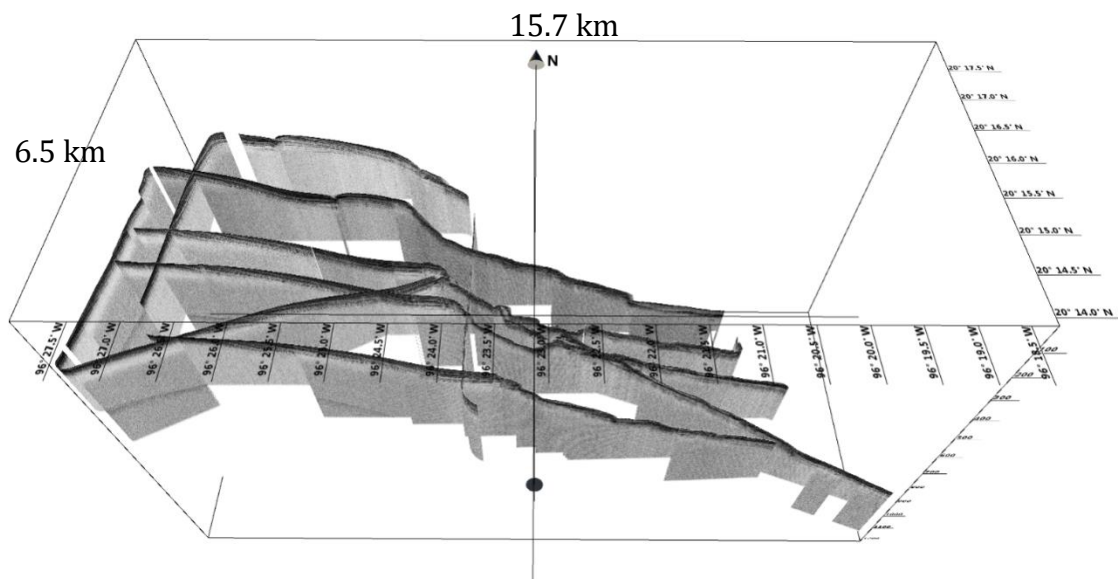


Figura 3.18. Presentación 3D de los perfiles sísmicos de alta resolución registrados en la zona de estudio

La Figura 3.18 muestra un enjambre de secciones sísmicas, usando el software SonarWiz en escala de colores "grey bipolar" para una mejor visualización de los perfiles. Después de estos pasos, usando este enjambre se inició el análisis sismoestratigráfico que se presenta en la sección de resultados.

4. RESULTADOS

4.1. *Relieve batimétrico*

En el relieve batimétrico de la zona de estudio [Figura 4.1] se observan profundidades de 170 a 950 m; la zona somera forma parte de la plataforma continental y se extiende hasta unos 35 km de la costa del estado de Veracruz.

La diferencia de profundidades al pie de talud respecto de la plataforma continental varía entre 250 m y 350 m, la orientación de sedimentación dominante a partir del talud continental es SW-NE incluyendo un cañón submarino en la parte central del levantamiento y que aumenta su ancho hacia zonas más profundas, con diferencia de profundidades desde 100 m hasta una profundidad máxima de 930 m.

También la Figura 4.1 (recuadro negro) muestra una estructura en forma de falla desde la parte noroeste del levantamiento que atraviesa la plataforma continental y se trunca en el quiebre con el talud continental de orientación NW-SE, donde la falla cruza los perfiles 10, 5 y 4 (de norte a sur) en un rango de profundidades de 350 m. A pesar de no haber realizado la corrección por escoramiento del barco, la estructura no se ve afectada ya que su orientación no coincide con la orientación específica de levantamiento de ninguno de los perfiles que atraviesa. Los datos batimétricos obtenidos no muestran una continuación evidente de la estructura más allá de la plataforma continental.

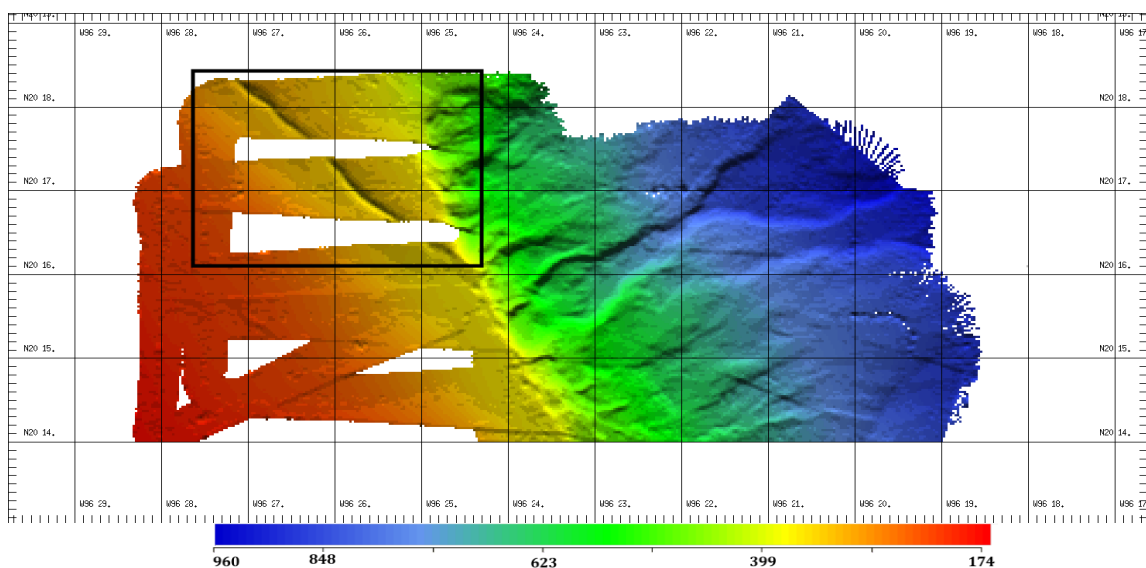


Figura 4.1. *Relieve batimétrico obtenido*

4.2. Estructuras someras del subsuelo

La interpretación de los perfiles mostrados en la Figura 4.2 y tomando en cuenta el relieve batimétrico sobre los perfiles se reporta una descripción detallada de los perfiles 10, 5 y 4 con orientación W-E, ubicados en la zona noroeste [Figura 4.3]. De norte a sur, el perfil 10 es el primer perfil en el que es posible observar la falla en estudio. El siguiente perfil 5 al igual que el perfil 4 muestran que el subsuelo es afectado por un corte de falla. Los perfiles 9 y 11, con orientación N-S, son utilizados para realizar una correlación de las estructuras en el subsuelo.

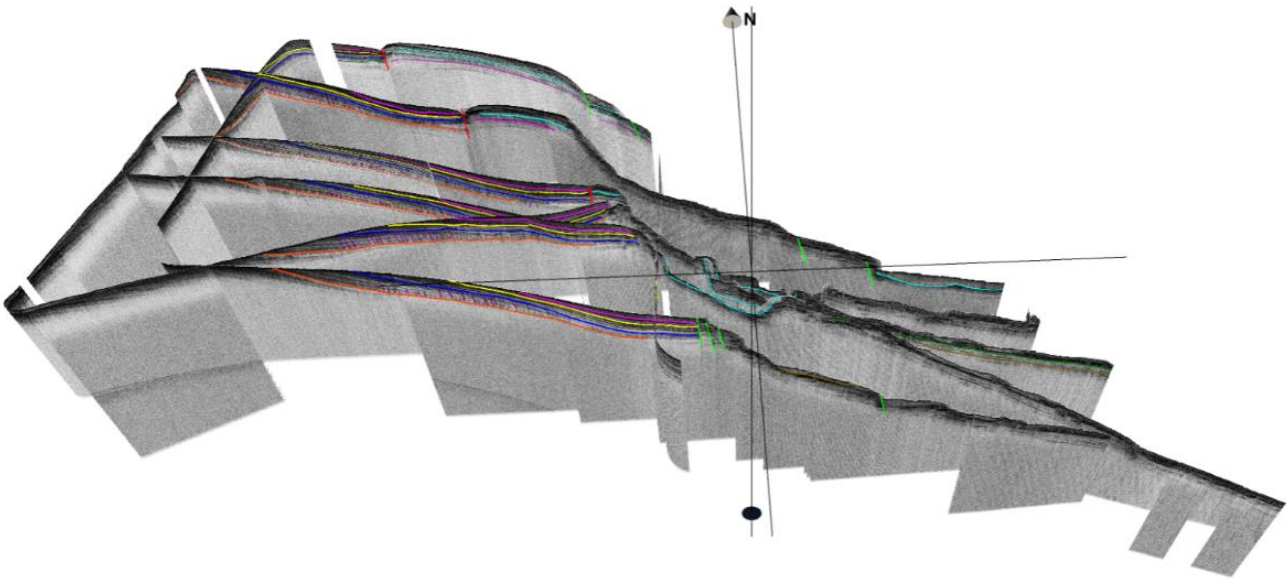


Figura 4.2. Representación 3D de las secciones sísmicas interpretadas

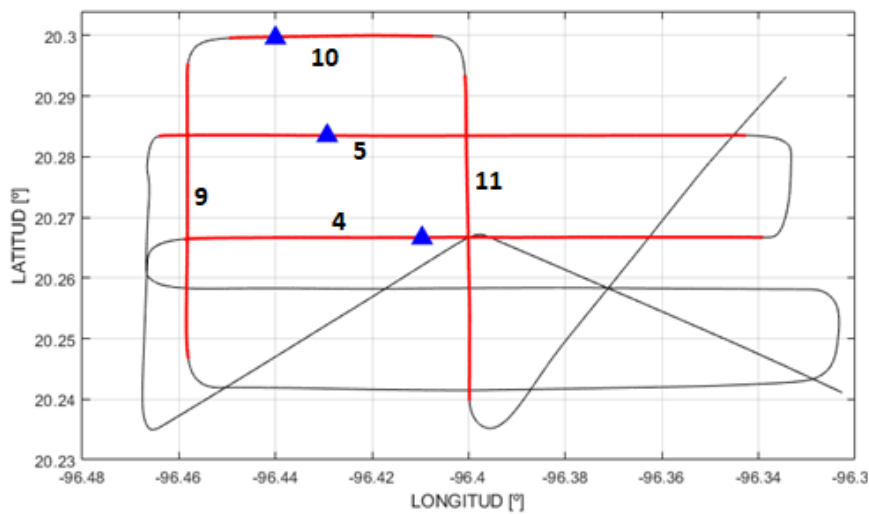


Figura 4.3. Derrotero de adquisición. En rojo los perfiles a analizar, en azul los puntos de cada perfil en los que se observó la falla de interés

Perfil 10

La sección sísmica del perfil 10 [Figura 4.4] tiene una longitud de 5.4 km con profundidades de 313 m en la plataforma continental hasta 570 m en el inicio del talud. El perfilador sísmico alcanzó una penetración de hasta 74 m en donde se pueden observar horizontes sísmicos de 10 a 15 m de espesor. La definición de los estratos y su espesor son concordantes con el ambiente de sedimentación de plataformas continentales.

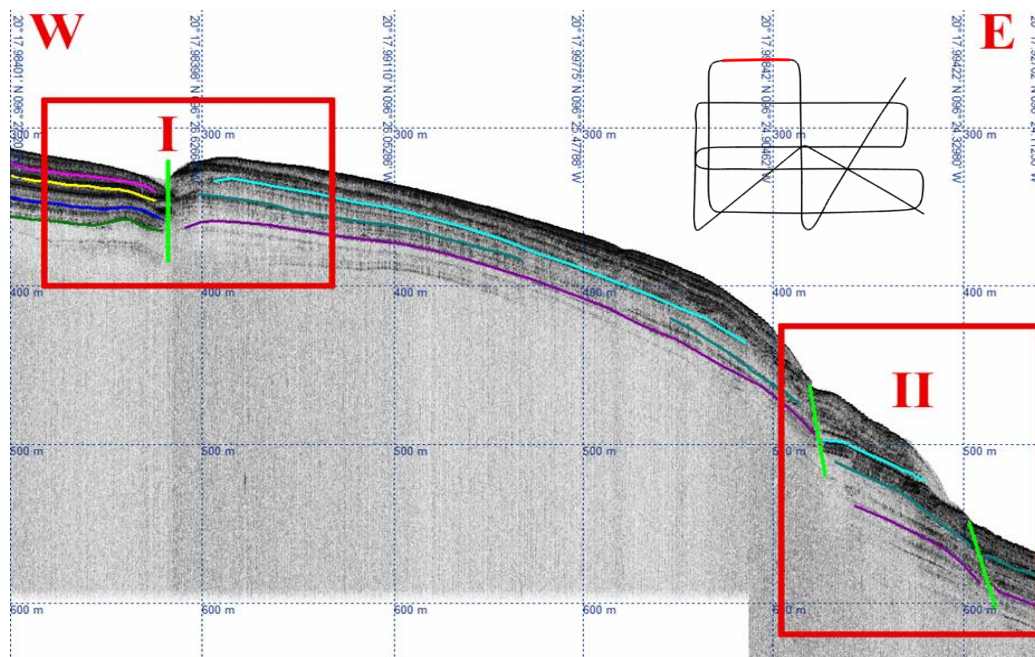


Figura 4.4. Sección sísmica del perfil 10

La continuidad lateral de los horizontes reflectados en la plataforma continental se ven afectados por la falla A [Figura 4.5]; los horizontes sísmicos a la derecha de la falla presentan una diferencia de espesores respecto a los horizontes a la izquierda de la falla. Esto indica que los estratos han sido afectados por una falla.

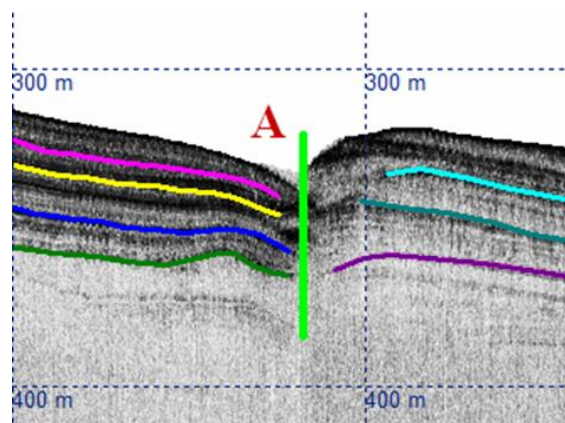


Figura 4.5. Recuadro I de la sección sísmica del perfil 10

Mientras que en el talud continental, se observan dos fallas lístricas son observadas que posiblemente son generadas por el movimiento de masas por gravedad [Figura 4.6].

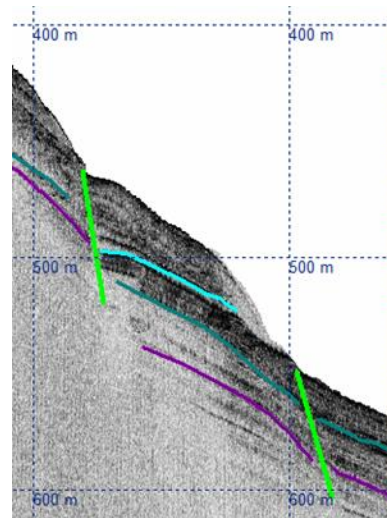


Figura 4.6. Recuadro II de la sección sísmica del perfil 10

Perfil 5.

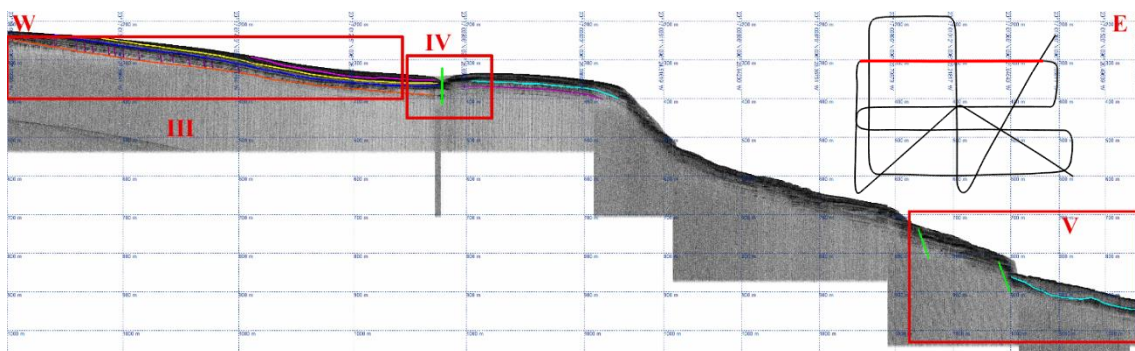


Figura 4.7. Sección sísmica del perfil 5

La sección sísmica del perfil 5 [Figura 4.7] tiene una longitud de 13.5 km con profundidades de 220 a 920 m desde la plataforma continental hasta el pie de talud. La sección muestra horizontes sísmicos hasta 60 m de profundidad con espesores entre 8 m y 12 m.

En la parte más al oeste del perfil 5 [Figura 4.8] se puede distinguir en la capa inferior que contiene múltiples estructuras de fracturamiento.

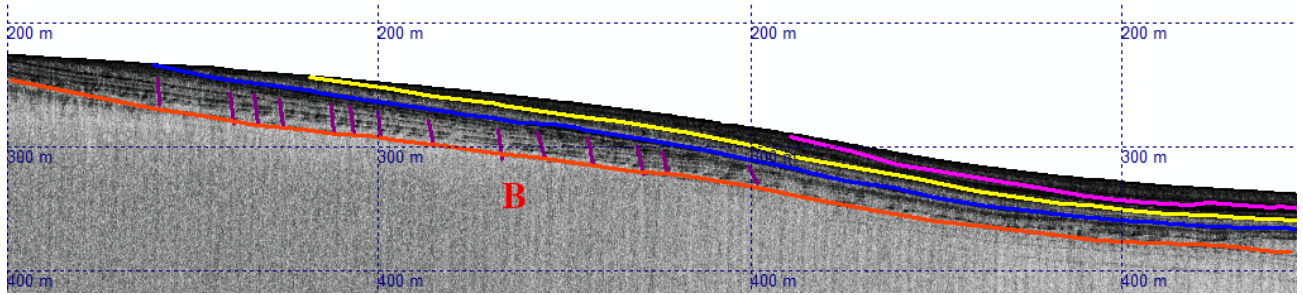


Figura 4.8. Recuadro III de la sección sísmica del perfil 5

La Figura 4.9 en la plataforma continental muestra una progradación de sedimentos en dirección de las zonas más profundas. La falla A, así como fallas lístricas generadas por gravedad pudiesen ser consecuencia de la carga de sedimentos turbidíticos en el talud continental hasta el inicio del cañón C, al pie del talud [Figura 4.10], donde hay capas de sedimentos entre 20 a 35 m de espesor y se extiende casi 3 km.

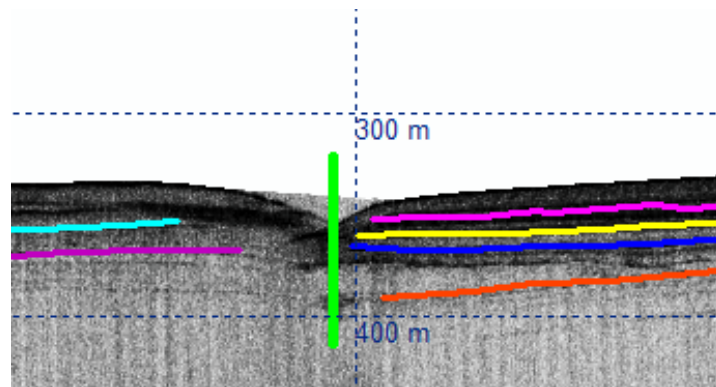


Figura 4.9. Recuadro IV de la sección sísmica del perfil 5

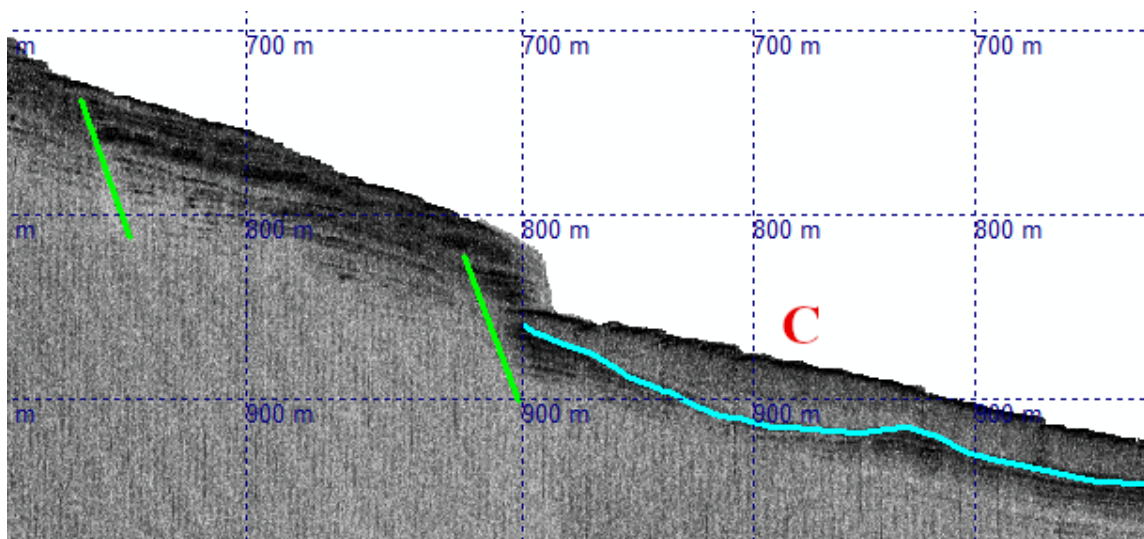


Figura 4.10. Recuadro V de la sección sísmica del perfil 5

Perfil 4.

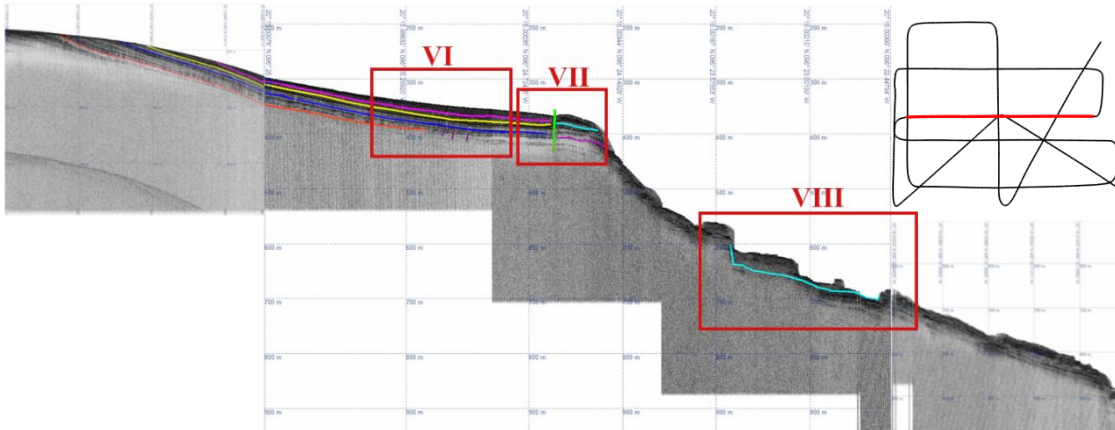


Figura 4.11. Sección sísmica del perfil 4

La Figura 4.11 muestra la sección sísmica del perfil 4 que tiene una longitud de 13.5 km con rangos de profundidades a partir de 210 m hasta 810 m en el pie del talud. La sección muestra que la ecosonda alcanzó una penetración de hasta 52 m haciendo posible observar capas con espesores de 4 a 9 m.

La plataforma continental presenta una progradación de sedimentos que llegan hasta el quiebre de la plataforma con el talud y donde se observa que es interrumpida por la falla A [Figura 4.12]. Pero en el caso de los estratos en el talud continental su estratificación es afectada presumiblemente por las turbiditas que fluyeron a través del cañón C [Figura 4.13], estimando un ancho de 2,170 m. La Figura 4.14 muestra la capa de sedimentos más profunda en la plataforma continental donde presenta discontinuidades presumiblemente asemejan múltiples fracturas.

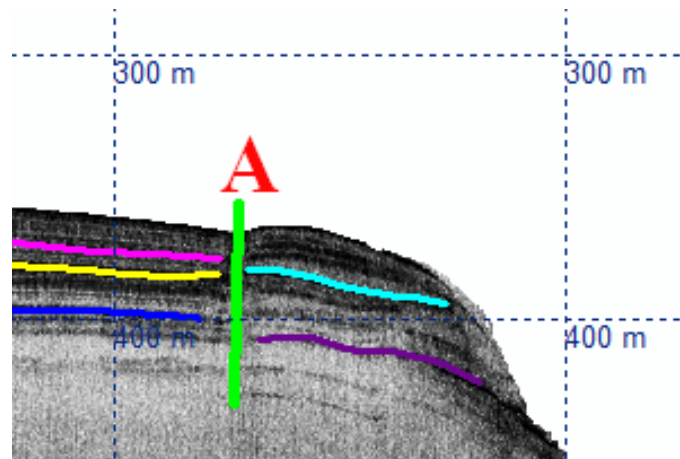


Figura 4.12. Recuadro VII de la sección sísmica del perfil 4

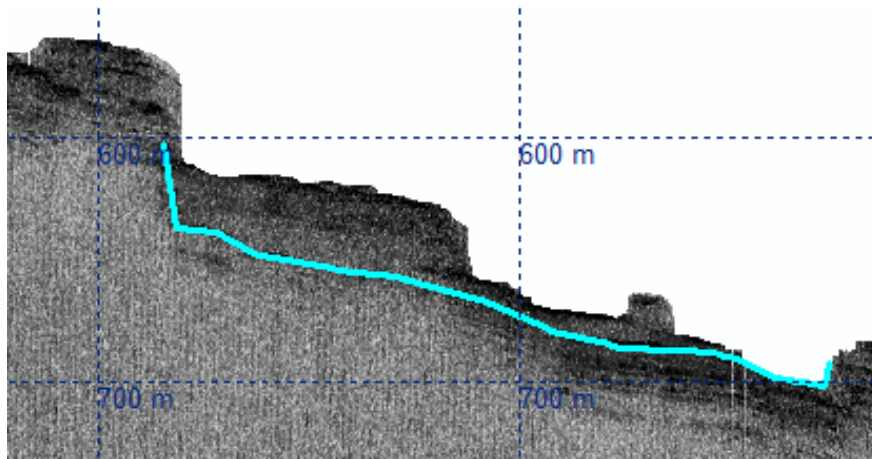


Figura 4.13. Recuadro VIII de la sección sísmica del perfil 4

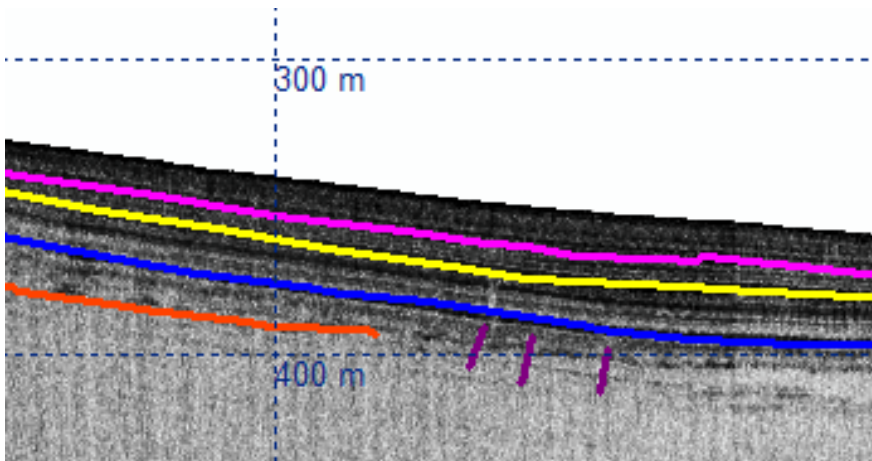


Figura 4.14. Recuadro VI de la sección sísmica del perfil 4

Perfil 9.

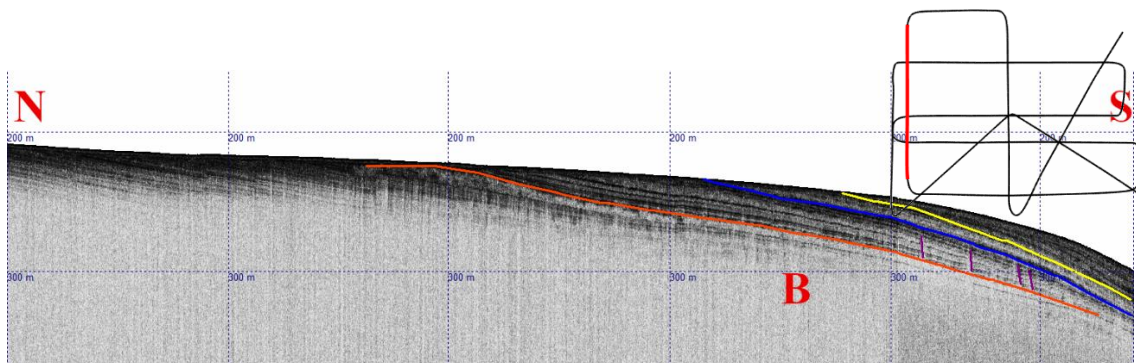


Figura 4.15. Sección sísmica del perfil 9

El perfil 9 en la Figura 4.15 tiene una longitud de 5.4 km con una penetración de hasta 250 m y entre profundidades de 215 m a 295 m. De norte a sur, se observa una progradación de sedimentos con 3 reflectores que aumentan en profundidad hacia

el sur. También la capa inferior muestra que el estrato es fracturado como lo presentan los perfiles 4 y 5.

Perfil 11.

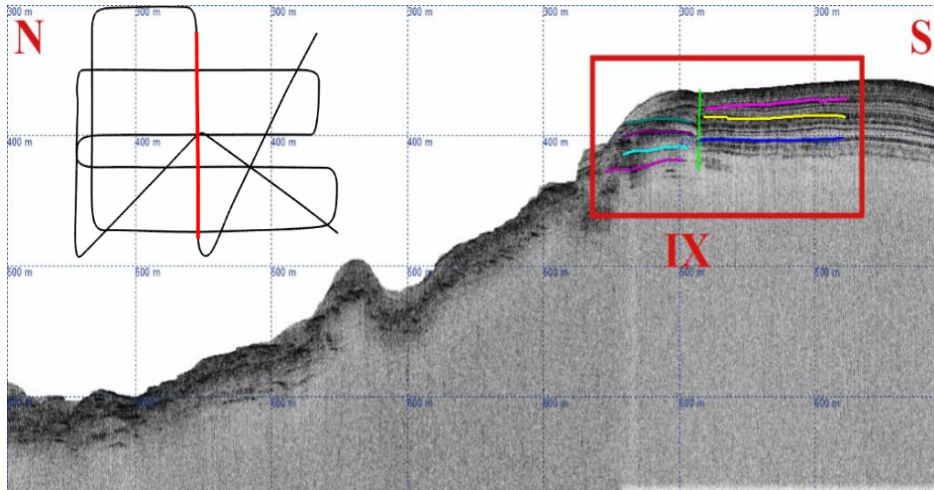


Figura 4.16. Sección sísmica del perfil 11

El perfil 11 [Figura 4.16] tiene una longitud de 6.6 km, donde muestra capas de sedimentos hasta 65 m de penetración en la plataforma continental. Mientras que las capas en el talud continental la estratificación es desorganizada a mayores profundidades.

La Figura 4.17 da un acercamiento de una falla existente en la plataforma continental cercana al quiebre de la plataforma con el talud.

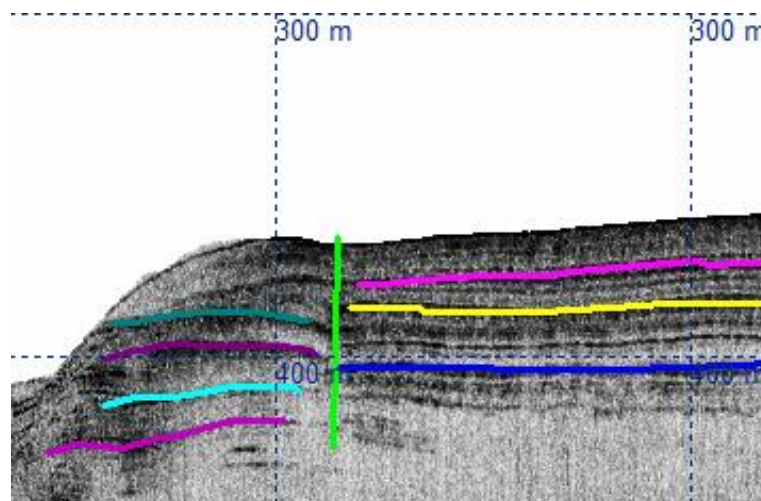


Figura 4.17. Recuadro IX de la sección sísmica del perfil 11

4.3. Anomalía magnética

La anomalía magnética obtenida después de aplicar las correcciones correspondientes, es concordante dentro del rango de valores de anomalías magnéticas publicadas por el NCEI (National Centers for Environmental Information) de la NOAA (NOAA, 2017), en las cuales son predominantemente negativas.

El mapa resultante de la interpolación de las magnitudes de la anomalía [Figura 4.18] muestra una fuerte influencia en la interpolación entre las líneas de adquisición, lo que genera un artefacto hacia el flanco oriental, en la forma de un bajo magnético con magnitudes entre -173 y -160 nT. El mapa muestra también dos altos magnéticos en los flancos hacia el norte (N) y hacia el sur (S) con magnitudes que van de 10 a 49 nT; sin embargo, ninguno de los dos pueden ser vinculados a una firma magnética que pudiese ser asociados directamente con altos y bajos magnéticos resultados de un contraste con las estructuras sedimentarias en el quiebre de la plataforma con el talud continental.

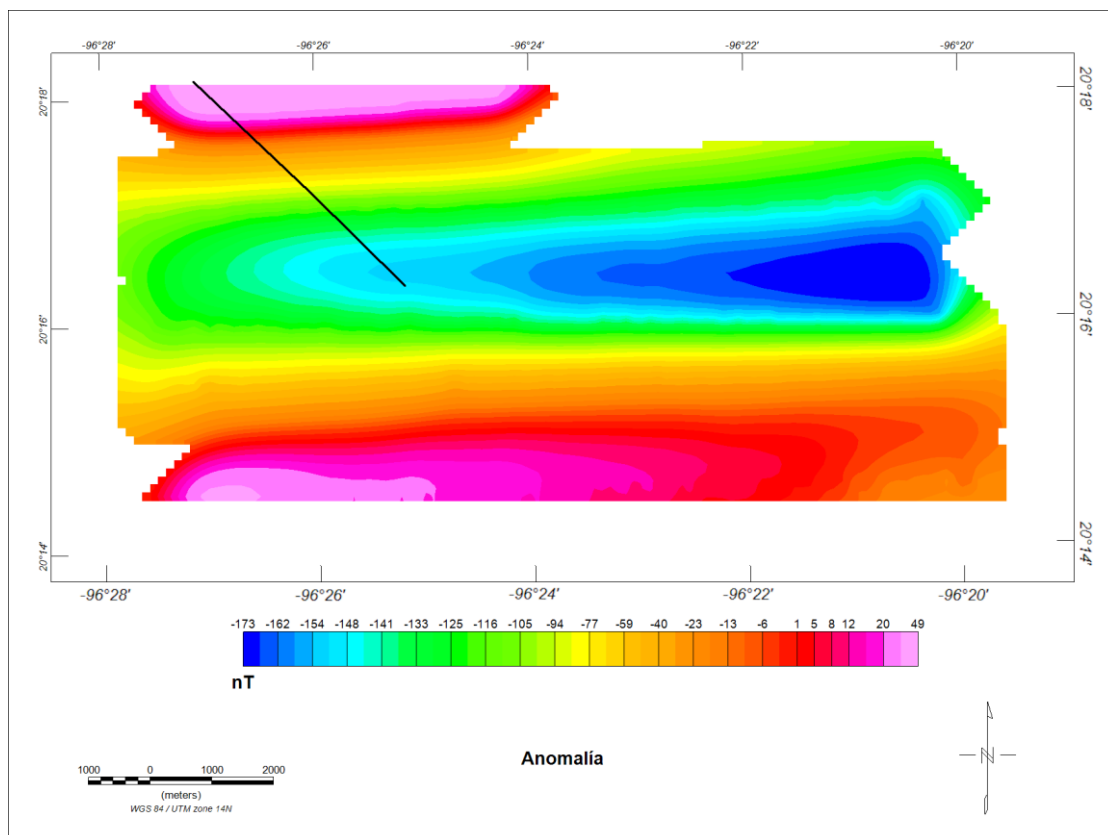


Figura 4.18. Interpolación de la anomalía magnética de la zona de interés, valores en [nT]. En negro el lineamiento de la falla.

5. CONCLUSIONES

El relieve batimétrico del área de estudio muestra la estructura aparente de una falla que ha sido el enfoque de este trabajo de investigación, con una extensión de aproximadamente 7 km y atraviesa tres transectos ubicados al norte del levantamiento que registró datos de batimetría multihaz, perfiles sísmicos de alta resolución y valores de campo magnético total. En el área del levantamiento, la plataforma continental no muestra otro rasgo geológico; el relieve del talud continental muestra un cañón submarino que aumenta de tamaño en dirección SW-NE.

El análisis de las estructuras someras del subsuelo observadas en los perfiles sísmicos de alta resolución, con geometría sedimentaria diferente en ambos bloques de la falla "A" indica que se trata de una falla ubicada dentro del sistema extensional Quetzalcóatl. La falla afecta los estratos de sedimentos en la plataforma continental. El lecho marino de la plataforma continental y su subsuelo no afectado por la falla "A" mantiene los estratos homogéneos y sin alteraciones, a excepción del último horizonte sísmico en donde se observan desviaciones que pudieran interpretarse como fracturas. En el talud continental, su sedimentación no está bien definida y se distingue la presencia de un cañón submarino con sedimentos de relleno. Este cañón submarino también fue observado en el relieve batimétrico.

La anomalía magnética fue obtenida utilizando únicamente los perfiles E-W y W-E y se ve afectada por la interpolación entre ellos. El resultado es una anomalía cuyos valores son reflejo de la corteza terrestre adelgazada debido a la naturaleza del acúñamiento de los márgenes, tampoco se observa una anomalía magnética que pudiese asociarse a la presencia de una falla estructural. Por lo que se deduce que se trata de una falla superficial que afecta solo las capas de sedimentos someras.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Andreani, L., Rangin, C., Martínez Reyes, J., Le Roy, C., Aranda García, M., Le Pichon, X., & Peterson Rodriguez, R. (2008). The Neogene Veracruz fault: evidences for left-lateral slip along the southern Mexico block. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 195-208.
- Buchanan, S. K., Scrutton, R. A., Edwards, R. A., & Whitmarsh, R. B. (1996). Marine magnetic data processing in equatorial regions off Ghana. *Geophysical Journal International* 125, 123-131.
- Bullard, E. C., & Mason, R. G. (1961). The magnetic field astern of a ship. *Deep-Sea Research, Vol 8*, 20-27.
- Carrier, B. M., Pulkkinen, A., & Heinz, M. (2016). Recognizing Geomagnetic Storms in Marine Magnetometer Data: Toward Improved Archaeological Resource Identification Practices. *STAR: Science & Technology of Archaeological Research*, 1-14.
- CNH. (2015). *Golfo de México, Aguas Profundas Norte*. México: Centro Nacional de Información de Hidrocarburos.
- Figueroa Albornoz, L. (2013). *Estudio Tectono-Estratigráfico de la Cuenca Transtensional en el Margen de Sonora Frente al Rift de Guaymas, Golfo de California, México*. Ciudad de México: Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Franco, S. I., Canet, C., Iglesias, A., & Valdés González, C. (2013). Seismic activity in the Gulf of Mexico. A preliminary analysis. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. 65*, 447-455.
- Gadallah, M., & Fisher, R. (2009). *Exploration Geophysics*. Houston, TX: Springer.
- Geometrics, I. (2001). *G-877 Marine Magnetometer Operation Manual*. San Jose, California: Geometrics.

- Kongsberg. (2002). *Kongsberg Simrad EM 300, Multibeam Echo Sounder Operation Manual*. Norway.
- Kongsberg. (2005). *TOPAS PS 18 Parametric Sub-bottom Profiler*. Stjørdal, Norway: Kongsberg.
- Le Roy, C., Rangin, C., Le Pichon, X., Thi Ngoc, H. N., Andreani, L., & Aranda García, M. (2008). Neogene crustal shear zone along the western Gulf of Mexico margin and its implications for gravity sliding processes. Evidences from 2D and 3D multichannel seismic data. *Bulletin de la Societe Geologique de France Vol 179*, 175-185.
- Manda, M., & Korte, M. (2011). *Geomagnetic Observations and Models*. Springer.
- Marton, G., & Buffler, R. T. (1994). Jurassic Reconstruction of the Gulf of Mexico Basin. *International Geological Review Vol. 36*, 545-586.
- Moore, G. W., & del Castillo, L. (1974). Tectonic Evolution of the Southern Gulf of Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 607-618.
- NOAA. (2017). *EMAG2: Earth Magnetic Anomaly Grid (2-arc-minute resolution)*. Obtenido de National Centers for Environmental Information: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/emag2.html>
- Ortega Gutiérrez, F., Sedlock, F. R., & Speed, R. C. (1994). Phanerozoic tectonic evolution of Mexico. En R. C. Speed, *Phanerozoic evolution of North American continent. Ocean transitions: Geological Society of America, Decade of North American Geology, Continent-Ocean Transect Volume* (págs. 265-306). Boulder, Colorado, U.S.A.: Geological Society of America.
- PEMEX. (2010). *Provincias Geológicas de México*. México: Pemex Exploración y Producción, Subdirección Técnica de Exploración.
- Prost, G., & Aranda García, M. (2001). Tectonics and Hydrocarbon Systems of the Veracruz Basin, Mexico. En C. Bartolini, R. T. Buffler, & A. Cantú Chapa, *The Western Gulf of Mexico Basin: Tectonics, Sedimentary Basins and Petroleum*

Systems (págs. 271-291). Tulsa, Oklahoma, U.S.A.: The American Association of Petroleum Geologists.

Rosales Rodríguez, J. (2014). *Profundidad de la base de la fuente magnética y estructura termal del Golfo de México*. Ciudad de México: Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México.

Salomón Mora, L. E., Aranda García, M., & Román Ramos, J. R. (2009). *Contractional Growth Faulting in the Mexican Ridges, Gulf of Mexico*. Poza Rica, Veracruz: Petróleos Mexicanos, Exploración y Producción.

Salvador, A. (1991). *The Gulf of Mexico Basin: The Geology of North America, Vol. J*. The Geological Society of America.

Telford, W., Geldart, L., & Sheriff, R. (1990). *Applied Geophysics, Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge, U.K.* Cambridge, U.K.: Cambridge University Press.

Thébault et al., E. (2015). International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation. *Earth, Planets and Space*, 67-79.

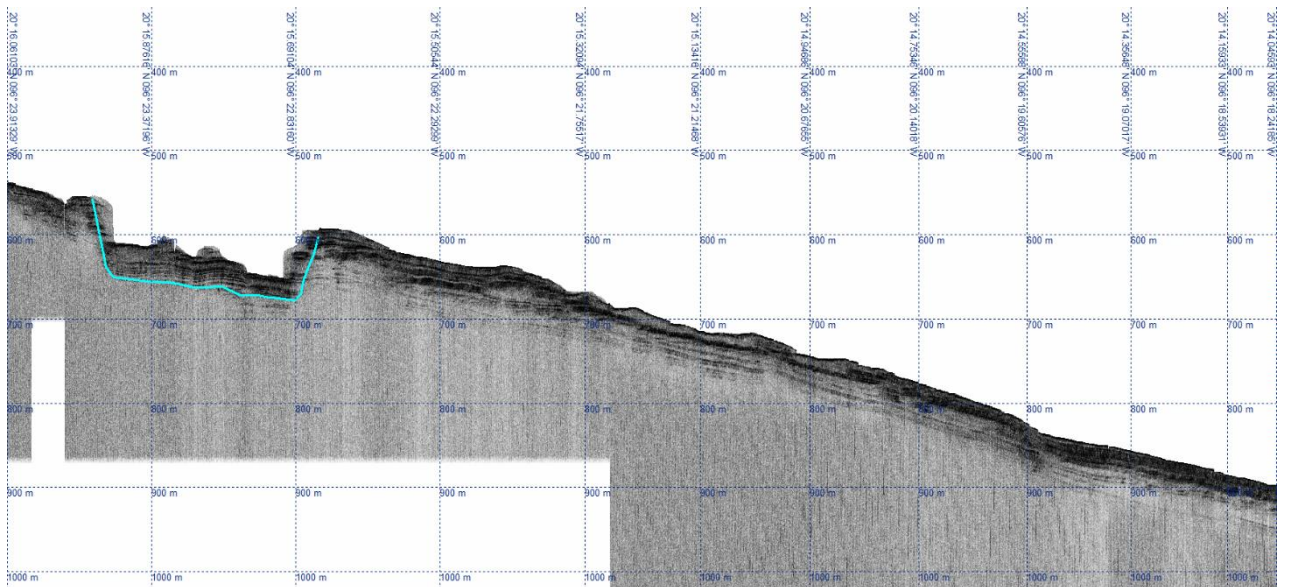
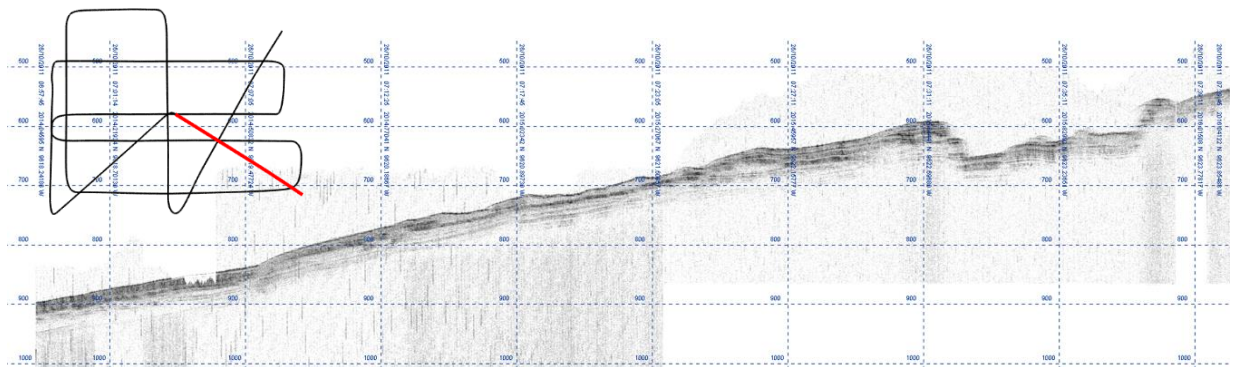
Valle Hernández, S. (2015). *Evolución Sedimentaria y Tectónica del Polígono Oriental en el Golfo de México con Batimetría Multihaz, Perfiles Sísmicos de Alta Resolución y Datos Magnéticos Marinos*. Ciudad de México: Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.

7. ANEXO A.

Secciones sísmicas obtenidas a lo largo de los perfiles que se registraron durante el levantamiento en la zona de estudio. Todos los perfiles se presentan primero en la ventana de adquisición de TOPAS y sin procesar, con la dirección de adquisición original y procesados en una segunda imagen invertidos de ser necesario para mostrarlos en direcciones W-E o N-S.

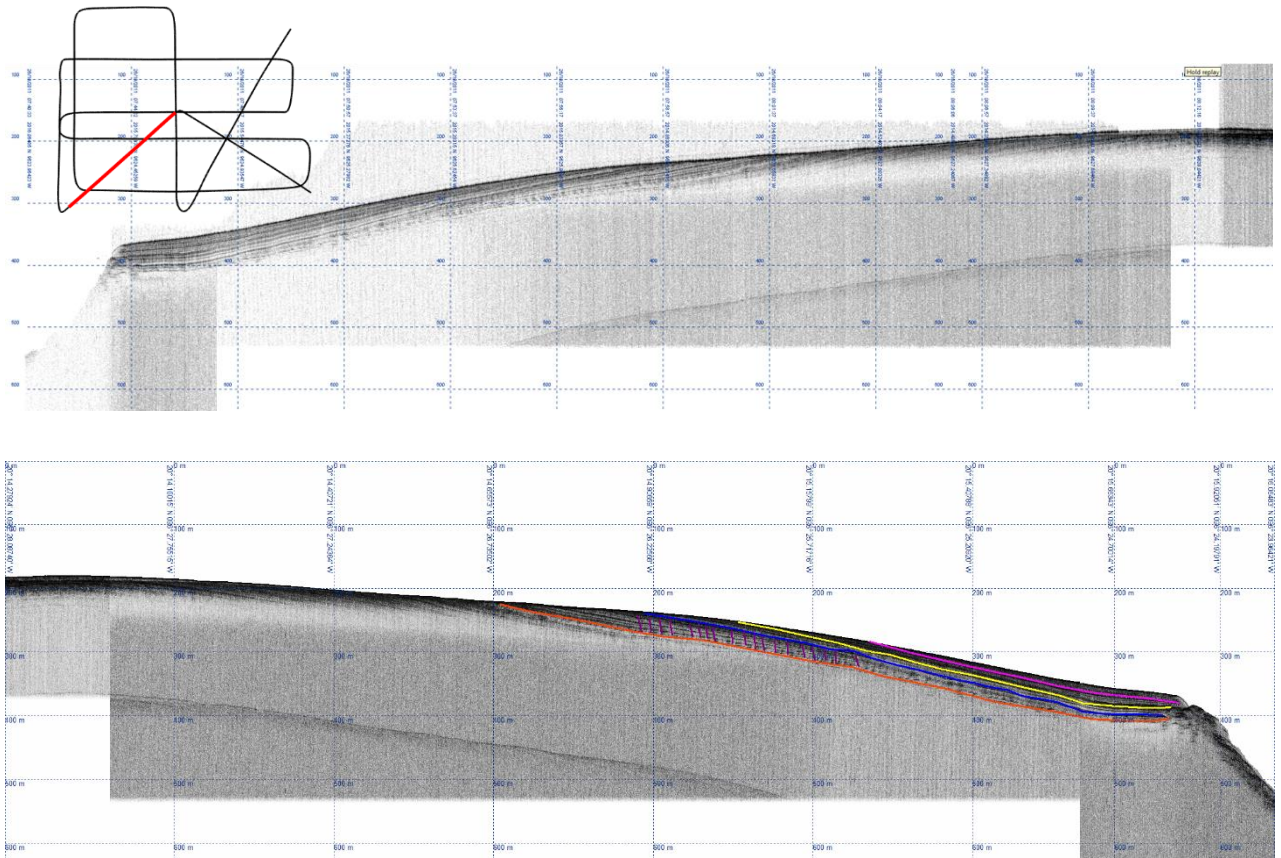
Perfil 1.

Adquirido en dirección SE-NW



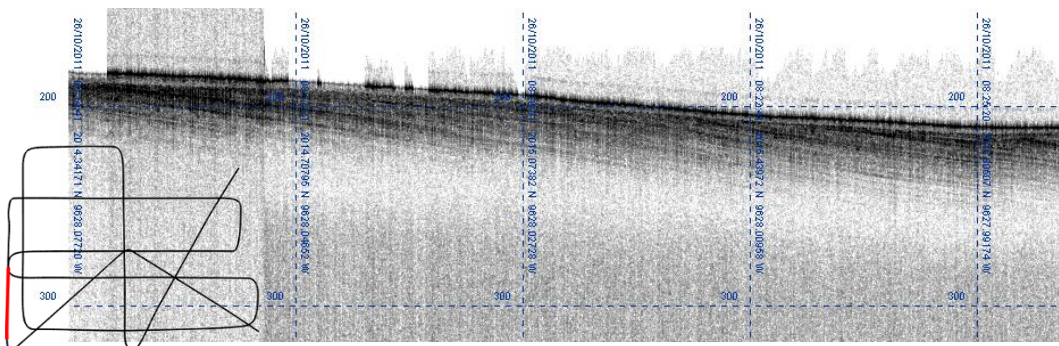
Perfil 2.

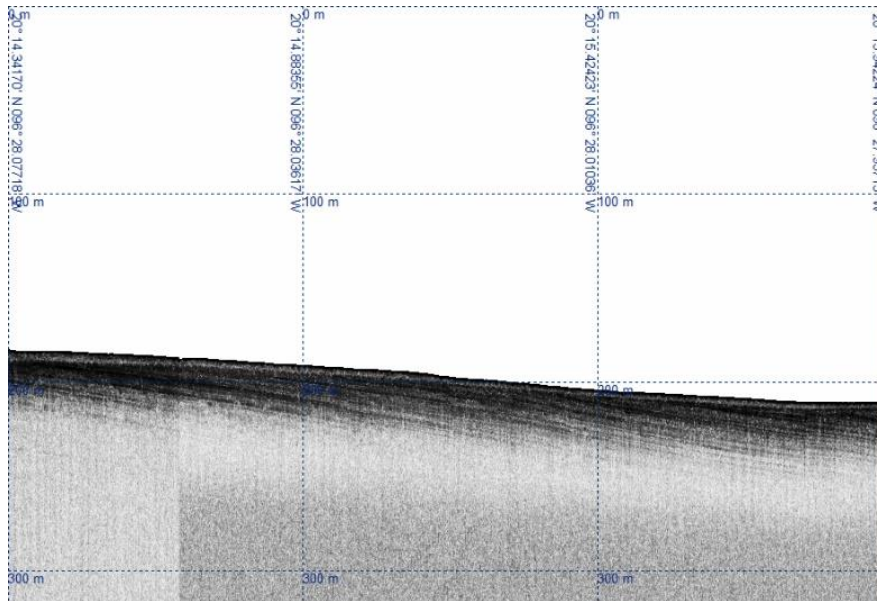
Adquirido en dirección NE-SW



Perfil 3.

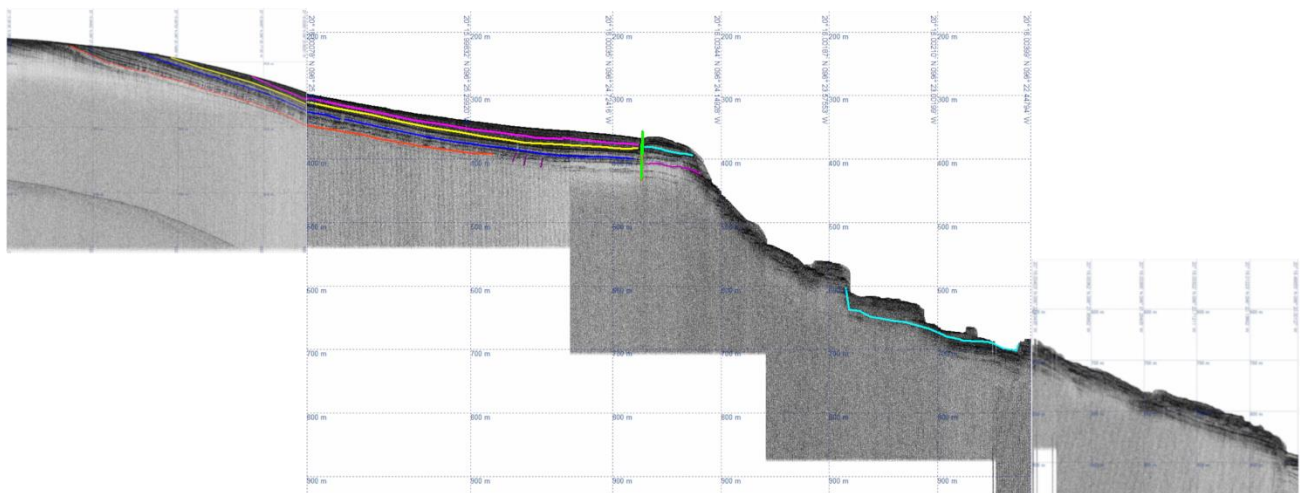
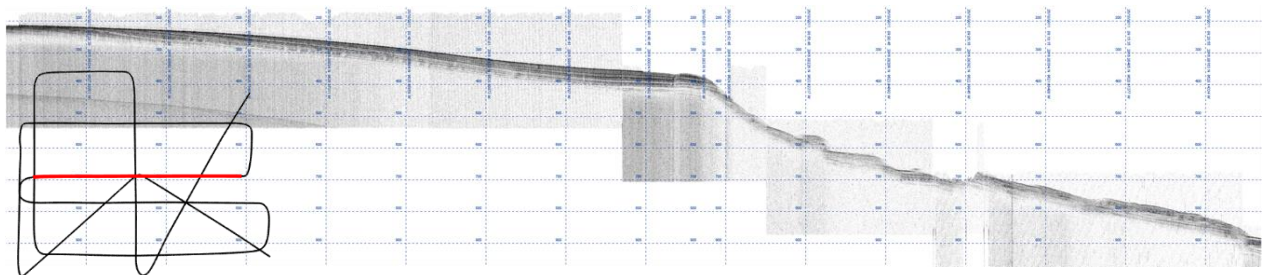
Adquirido en dirección S-N





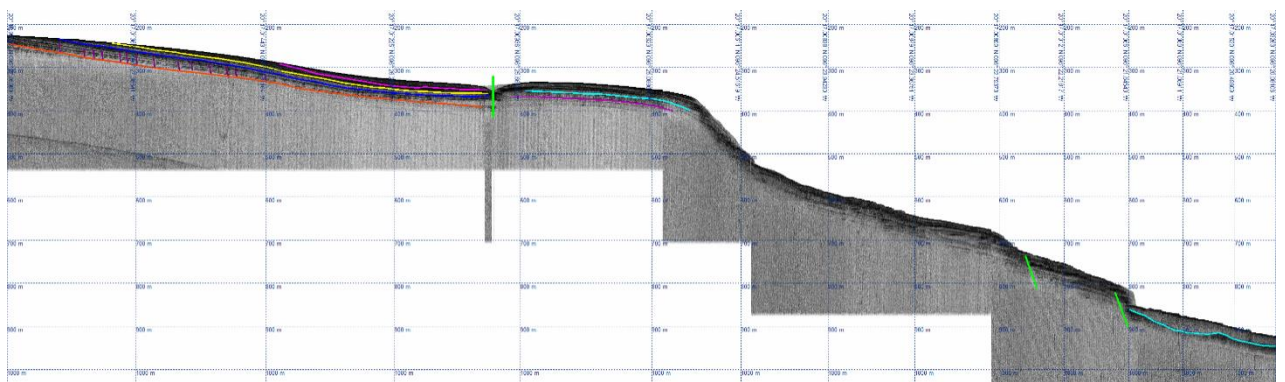
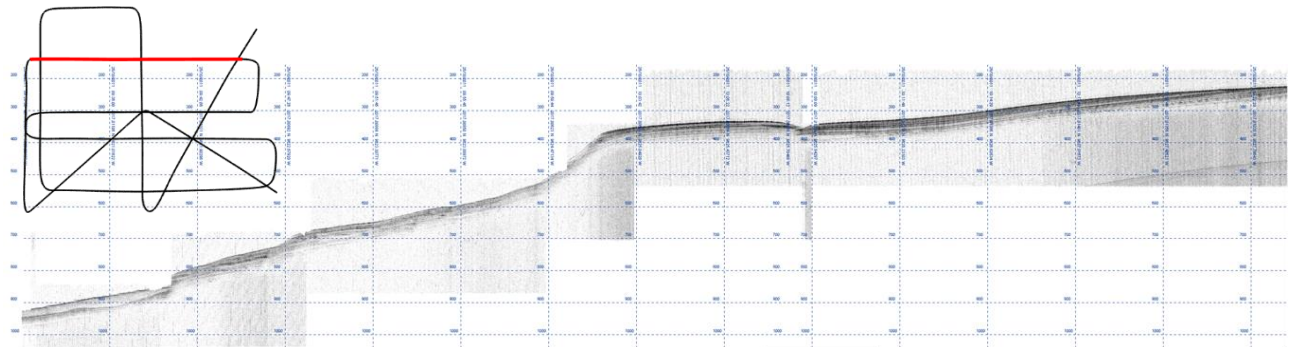
Perfil 4.

Adquirido en dirección W-E



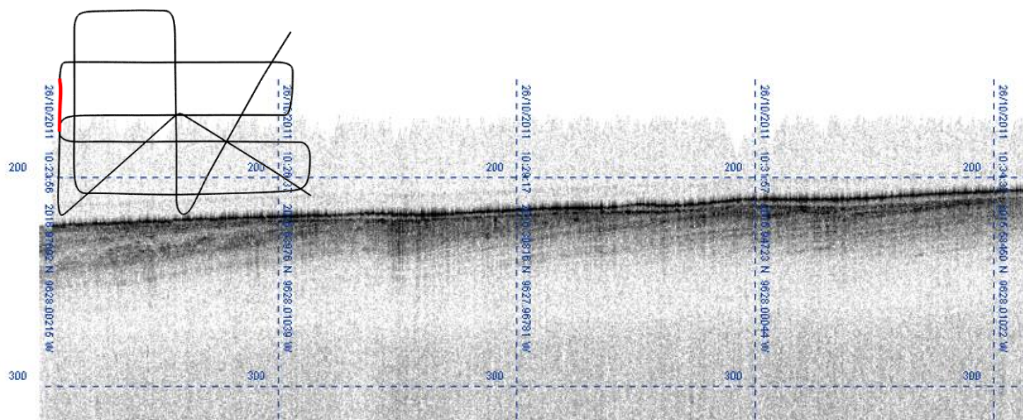
Perfil 5.

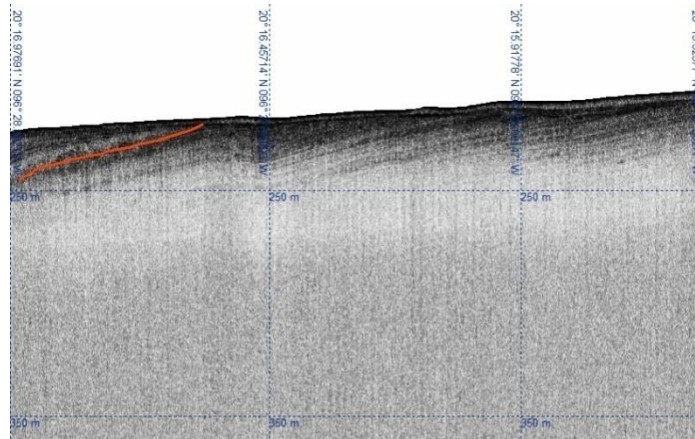
Adquirido en dirección E-W



Perfil 6.

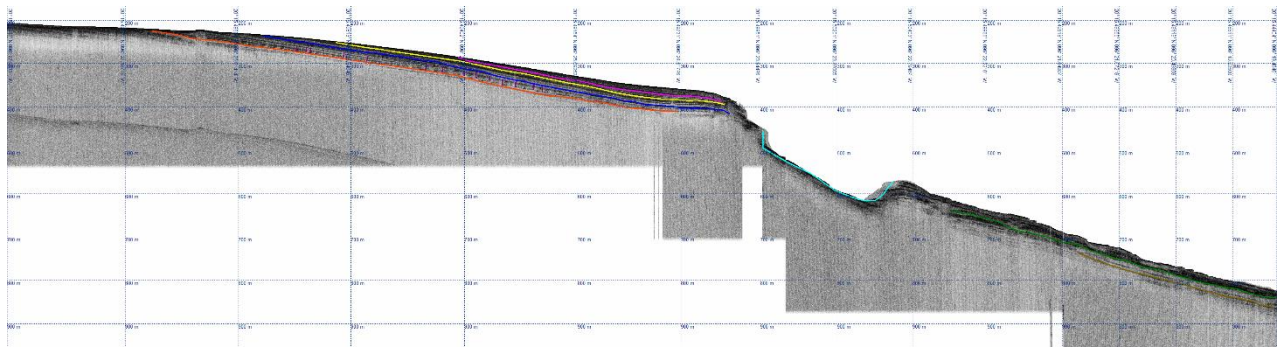
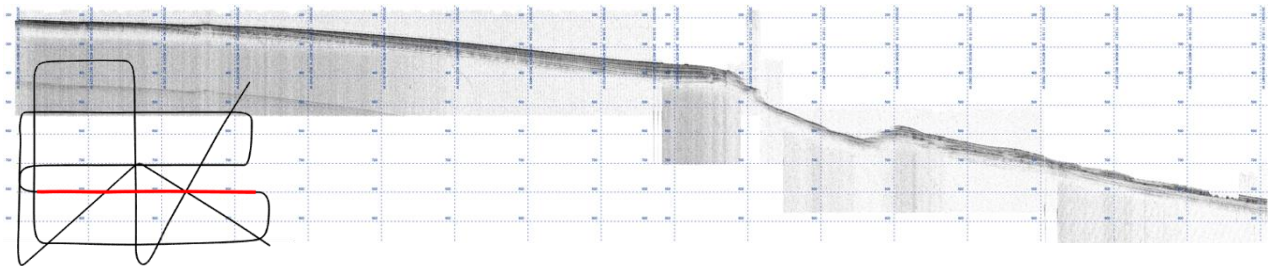
Adquirido en dirección N-S





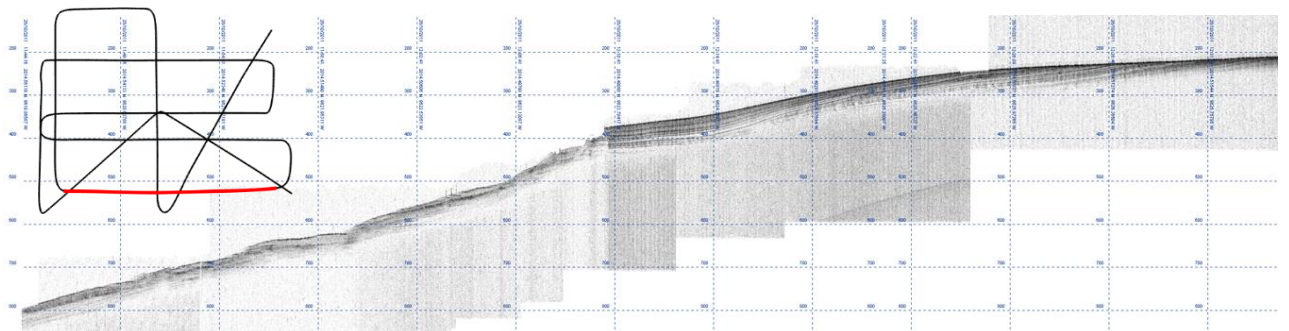
Perfil 7.

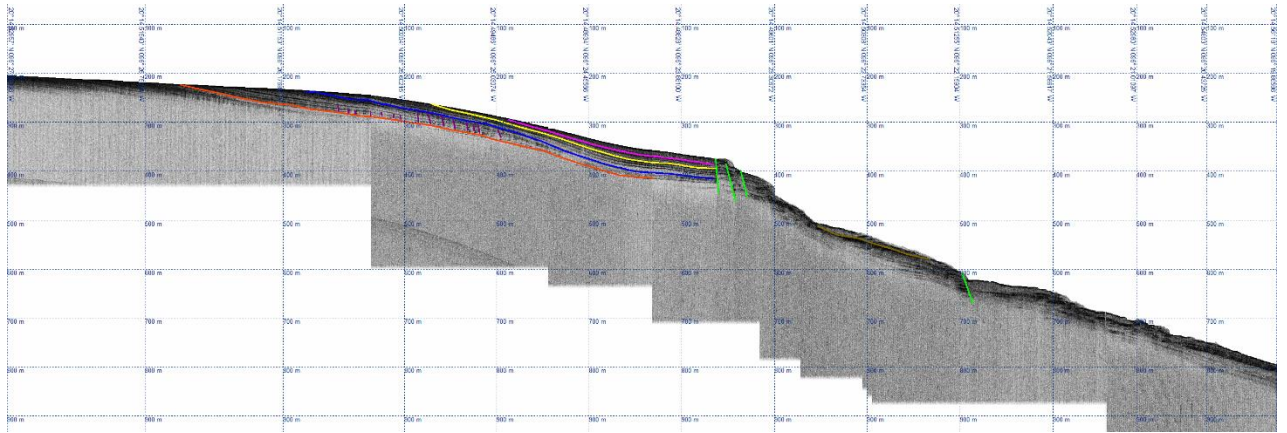
Adquirido en dirección W-E



Perfil 8.

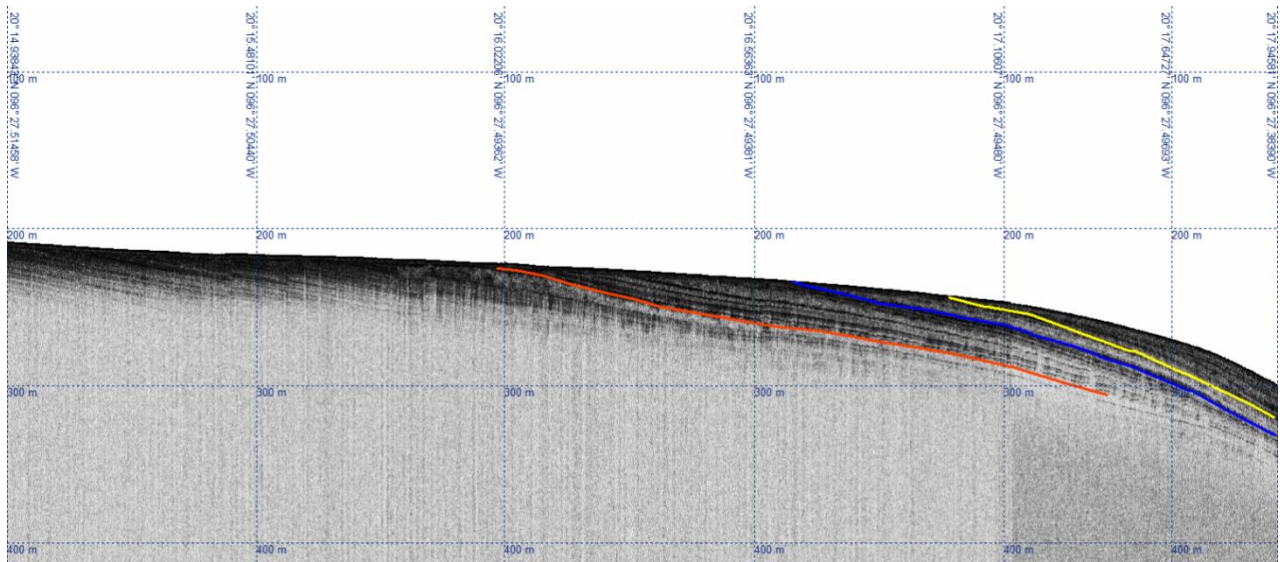
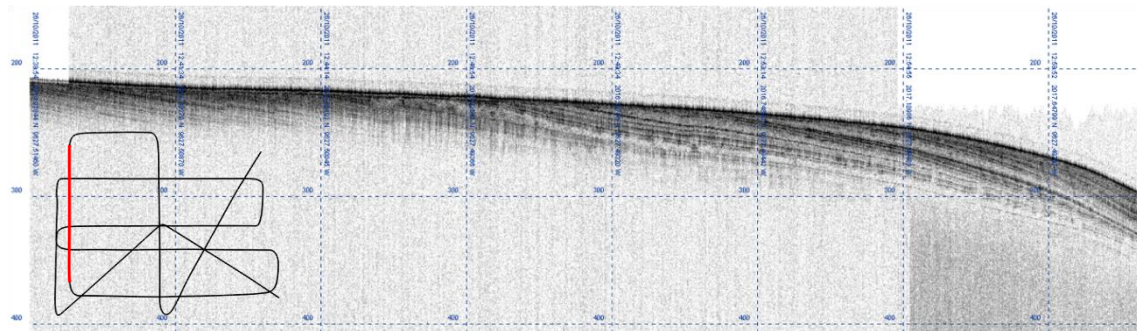
Adquirido en dirección E-W





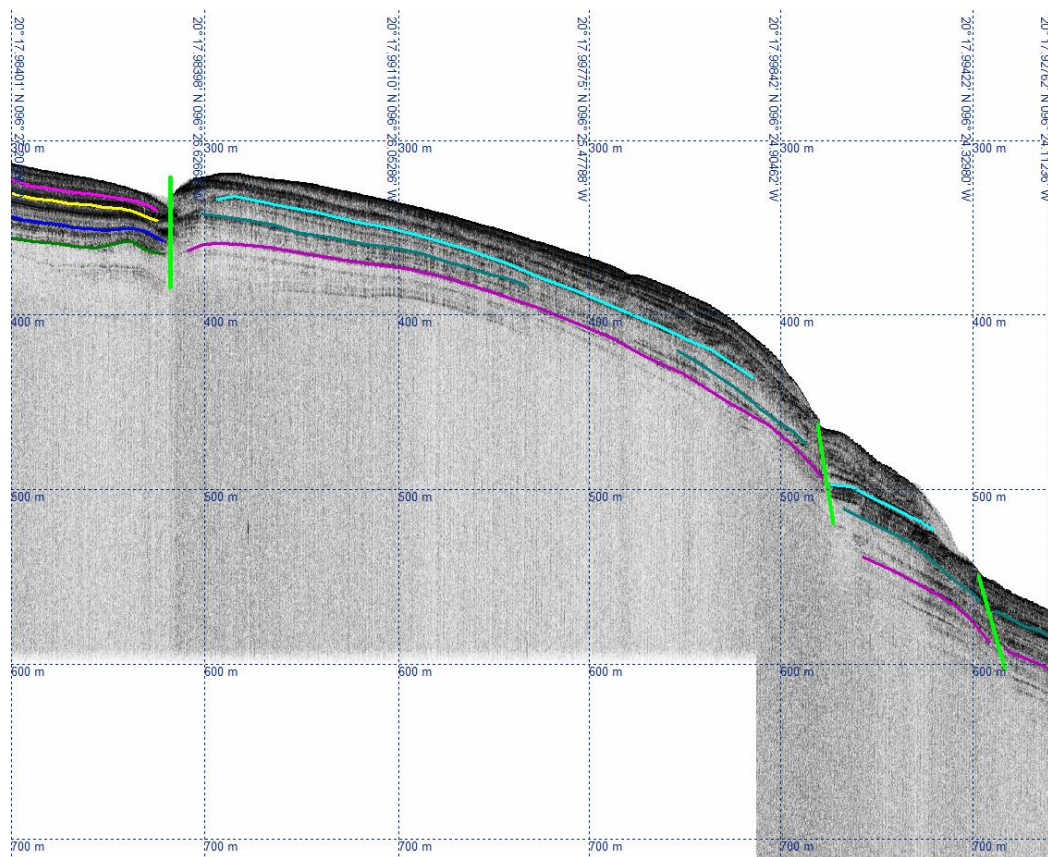
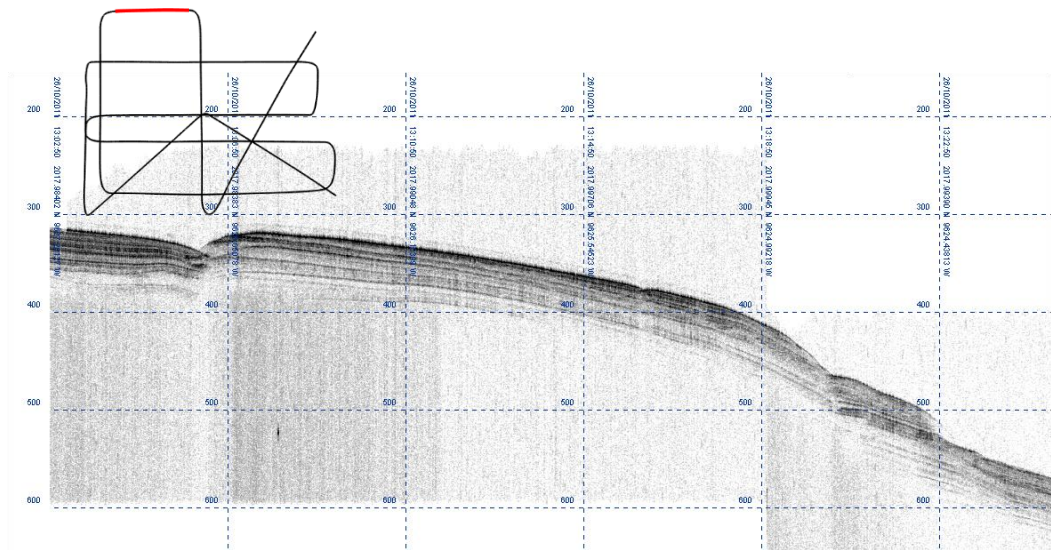
Perfil 9.

Adquirido en dirección S-N



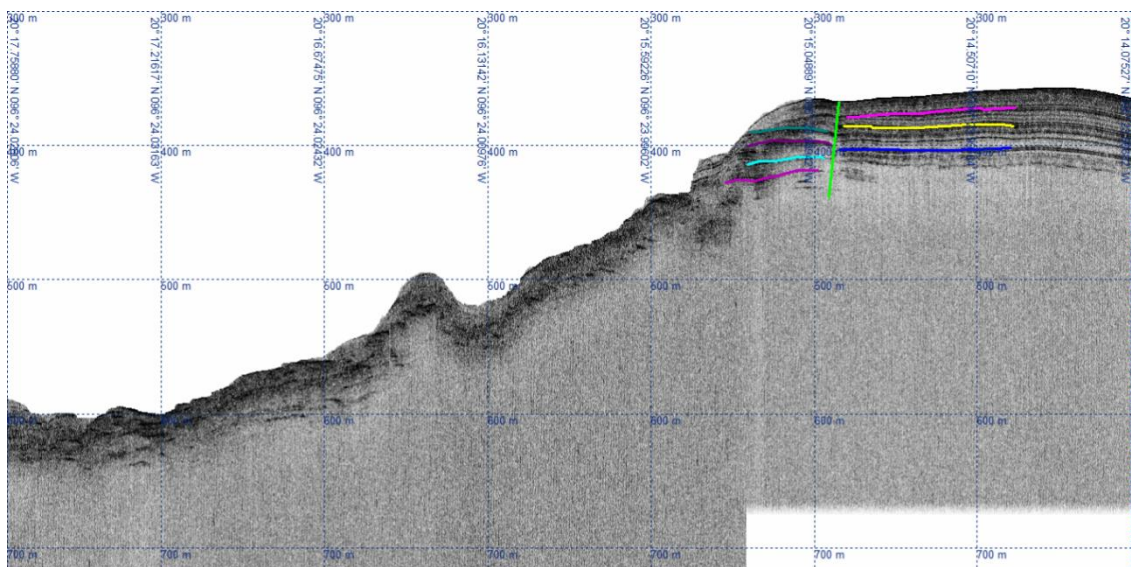
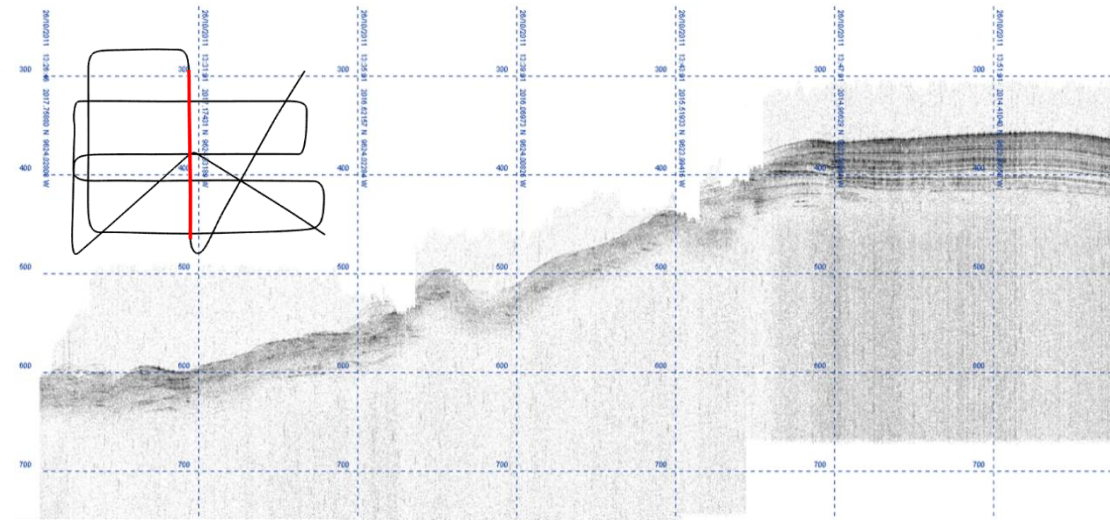
Perfil 10.

Adquirido en dirección W-E



Perfil 11.

Adquirido en dirección N-S



Perfil 12.

Adquirido en dirección SW-NE

