



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Batimetría de alta resolución en
el Escarpe de Campeche, al sur
del Golfo de México**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Geofísica

P R E S E N T A

Luz Adriana Arredondo Godínez

DIRECTOR DE TESIS

Dra. Ligia Pérez Cruz



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016



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.

DEDICATORIAS

A *la vida*, por permitirme llegar a este momento tan importante y especial para mí, por las oportunidades y experiencias que me ha brindado y que me han hecho disfrutar de cada día.

A *mi madre*, por el amor y el apoyo más grande e incondicional de toda mi vida, por ser el motor que me impulsa a buscar nuevas metas, por todo tu esfuerzo, paciencia y constancia para ayudarme a seguir y cumplir mis sueños “*Gracias por ser mi maestra de vida y enseñarme a ser lo que hasta ahora soy*”.

A *mi padre*, por las enseñanzas de vida compartidas, por ser la motivación, ejemplo y guía en todo este camino de preparación profesional y de fortaleza personal, por tu tiempo y dedicación para enseñarme a amar y valorar el conocimiento, pero sobre por tu amor y apoyo, “*Te amo pa*”.

A *mis hermanas, Gaby y Renata* por tantas experiencias, locuras, momentos y aventuras que hemos disfrutado juntas, por llenar mi vida de amor y alegría y estar ahí siempre que lo he necesitado, gracias por su ejemplo, guía, apoyo, y por ser mis más grandes cómplices y confidentes. Y a *ti Sofía* por ser el sol y sonrisa de cada uno de mis días, por contagiarme con tu inocencia y alegría, porque con tu amor me enseñas a disfrutar las pequeñas cosas de la vida y a ser mejor cada día, “*Tenerlas e lo más bonito de la vida*”.

A *mi Mami Geno*, por ser la persona con el corazón y espíritu más grande que pueda existir, por darme tu amor incondicional cada día y transmitirme tu fortaleza, por siempre estar al pendiente de mí y procurarme, pero sobre todo por nunca dejar de confiar en mí.

A *mi abuelo Pedro*, por comenzar con estos grandes sueños, porque donde quiera que estés sé que estarías orgulloso de nuestros logros.

A *mis dos horribles Roger y Edgar* que más que amigos han sido mis hermanos, mis confidentes y mis cómplices en esta etapa de la vida, gracias por tantas experiencias, aventuras y consejos, por aprender, crecer juntos y ser auténticos e incondicionales.

AGRADECIMIENTOS

A la mejor del mundo, mi amada UNAM, por las oportunidades y excelente educación que me ha proporcionado desde preescolar.

A la Facultad de Ingeniería, por sentar las bases de mi formación profesional.

A mi asesora, la Dra. Ligia Pérez Cruz por la confianza, el apoyo, dirección y orientación que me ha brindado durante esta etapa, contribuyendo a mi formación personal y profesional.

Al M. en C. Miguel Ángel Díaz Flores, por su apoyo y consejo académico durante la realización de este trabajo y por sus enseñanzas y experiencias durante las campañas CHICXULUB II y CHICXULUB III.

Al Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi, Dr. Joaquín E. Aguayo Camargo y M. en C. Arturo Ronquillo Arvizu, miembros del jurado de mi examen profesional, por la confianza brindada, comentarios y aportes a este trabajo.

A todo el personal científico y marino del B/O "Justo Sierra" durante las campañas CHICXULUB II y CHICXULUB III.

Al Servicio Mareográfico Nacional de la UNAM por proporcionarme los datos de mareas de las estaciones utilizadas en este trabajo.

A mis compañeros y amigos que compartieron experiencias conmigo durante las campañas oceanográficas.

A todos mis amigos de la Facultad de Ingeniería por brindarme su amistad, en especial a la pequeña familia, Edgar, Roger, Daniel Paz, Omar, Aldair, Karensita, a Jazz y Maday por su apoyo siempre.

A mis amigos del laboratorio, Celia, Ana, Mau, Mariana y Juanjo por su amistad, consejos y compañía.

A toda mi familia por su gran amor y apoyo, en especial a mis primos por todo que hemos vivido juntos.

Y a todas las personas que, incluso indirectamente, tuvieron que ver con la realización de esta tesis.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIAS -----	<i>i</i>
AGRADECIMIENTOS -----	<i>ii</i>
ÍNDICE GENERAL -----	<i>iii</i>
ÍNDICE DE FIGURAS -----	<i>iv</i>
ÍNDICE DE TABLAS -----	<i>vi</i>
RESUMEN -----	<i>vii</i>
ABSTRACT -----	<i>viii</i>
1. INTRODUCCIÓN -----	1
1.1. Área de estudio-----	2
2. ANTECEDENTES -----	3
2.1. Estudios previos en el área de estudio-----	3
2.1. Fisiografía de la Cuenca del Golfo de México-----	6
2.3. Provincias Fisiográficas de la Cuenca del Golfo de México-----	8
2.3.1. Escarpe de Campeche-----	10
3. EQUIPOS DE MEDICIÓN DE LA BATIMETRÍA DEL FONDO MARINO -----	12
3.1. Ecosondeo monohaz-----	13
3.2. Ecosondeo multihaz-----	14
3.2.1 Características de una ecosonda batimétrica multihaz-----	16
3.3. Registro del movimiento del buque-----	17
3.4. Propagación acústica en el mar-----	18
4. MÉTODOS -----	21
4.1. Adquisición de datos-----	21
4.1.1. Campañas oceanográficas CHICXULUB II Y CHICXULUB III-----	21
4.1.2. Datos de batimetría-----	23
4.2. Procesamiento de datos-----	26
5. RESULTADOS -----	41
5.1 Análisis de Resultados-----	41
5.2. Relieve batimétrico y mapas de contorno-----	42

5.3. Modelo batimétrico 3D	45
6. INTERPRETACIÓN	48
7. CONCLUSIONES	50
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	51
ANEXOS	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio.....	2
Figura 2. Ubicación del estudio batimétrico multihaz sobre el Escarpe de Campeche con respecto al crater de impacto de Chicxulub, en rojo los sitios de perforación 86 y 94 [Urrutia-Fucugauchi <i>et al.</i> , 2014]	4
Figura 3. Las imágenes A a D muestran la batimetría sobre el Escarpe de Campeche en estudios previos [Urrutia-Fucugauchi <i>et al.</i> , 2014].....	5
Figura 4 límites estructurales de la Cuenca del Golfo de México [Salvador, 1991]..	6
Figura 5. Batimetría del Golfo de México [Salvador, 1991].....	7
Figura 6. Regiones fisiográficas marinas del Golfo de México [Salvador, 1991].....	9
Figura 7. Descomposición de un pulso de sonido en un medio acústico	12
Figura 8. Principio de una ecosonda monohaz, P=profundidad de la columna de agua [Modificada de Michaud <i>et al</i> , 2009].....	13
Figura 9. Esquema de un sistema multihaz.....	14
Figura 10. Principio de una ecosonda multihaz, P=profundidad de la columna de agua [Modificada de Michaud <i>et al</i> , 2009].....	15
Figura 11. Movimientos del buque. [Modificada de Manual Caris].....	18
Figura 12. a) Localización de los levantamientos geofisicos marinos de las dos campañas a bordo del B/O JUSTO SIERRA; b) Recorrido de la campaña CHICXULUB II y c) Recorrido de la campaña CHICXULUB III.	22
Figura 13. Módulos que componen la Ecosonda Multihaz EM 300 instalada en el B/O Justo Sierra consiste en: (1) Arreglo de transductores de transmisión; (2) Arreglo de transductores de recepción; (3) Unidad transceiver y (4) Estación de trabajo del operador [Manual de operador EM 300]	24

Figura 14. Geometría del sistema de haces cruzados [Modificada de Michaud et al, 2011]	25
Figura 15. Flujo de trabajo en CARIS para ecosondas Multihaz.	26
Figura 16. Dimensiones del del B/O "Justo Sierra": longitud total (eslora): 49.4 m; longitud principal: 46.3 m y ancho (manga): 10.3 m.....	27
Figura 17. Dimensiones del B/O "Justo Sierra", Vista Plana; 5.15 m de estribor, 21.9 m de popa.....	28
Figura 18. Dimensiones del B/O "Justo Sierra", vista de perfil: Desde la quilla hasta RP: 4.3 m. Desde la quilla hasta la cubierta principal: 8.7 m.	28
Figura 19. Dimensiones del B/O JUSTO SIERRA en 3D.	29
Figura 20. Ventana de conversión de datos multihaz.....	30
Figura 21. Ejemplo de un SVP en Caris	31
Figura 22. Mapa de estaciones del Sistema Mareográfico Nacional, UNAM	32
Figura 23. Archivo de Marea de la campaña CHICXULUB II de los días 28 y 29 de abril 2015.....	33
Figura 24. Archivo de Marea de la campaña CHICXULUB III de los días 20 al 28 de abril 2016.....	33
Figura 25. Icono para llevar a cabo el Merge dentro de la plataforma de CARIS. 34	
Figura 26. Hojas de campo realizadas para los datos de ambas campañas oceanográficas.....	35
Figura 27. Superficies BASE de cada campaña, del lado izquierdo la correspondiente a CHICXULUB II y del lado derecho la de CHICXULUB III.	37
Figura 28. Ventana del editor de Bandas de sondaje con datos limpios de las Campañas.....	38
Figura 29. Ventanas del Subset editor; a) Muestra el tamaño del área que el usuario decide utilizar para limpiar los datos; b) Se muestra la interfaz con los datos de los perfiles para poder observarlos datos erróneos y eliminarlos y c) Muestra el perfil en 3D de las áreas de limpieza.....	39
Figura 30. Relieve batimétrico de la zona de estudio de la primera campaña CHICXULUB II.....	42
Figura 31. Relieve batimétrico de la zona de estudio de la primera campaña CHICXULUB II.....	43

Figura 32. Mapas de contorno de los datos batimétricos en ambas campañas....	44
Figura 33. Proyección en 3D del relieve batimétrico campaña CHICXULUB II.....	45
Figura 34. Proyección en 3D del relieve batimétrico campaña CHICXULUB II.....	45
Figura 35. Modelo batimétrico en 3D de los datos de ambas campañas	46
Figura 36. Localización del área de estudio en relación a la extensión del Golfo de México.....	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rango de frecuencias utilizadas en batimetría. Relación entre la frecuencia utilizada y el objeto de estudio.....	16
---	----

RESUMEN

Durante las campañas oceanográficas CHICXULUB II y CHICXULUB III realizadas en abril de 2015 y abril de 2016, respectivamente, a bordo del B/O "Justo Sierra" de la UNAM, se empleó un método sistemático para obtener, por primera vez, barridos laterales de batimetría multihaz del relieve del lecho marino en una superficie de aproximadamente 1,608 km² en el área sur del Escarpe de Campeche, localizado entre las coordenadas 20°55'N a 21°46'N y 92°23'W a 93°33'W.

Se utilizó una ecosonda multihaz EM300 de la marca Kongsberg y los datos batimétricos fueron post-procesados con el software CARIS HIPS & SIPS 7.0, para corregir errores aleatorios que pudieran presentarse en la adquisición y de esta manera, obtener resultados del levantamiento de batimetría en un modelo digital del terreno, mapas de contorno y proyecciones del relieve topográfico en 3D.

El sector sur del Escarpe de Campeche corre con una orientación norte – sur; la superficie del talud occidental de la plataforma carbonatada de Yucatán está formada por estructuras morfológicas de cañones-corredores submarinos con forma similar a una U, propios de la actividad de drenaje de la plataforma continental hacia la base del cañón de Campeche; además presenta laderas cóncavas con rasgos ondulados sobre la cara del escarpe desde el inicio del talud, hasta la base del mismo. Inicia a profundidades de 200 m presentando su posición más distal a profundidades de hasta 2,800 m, con pendientes que oscilan de los 5° hasta los 23°.

Su forma es influenciada por procesos de transporte y sedimentación del banco calcáreo de la plataforma de Yucatán, se conoce que el Cañón de Campeche (situado cerca de la base del escarpe), es genéticamente el resultado del contacto litológico entre los carbonatos de la plataforma (al este) y los diapiros de la Cuenca de Campeche (al oeste); además el borde de la plataforma presenta un subsecuente crecimiento arrecifal.

ABSTRACT

During the oceanographic campaigns CHICXULUB II and CHICXULUB III carried out in april 2015 and april 2016 respectively, on board the oceanographic vessel "Justo Sierra" of the UNAM, a systematic method was used to obtain, for the first time, lateral sweeps of multibeam bathymetry of the seabed relief on a surface of approximately 1,608 km² in the southern area of the Campeche Escarpment which is located between the coordinates 20° 55'N to 21° 46'N and 92°23'W to 93°33'W.

A Kongsberg branded EM300 multibeam echo sounder was used and the bathymetric data were post-processed with the CARIS HIPS & SIPS 7.0 software to correct random errors that could arise in the acquisition and thus obtain bathymetry survey results in a digital terrain model, contour maps and projections of the topographic relief in 3D.

The southern sector of the Campeche Escarpment runs in a north-south orientation; The surface of the western slope of the Yucatan carbonate platform is formed by morphological structures of U-shaped submarine canyons-corridor, typical of the drainage activity of the continental shelf towards the base of the Campeche canyon; also presents concave slopes with wavy features over the escarpment face from the beginning of the slope, up to its base. It starts at depths of 200 m and presents its most distal position at depths of up to 2,800 m, with slopes ranging from 5° to 23°.

Its shape is influenced by transport and sedimentation processes of the calcareous bank of the Yucatan platform; it's known that the Campeche canyon (located near the escarpment base) is the genetic result of the lithological contact between the carbonates of the platform (to the east) and the Campeche basin diapirs (to the west); besides the edge of the platform presents a subsequent reef growth.

1. INTRODUCCIÓN

La exploración de los océanos y de los márgenes continentales en el último siglo usando los métodos geofísicos marinos, ha sido una clave en los avances para la comprensión del hombre sobre la estructura interna de la Tierra y de los mecanismos de su evolución.

El enorme potencial de estos métodos los ha convertido en herramientas indispensables para los estudios geofísicos y geológicos modernos a cualquier escala [Michaud *et al.*, 2009]. Las ecosondas multihaz desarrolladas a principios de la década de 1970 han sido reconocidas como una de las herramientas más eficaces disponibles para mapear el fondo marino, ya que, además de proporcionar un registro de los valores batimétricos a lo largo de un barrido lateral tienen la capacidad de recopilar datos de dispersión acústica (backscatter) simultáneamente, proporcionando así, una imagen de alta resolución del fondo utilizadas comúnmente para clasificar el tipo de lecho marino, así como sus rasgos particulares [Parnum y Gavrilov., 2011], tanto en aguas someras como en aguas profundas.

En algunos estudios de geofísica marina se han utilizado ecosondas multihaz para cartografiar con un gran detalle el relieve batimétrico del lecho marino en el borde Norte de la plataforma de Yucatán, donde se encuentra el Escarpe de Campeche [Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 2014]. Sin embargo, el primer estudio de este tipo de levantamiento batimétrico de alta resolución en el sector sur del Escarpe, sobre el borde occidental de la plataforma de Yucatán, se llevó a cabo en las campañas "CHICXULUB II" y "CHICXULUB III" a bordo del B/O Justo Sierra de la UNAM, en abril del 2015 y abril del 2016, respectivamente. Durante estas campañas se realizó la adquisición de perfiles de múltiples datos en un rango entre 100 m y 3,000 m de profundidad, con una ecosonda multihaz de 30 kHz modelo EM300 de la marca Kongsberg, la cual emite simultáneamente 135 haces cubriendo un ángulo de aproximadamente 150°.

El objetivo de esta tesis es obtener un modelo digital del terreno suavizado, así como, un modelo 3D de batimetría como resultado del post-procesado (Software CARIS HIPS & SIPS) de los datos adquiridos con ecosonda multihaz de las campañas

CHICXULUB II y CHICXULUB III, para identificar estructuras morfológicas del lecho marino y reconocer el relieve batimétrico de la zona.

1.1. Área de estudio

El área de estudio (Fig. 1) se encuentra dentro de la cuenca del Golfo de México, en el borde occidental de la Plataforma de Yucatán, el sur del Escarpe de Campeche y al noroeste del Cañón de Campeche.

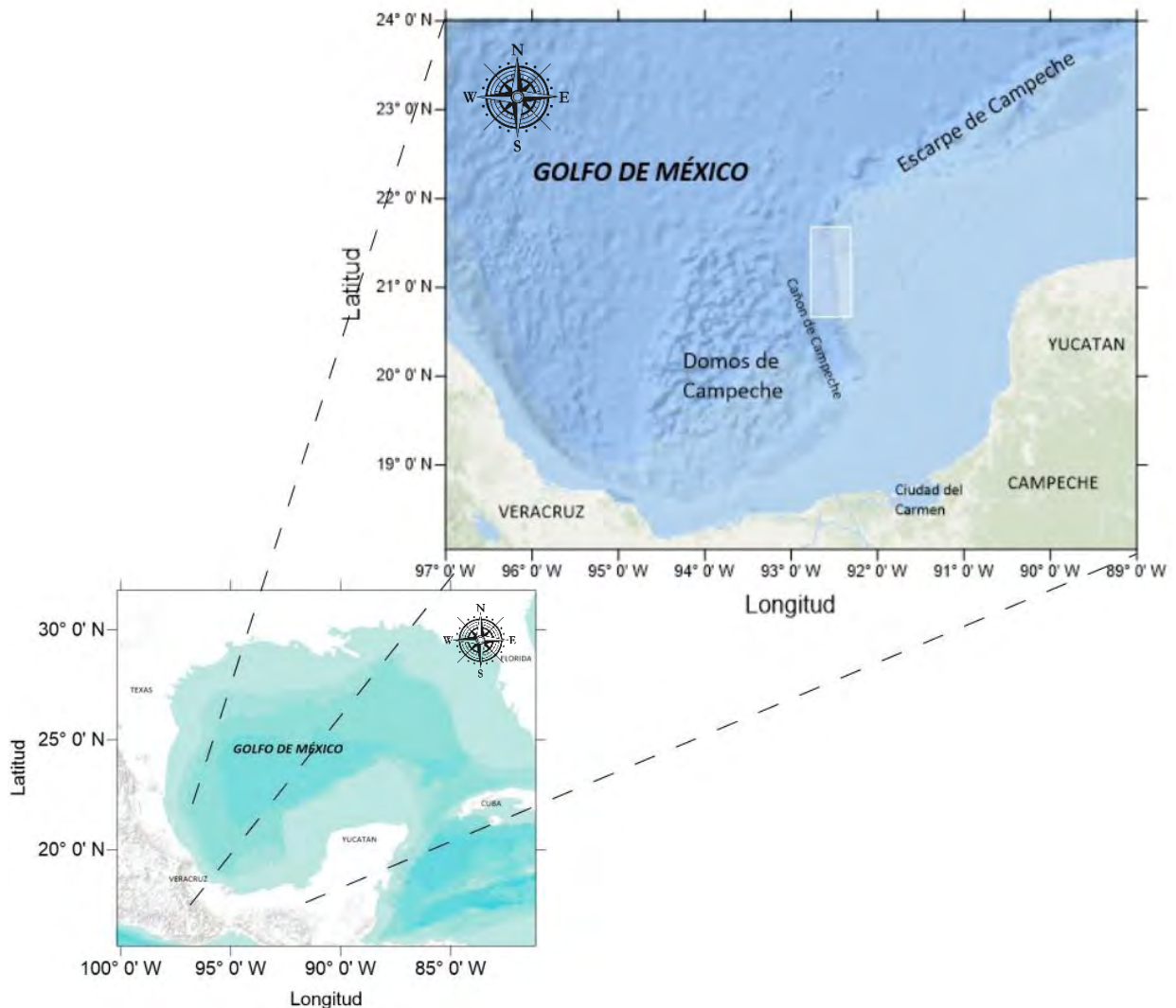


Figura 1. Localización del área de estudio.

El levantamiento geofísico de la parte sur del Escarpe de Campeche, se encuentra entre las latitudes $20^{\circ}55'N$ y $21^{\circ}47'N$ y entre las longitudes $92^{\circ}38'W$ y $92^{\circ}26'W$, con tirantes de agua aproximados de 105 m sobre la Plataforma de Yucatán, hasta 2,800 m sobre el talud continental.

2. ANTECEDENTES

2.1. Estudios previos en el área de estudio

El Escarpe de Campeche es una fuente potencial de flujos de escombros, pero a falta de una batimetría detallada de la zona, hace más complicada la evaluación sobre su origen; es decir, si los estratos asociados con el impacto de Chicxulub se exponen actualmente en el fondo marino, o si los estratos asociados con el límite entre el Cretácico y el Paleógeno contienen alteraciones relacionadas con erosión, sedimentación o tectonismo.

La primera expedición científica que produjo un mapa de batimetría detallada sobre el Escarpe de Campeche (Fig. 2), fue la realizada por Schmidt Ocean Institute en el R / V Falkor en 2013; aunque el objetivo principal fue determinar si los depósitos asociados con el límite Cretácico-Paleógeno se encontraban expuestos en el fondo marino, a lo largo del Escarpe de Campeche y, si era así, qué es lo que estos podrían revelar sobre el evento del impacto del Chicxulub [Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 2014]. Este estudio se complementó con datos de dos sitios de perforación realizados por el proyecto Deep Sea Drilling (DSDP) Leg 10 en 1970, sobre el Escarpe de Campeche (sitio 86 y 94).

El R/V Falkor, se encontraba equipado con ecosondas Multihaz Kongsberg EM302 de 30 KHz y EM710 de 70 KHz. Las líneas de levantamientos se llevaron a cabo a lo largo de 612 km de la cara norte del Escarpe de Campeche, aproximadamente entre profundidades desde 400 m a 3,700 m.

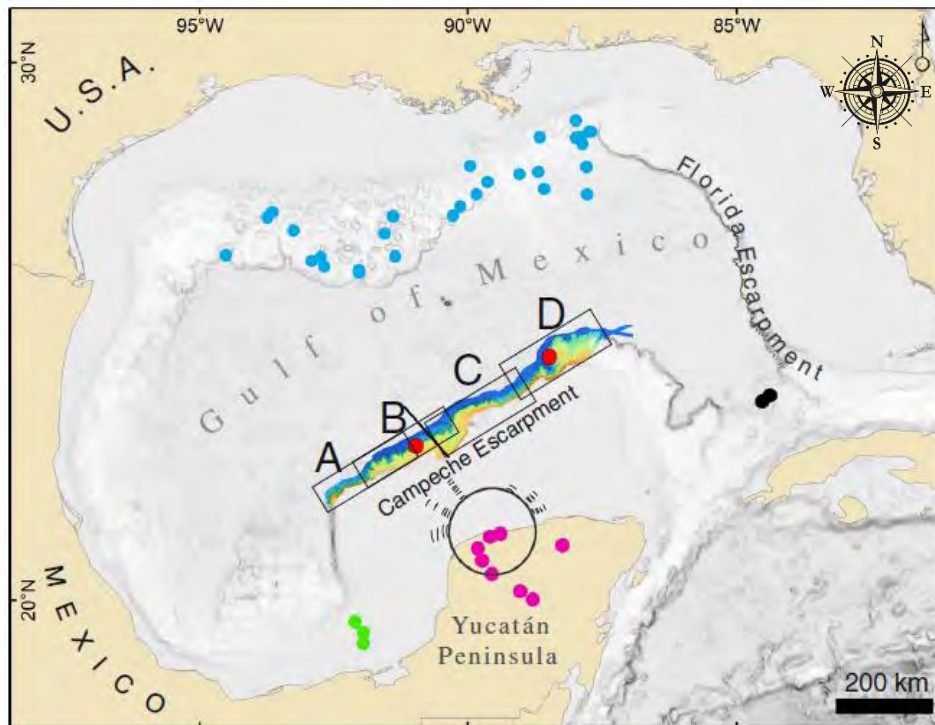
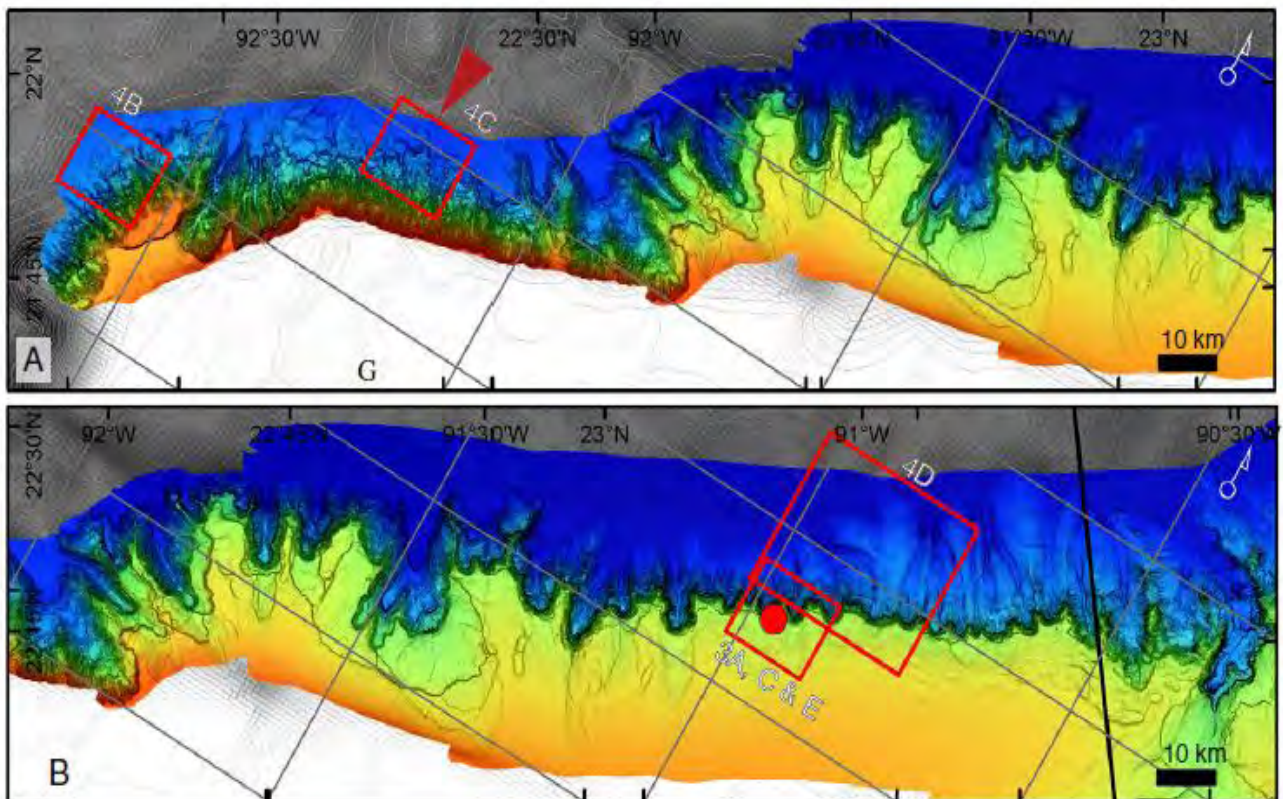


Figura 2. Ubicación del estudio batimétrico multihaz sobre el escarpe de Campeche con respecto al cráter de impacto de Chicxulub, en rojo los sitios de perforación 86 y 94 [Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 2014]



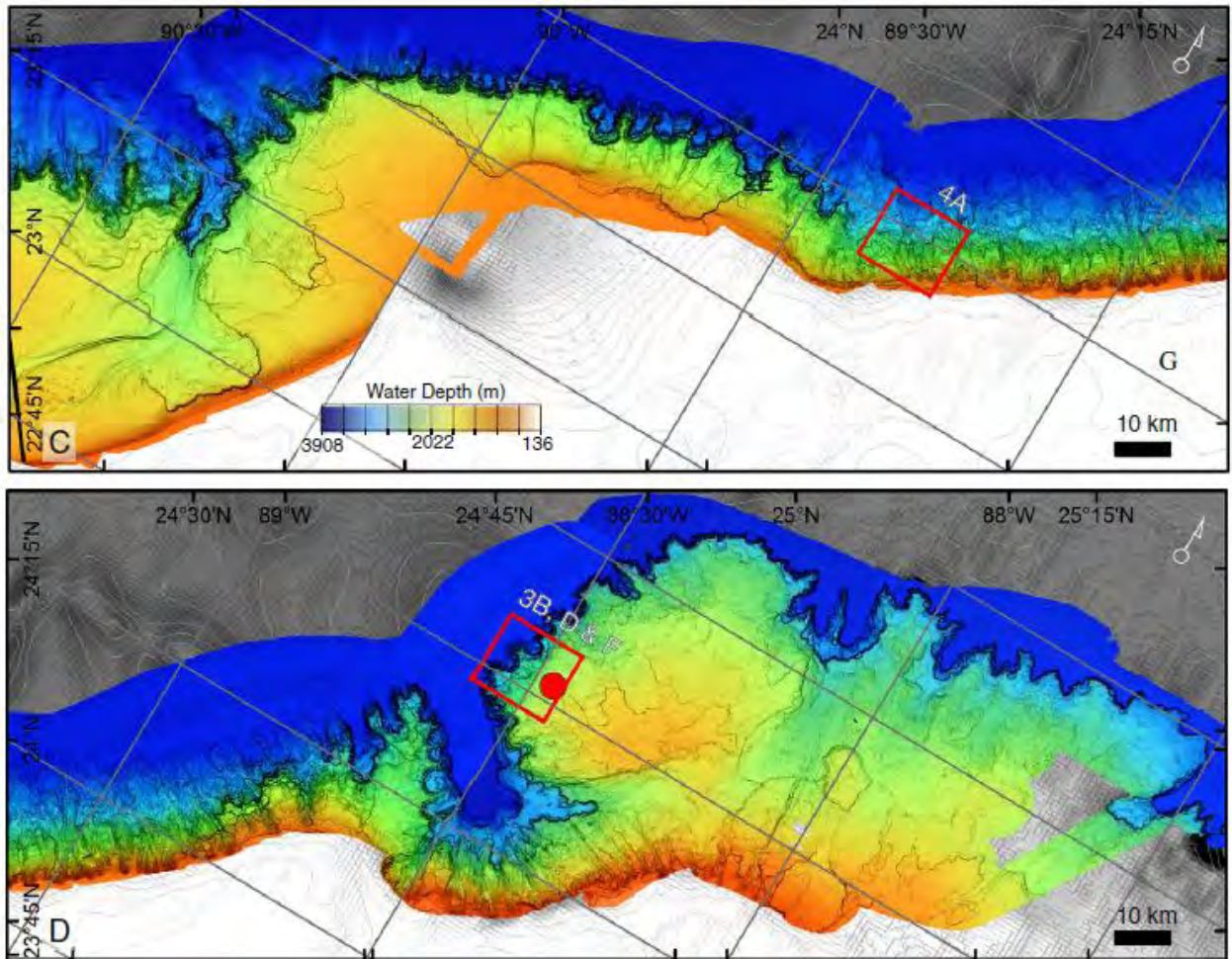


Figura 3. Las imágenes A a D muestran la batimetría sobre el Escarpe de Campeche en estudios previos [Urrutia-Fucugauchi et al., 2014]

2.1. Fisiografía de la Cuenca del Golfo de México

La Cuenca del Golfo de México, se localiza en el margen occidental del Océano Atlántico, presenta una forma semi-circular con un diámetro aproximado de 1,500 km. Limita al norte con las montañas Ouchita, el cinturón deformado del Mississippi y el borde sur de los Apalaches; al noreste con el Macizo (upflit) Llano, el Macizo de Marathon y con el cinturón orogénico de Ouchita; al oeste, la Plataforma de Coahuila y la Sierra Madre Oriental; al suroeste, la Plataforma de Córdoba y el Macizo de Chiapas. Los límites este y sureste los conforman las plataformas carbonatadas de Florida y Yucatán, respectivamente. La parte central de la cuenca es ocupada por el Golfo de México, el cual comprende una superficie aproximada de 1,500,000 km² y profundidades de hasta 3,750 m (12,303 ft) [Salvador, 1991].

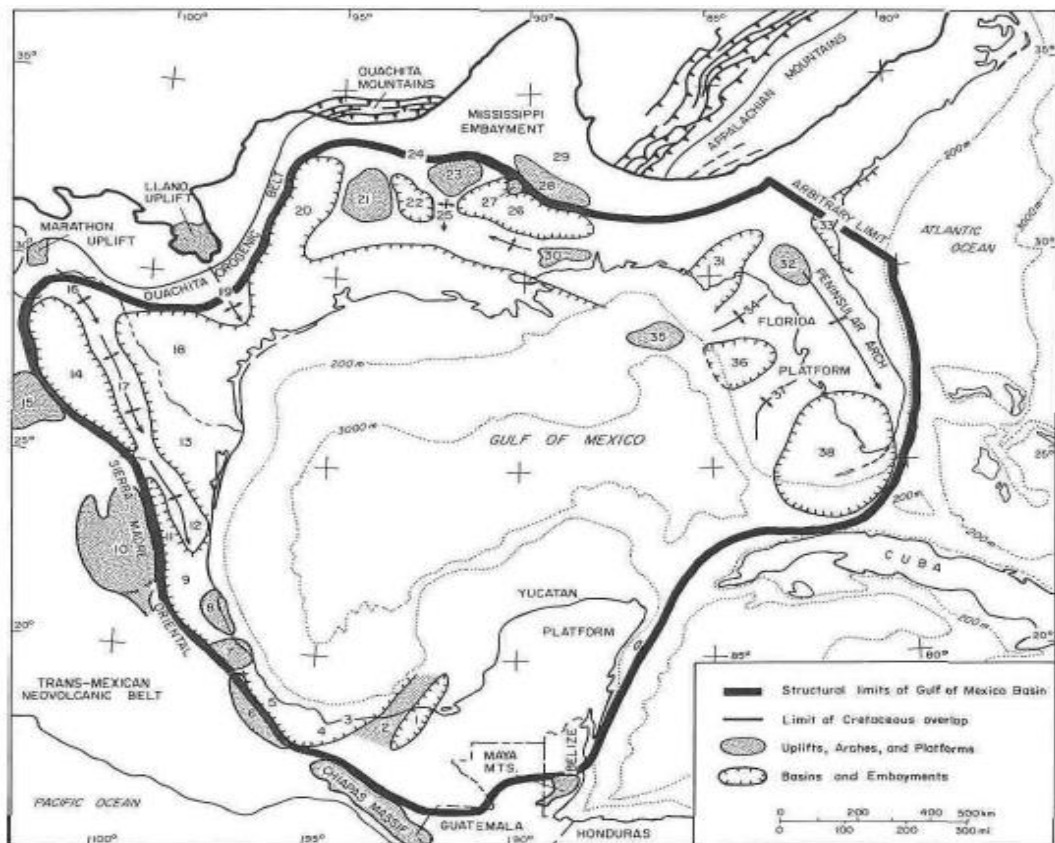


Figura 4. Límites estructurales de la cuenca del Golfo de México [Salvador, 1991]. 1,Cuenca de Macuspana; 2, Levantamiento de Villahermosa; 3,Cuenca de Comalcalco; 4, Cuenca Salina de Istmo; 5,Cuenca de Veracruz; 6, Plataforma de Córdoba; 7, Macizo Santa Ana; 8, Plataforma de Tuxpan; 9, Cuenca de Tampico-Misantla; 10, Plataforma Valles-San Luis Potosi; 11, Cuenca de Magiscatzin; 12, Arco de Tamaulipas; 13, Cuenca de Burgos; 14, Cuenca de Sabinas; 15, Plataforma de Coahuila; 16, Levantamiento El Burro; 17, Arcos Peyotes-Picachos; 18,Ensenada Rio Grande; 19, Arco San Marcos; 20, Cuenca Este de Texas; 21, Levantamiento Sabine; 22, Cuenca salina del Norte de Louisiana; 23, Levantamiento Monroe; 24, Cuenca Desha; 25, Arco La Salle; 26,Cuenca salina del Mississippi; 27,Domo Jackson; 28, Cinturón Central Deformado del Mississippi; 29, Cuenca de Guerrero Negro; 30, Levantamiento Wiggins; 31, Ensenada Apalachicola; 32, Levantamiento Ocala; 33, Ensenada del sureste de Georgia; 34, Arco Middle Ground; 35, Plataforma Sureste; 36, Ensenada Tampa; 37, Arco Sarasota; 38, Cuenca del sur de Florida.

La fisiografía del relieve batimétrico de la Cuenca del Golfo de México, refleja los eventos ocurridos desde su apertura hasta la configuración actual y que han sido controlados por los siguientes procesos: (1) Apertura "rifting", (2) Subsistencia de la cuenca, (3) Desarrollo de plataformas carbonatadas, (4) Cambios eustáticos del nivel del mar, (5) movimiento salino en forma diapírica, (6) derrumbes o deslizamientos de enormes masas de sedimentos por gravedad en su talud "slumping", y (7) flujos de densidad (turbiditas). Las grandes secuencias de sedimentos que ocasionó la subsistencia en todas las áreas del golfo, han enmascarado las evidencias del origen de la cuenca y la sal acumulada, debido a la alta tasa de evaporación que ha sido movilizada por los sedimentos y depositados dentro de la cuenca [Bryan *et al.*, 1991].

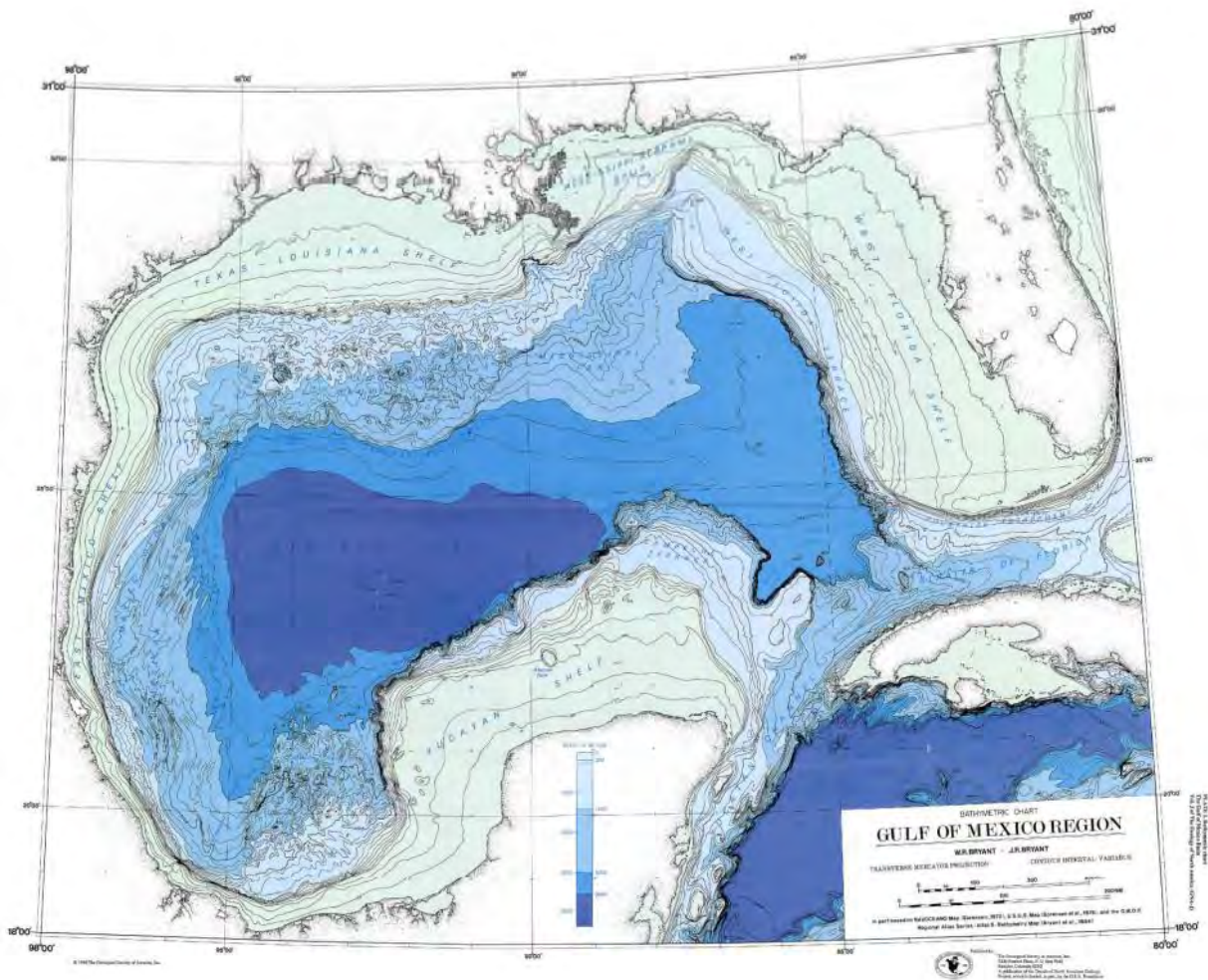


Figura 5. Batimetría del Golfo de México [Salvador, 1991].

2.3. Provincias Fisiográficas de la Cuenca del Golfo de México

Regiones fisiográficas terrestres

Existen dos provincias fisiográficas contrastantes, que se pueden distinguir en la parte terrestre de la Cuenca del Golfo de México; éstas además de reflejar la forma global de la cuenca, son indicadoras de la litología que la subyace: al este y sureste, se encuentran las penínsulas de Florida y Yucatán, que están formadas principalmente de rocas carbonatadas y al norte, noroeste y oeste, se encuentran las secuencias de sedimentos siliciclásticos terrígenos de las planicies costeras.

Las penínsulas de Florida y Yucatán son las partes emergidas de dos grandes plataformas carbonatadas; en general su elevación no supera los 100 m sobre el nivel del mar. Su relieve topográfico refleja una estructura plana producto de las secuencias de carbonatos del Cretácico-Cenozoico; estas secuencias alcanzan un espesor de 3,000 a 4,000 m en la península de Yucatán; mientras que en el sur de la península de Florida alcanzan hasta 7,000 m [Bryan *et al.*, 1991].

Al norte y al noroeste de la cuenca existe un cinturón de planicies costeras extensas de variada configuración, formadas principalmente por secuencias terrígenas del Cretácico al Cuaternario, las cuales presentan un echado general hacia el centro de la cuenca y están dominadas por los amplios valles del río Misisipi y el río Grande. Las planicies costeras más estrechas son las que se encuentran al oeste del Golfo, en territorio mexicano (Fig. 6).

Regiones fisiográficas marinas

La fisiografía submarina del Golfo de México es más contrastante que en la zona terrestre; en la parte norte, sur y este del Golfo, las plataformas continentales son muy amplias, presentando aproximadamente 170 km de ancho; sin embargo, en la zona oeste de México llega a tener menos de 13 km de ancho en algunas zonas. La planicie abisal de Sigsbee es extremadamente plana que se extiende 450 km a lo largo y 290 km de ancho, cubriendo un área de 103,600 km², interrumpida en algunas zonas por estructuras monticulares debido a la intrusión de diapiros salinos.

2.3.1. Escarpe de Campeche

El Escarpe de Campeche en la península de Yucatán, México; forma el extremo norte del margen continental que separa la plataforma carbonatada somera, que se extiende desde el Mesozoico a partir de las aguas profundas del Golfo de México. El escarpe se encuentra aproximadamente a 230 km desde el centro de la estructura de impacto de Chicxulub que presenta 180 km de diámetro, una de las mayores estructuras de impacto conocidas en la Tierra [Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 2014].

El Escarpe de Campeche es el resultado de un subsecuente crecimiento arrecifal del Cretácico Temprano en el borde de la plataforma de Yucatán a través de la lenta acumulación de sedimentos carbonatados y evaporitas [Bryan *et al.*, 1991], además de fallas lítricas que se presentan paralelas al margen del mismo, como resultado de la gran pendiente y la fuerza de gravedad actuante sobre los materiales que la conforman.

La morfología y estratigrafía de la península de Yucatán, al norte y oeste de la estructura de impacto de Chicxulub, en particular sobre el Escarpe de Campeche no son bien conocidos. Sin embargo, escarpes carbonatados inclinados similares (escarpes de Florida y Blake-Bahamas), tienen características erosionales en donde los límites de los estratos planos del Cretácico de las plataformas carbonatadas adyacentes están expuestos [Dillon *et al.*, 1987, Paullet *et al.*, 1990 a, b, en Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 2014].

Existen algunos perfiles disponibles de sísmica de reflexión multicanal que cruzan el Escarpe de Campeche, los cuales revelan su estructura interna. Locker y Buffler publicaron en un artículo en 1983 dos perfiles comparando el Escarpe de Campeche con el Escarpe de Florida: dos plataformas carbonatadas aparentemente similares en los lados sur y este del Golfo de México, respectivamente. Ellos señalaron que el borde del Escarpe de Campeche es significativamente más complejo que el Escarpe de Florida.

Este escarpe tiene una amplitud o diferencia máxima de alturas de 2,600 m, ya que inicia a la profundidad de 200 m, y presenta su posición más distal a la profundidad de 2,800 m con una pendiente que oscila de 2° hasta ser superior a los 45°. En el talud sobresalen rasgos particulares de relieve como los cañones-corredores submarinos [Mendoza *et al.*, 2000].

Existen tres distintas provincias estratigráficas y tectónicas alrededor de la cuenca y rodeando la región central profunda que se formaron durante el Jurásico Tardío y el Cretácico Temprano; 1) Al noreste, norte y noroeste, el inicio del Cretácico Temprano se caracterizó por la afluencia constante de sedimentos clásticos gruesos y por el desarrollo de amplias secuencias de carbonatos. Más tarde, la afluencia de estos sedimentos clásticos terrígenos se redujo en gran medida, particularmente en el noroeste. 2) Al oeste y suroeste, la afluencia de clásticos gruesos fue mínima y la región fue ocupada por plataformas cubiertas por aguas poco profundas y separadas entre ellas por cuencas y estrechos de aguas más profundas. En estas plataformas se depositaron carbonatos y evaporitas y sobre sus márgenes se construyeron grandes complejos de arrecifes. 3) La tercera provincia, al este y sureste, está ocupada por las plataformas de Florida y Yucatán, que emergieron hasta el Cretácico Temprano y en donde la sección del Cretácico Inferior está compuesta principalmente por carbonatos y evaporitas.

Por otro lado, durante la mayor parte del Cretácico Temprano, en los márgenes de las plataformas de Yucatán y Florida, frente a la parte central más profunda de la cuenca del Golfo de México, se formaron grandes acumulaciones arrecifales. Estas formaciones están representadas en la actualidad por los escarpes submarinos de Campeche y Florida, con profundidades entre 1,500 y 2,000 m.

3. EQUIPOS DE MEDICIÓN DE LA BATIMETRÍA DEL FONDO MARINO

La observación de los fondos marinos y de las rocas sumergidas, no se puede lograr de manera directa a gran escala; se tienen que realizar empleando métodos indirectos, como la mayoría de los utilizados en la exploración geofísica marina, uno de estos métodos es el basado en la instrumentación acústica (batimetría).

Los métodos acústicos se basan en el registro mediante receptores sensibles a las frecuencias de emisión características de los instrumentos de los ecos del suelo marino y de las distintas capas en las que se divide la corteza. Estos ecos o reflexiones, se originan al paso de una onda acústica generada por una fuente de sonido artificial o emisor. El suelo marino refleja la mayor parte de la energía que incide en él, pero en las ondas de menor frecuencia la fracción de la energía acústica que se refleja es significativa (Fig. 7). Las ondas refractadas penetran en las formaciones rocosas, lo que permite efectuar sondeos más profundos y obtener imágenes estructurales del subsuelo. Es importante saber que la atenuación de la energía acústica es proporcional a la frecuencia de las ondas.

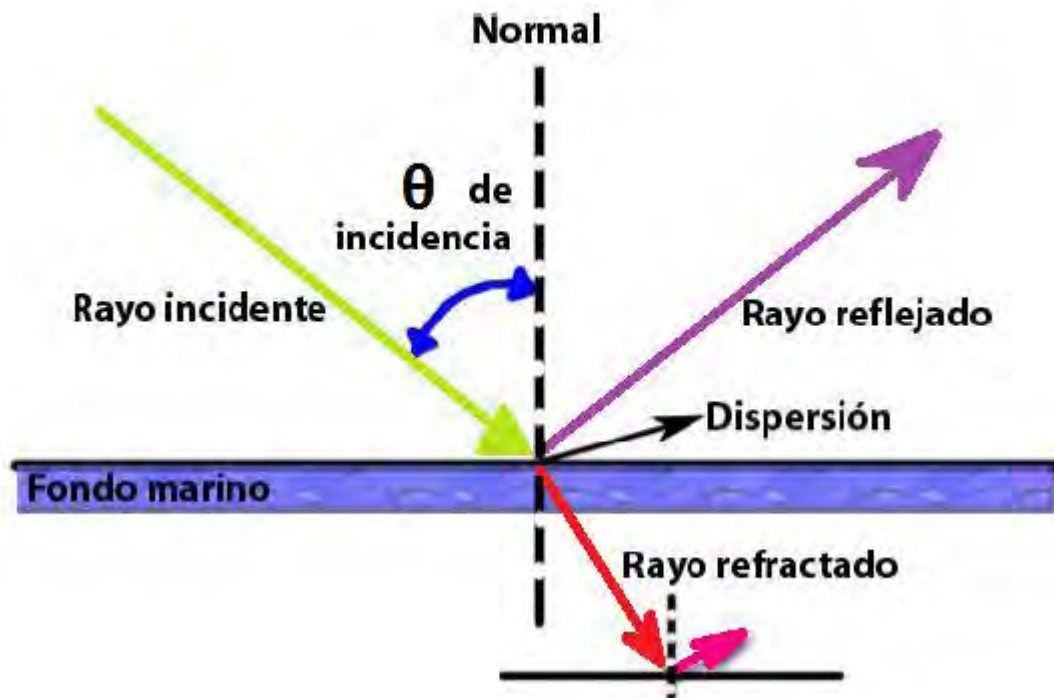


Figura 7. Descomposición de un pulso de sonido en un medio acústico

3.1. Ecosondeo monohaz

Las técnicas para medir las profundidades del fondo marino existen desde hace muchos siglos; A principios del siglo XIX se reconoció la posibilidad de conocer la profundidad midiendo el tiempo de viaje de pulsos sónicos que se reflejaban en el piso oceánico, aunque no fue sino hasta principios del siglo XX que el desarrollo tecnológico permitió la aplicación de este principio físico de la propagación del sonido en el agua de mar, con el fin de conseguir un registro continuo y medidas confiables de las profundidades. Este instrumento fue un sonar llamado ecosonda, el cual permite medir el tiempo transcurrido desde el momento en que las ondas acústicas son emitidas por un transductor, esta onda acústica se propaga en el agua hasta alcanzar el fondo, donde produce un eco el cual regresa hacia el transductor y es registrado. Posteriormente, la onda acústica es transformada en una señal eléctrica para alcanzar al receptor, donde se aplica una serie de algoritmos para detectar el eco proveniente del fondo. Conociendo la información de los tiempos se transforma en profundidad (distancia) teniendo en cuenta la velocidad de propagación del sonido en el agua (1,500 m/s) [Michaud *et al*, 2009].

En este método la energía acústica se transmite de manera tal que se obtienen los ecos de sólo una parte del piso marino, lo cual se logra dirigiendo el sonido a través de un haz especial que presenta una forma parecida a un cono. (Fig. 8).

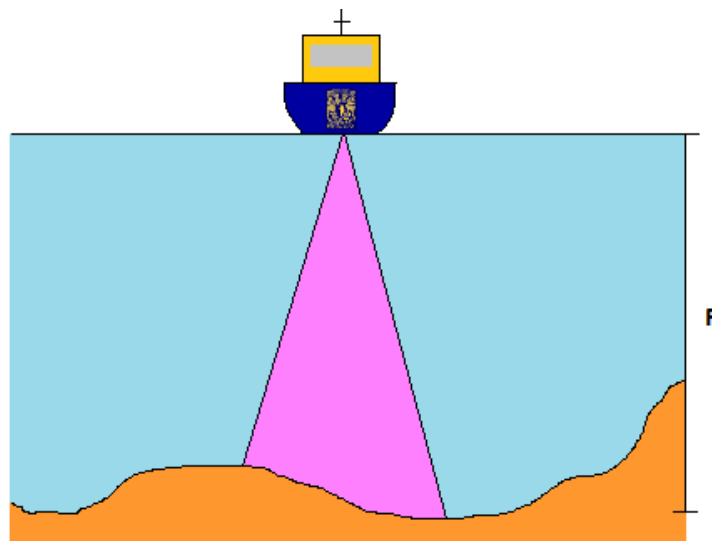


Figura 8. Principio de una ecosonda monohaz, P=profundidad de la columna de agua [Modificada de Michaud *et al*, 2009].

3.2. Ecosondeo multihaz

Dadas las dimensiones de los océanos, la pequeña área registrada por el haz de las ecosondas monohaz resultó ser insuficiente para explorar de forma eficiente y sistemática el fondo marino. Esta falta de información detallada de la morfología del suelo marino generaba una escasa explicación sobre algunos fenómenos geológicos y geofísicos, lo que ocasionó una gran necesidad de cubrir grandes áreas en menor tiempo y con mayor eficiencia, por lo que se impulsó el desarrollo de sistemas capaces de mapear extensas zonas. Estos sistemas fueron llamados multihaz, ya que emitían varios haces de sonido ordenados en forma de abanico generalmente en una serie de posiciones con dirección perpendicular a la línea de navegación "acros-track", o en dirección del transecto de navegación "along track". El área que barren en el piso oceánico en forma lateral es conocida como "Swath" y el ancho del "acros-track" es conocido como swath width. (Fig. 9).

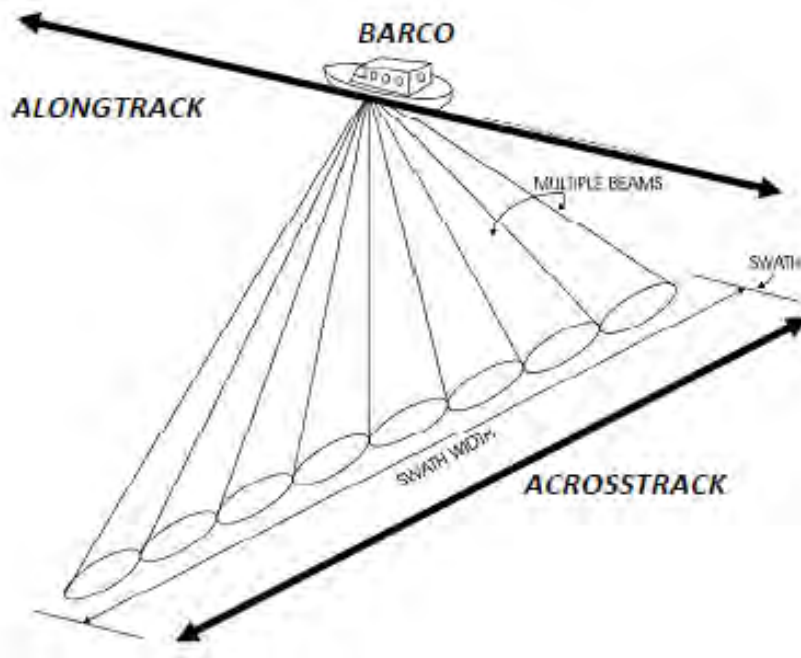


Figura 9. Esquema de un sistema multihaz

Una ecosonda multihaz opera a una frecuencia entre 10 KHz y 400 KHz y permite obtener y generar mapas del fondo marino con una alta precisión, que depende del tipo de sistema y de la fuente. El rango de profundidad que logra alcanzar varía desde los 50 m hasta los 11,000 m [Michaud *et al*, 2009].

Los transductores de los equipos se encuentran dentro de una góndola debajo del casco del barco donde se pueden distinguir dos arreglos; el arreglo de emisión orientado de proa a popa y el arreglo de recepción orientado de estribor a babor, generando un montaje en forma de "T" ("Mill cross"). Ambos grupos de transductores están protegidos por una ventana de titanio de 6 mm.

El equipo emite el sonido al fondo marino en dirección transversal al movimiento del barco y después recibe estos ecos de la onda enviada en numerosos haces con una apertura máxima de 150°, aunque también puede trabajar con sectores angulares de 105° y 90°. Así consigue una amplitud de barrido que puede llegar a ser 3.5 veces el valor de la profundidad. Por cada emisión "ping", se recolecta a lo largo de un ciclo las profundidades correspondientes a cada haz. (Fig. 10)

Se conoce que para un transductor, el ancho del haz es inversamente proporcional a la apertura del transductor, expresada en términos de longitud de onda. Así entre mayor sea la apertura, el haz resultante es más estrecho en la dirección ortogonal a la longitud del transductor [Michaud *et al*, 2009].

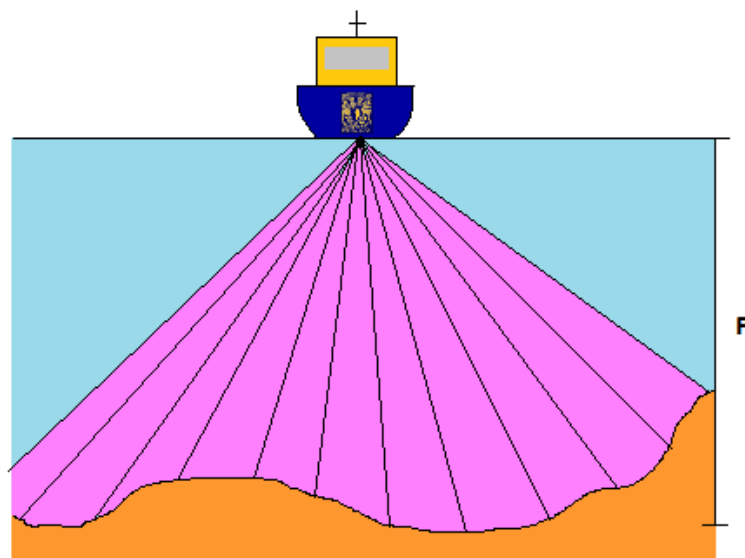


Figura 10. Principio de una ecosonda multihaz, P=profundidad de la columna de agua [Modificada de Michaud *et al*, 2009].

3.2.1 Características de una ecosonda batimétrica multihaz

Frecuencia acústica (f): La frecuencia es un elemento importante para caracterizar una ecosonda ya que ésta determina:

- *El alcance de la ecosonda:* La atenuación del sonido en el agua crece muy rápidamente con la frecuencia
- *El tamaño de las antenas:* La generación de señal de baja frecuencia necesita antenas de grandes dimensiones (Transductores y receptores).
- *La resolución espacial:* Es mejor en frecuencias altas y antenas de gran tamaño, está directamente ligada a la finura de los haces.

Ecosonda	Profundidad de trabajo	Frecuencia	Tipo de objeto
Grandes profundidades	100 a 12000 m	10 -15 KHz	Talud, dorsales y fondos abisales
Medianas profundidades	30 a 3000 m	30 – 50 KHz	Plataforma, talud
Pequeñas profundidades	5 a 500 m	80 – 120 KHz	Plataforma continental
Zona muy somera	1 a 100 m	200 – 400 KHz	Zonas litorales

Tabla 1. Rango de frecuencias utilizadas en batimetría. Relación entre la frecuencia vs profundidad utilizada y el objeto de estudio.

Numero de haces: 135 para ecosondas profundas y 254 para ecosondas someras

Apertura angular: Corresponde a la anchura de la zona sonificada (entre 90° a 150°).

Duración del impulso emitido (t): El impulso emitido “ping” corresponde a una porción de señal sinusoidal limitada a una duración t . Cuando mayor es la duración del impulso, mayor es el alcance, aunque se obtiene una menor resolución.

Cadencia de emisión: Es el tiempo transcurrido entre dos pings consecutivos de la ecosonda.

Por otro lado, algunos de los factores importantes a considerar de una ecosonda batimétrica son:

- Alcance: Es el límite de profundidad más allá del cual el sistema no es capaz de proporcionar mediciones fiables.

- La resolución: Es la capacidad del sistema para distinguir dos objetos cercanos. Depende de la anchura del haz, cuanto más fino es el haz mayor es su resolución.

- La precisión: La precisión de una ecosonda refleja la calidad de la estimación de la profundidad (precisión vertical) y de la posición de las sondas (precisión horizontal) determinados por el sistema. La precisión global depende en primer lugar de la precisión de la ecosonda (medidas de precisión de ángulos y distancia), y en segundo lugar de la precisión de los sensores auxiliares (sistema de posicionamiento, control de posición, medición de la marea, velocidad etc.)

3.3. Registro del movimiento del buque

Los datos de batimetría ya sean multihaz o monohaz, son recolectados en una plataforma móvil como lo es un buque. El movimiento continuo del buque sobre el agua al navegar provoca que existan desviaciones, por lo tanto se obtienen datos que no son fiables y es necesario corregirlos. Para poder registrar adecuadamente estos movimientos se coloca un sistema de referencia en el buque; hasta hace un tiempo existía como única solución el sistema de compensación del oleaje basado en la medida de los movimientos mediante acelerómetros mecánicos. Eran ideales por su bajo costo pero su mayor desventaja es que necesitaban de continuas y complicadas calibraciones además de sus imprecisiones. Para este propósito los sensores inerciales con un sensor de rumbo (usualmente un girocompás) o sensores inerciales con la integración de información GPS son usados actualmente para medir el comportamiento de la plataforma de levantamiento.

El comportamiento de un buque consiste en cuatro movimientos críticos en el registro de cada uno de los pings en los barridos laterales (Fig. 11) los cuales son utilizados para corregir las posiciones de los multi-ecos, estos movimientos son:

1.- *Roll*, es el balanceo alrededor del eje longitudinal o movimiento que inclina "acuesta" al buque hacia estribor y babor.

2.- *Pitch*, es el cabeceo por el movimiento de rotación alrededor del eje transversal, o movimiento angular que levanta la proa del buque

3.- *Yaw*, es la rotación alrededor del eje Z, movimiento sobre el plano horizontal que "gira" el buque.

4.- *Heave*, es la traslación vertical sobre el eje z, o variaciones de altitud por consecuencia del oleaje.

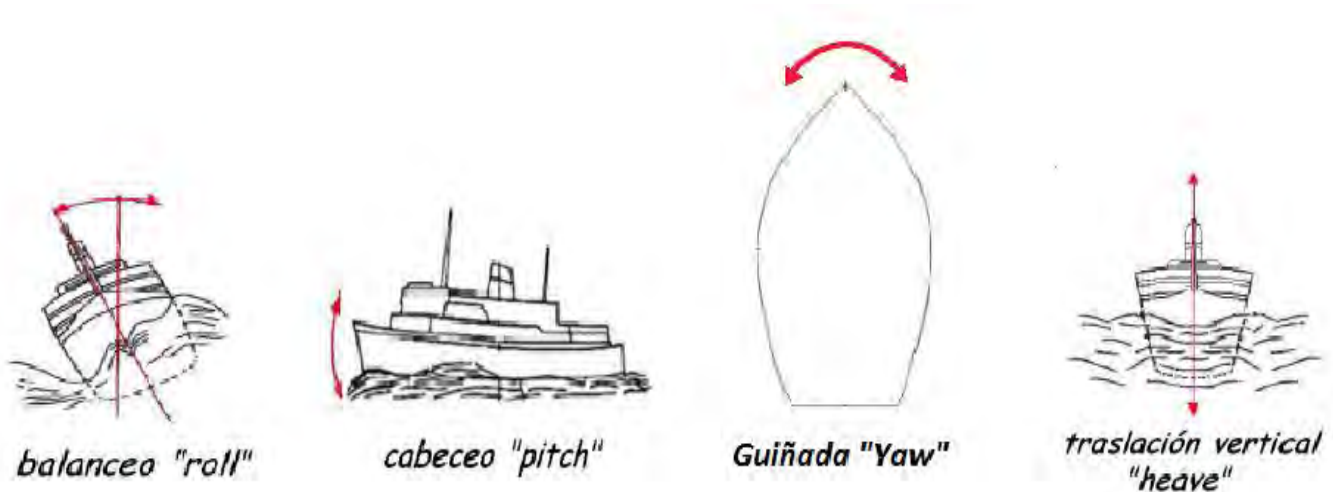


Figura 11. Movimientos del buque. [Modificada de Manual Caris].

Generalmente la magnitud de estos movimientos depende de factores meteorológicos como el oleaje, corrientes, viento; así como la operación y el diseño del buque.

3.4. Propagación acústica en el mar

En los levantamientos batimétricos multihaz es importante conocer la distribución de la velocidad acústica en el agua de mar, a través de la columna de agua, de igual manera es necesario conocer los parámetros que influyen en la variación de tal información.

En el agua, los sonidos se propagan con mayor rapidez y menor pérdida de energía que en el aire; las ondas sonoras y ultra sonoras se transmiten en el mar a una velocidad entre 1,400 y 1,600 m/s esto se debe a que el agua del mar no se encuentra comprimida, es decir, no se puede reducir a un menor volumen, por lo que la absorción de las ondas sonoras es mínima, contrariamente a lo que sucede en la atmósfera en donde los sonidos se absorben a distancias muy cortas.

Por las características del agua del mar la velocidad de propagación del sonido cambia de acuerdo con las variaciones de temperatura, salinidad, densidad y presión. Una observación que tiene importantes implicaciones acústicas es que estas propiedades se estratifican horizontalmente sobre la mayoría de los océanos del mundo [Cifuentes Lemus y Torres-García., 1986].

La *temperatura* superficial del agua del mar depende del calor que absorbe de las radiaciones energéticas que recibe del Sol, así como de la cantidad de calor que posteriormente el mar regresa a la atmósfera. Por lo tanto, el balance térmico del océano se establece por la diferencia entre el calor ganado y el perdido, pudiendo variar latitudinalmente; es mayor la absorción de calor en bajas latitudes y mayor la pérdida en las altas.

El efecto de la temperatura es considerablemente mayor que el de la salinidad y la presión en las aguas superficiales, debido a que en ellas alcanza sus máximos valores y presenta rápidas variaciones; pero conforme aumenta la profundidad, la acción de este factor pierde importancia, ya que se estabiliza peculiarmente después de los 1,000 m donde se presenta una temperatura de casi 4° C.

La *salinidad* está controlada, principalmente, por los cloruros, sulfatos y carbonatos que se encuentran disueltos en el agua del mar, y su distribución no es uniforme ni constante, varía de un lugar a otro, tanto en dirección horizontal como en vertical, e incluso sufre oscilaciones en un mismo punto del océano, con el transcurso del tiempo [Cifuentes Lemus y Torres-García., 1986]. El factor fundamental que determina las variaciones de salinidad en un área marítima concreta es la pérdida o ganancia de agua ya sea por fenómenos como evaporación, congelamiento, precipitación, deshielo y aportes de ríos, agua dulce y sedimentos.

El agua más salina se encuentra en latitudes medias, donde la evaporación es mayor, mientras que en agua menos salina se encuentra en el ecuador y en las regiones polares donde la gran precipitación y el deshielo, respectivamente aportan agua dulce a los océanos.

La densidad del agua del mar consiste en su peso derivado de la cantidad de masa de sales por unidad de volumen de agua, por lo que es directamente proporcional a su salinidad, ya que a mayor cantidad de sales, existe una masa superior por unidad de volumen de agua; en cambio, es inversamente proporcional a la temperatura siendo, a mayor temperatura la densidad menor.

La densidad también puede variar con la profundidad, por lo que se encuentra una estratificación del agua del mar, es decir, se presenta una separación horizontal de las capas de agua de diferente densidad. Si la densidad aumenta con la profundidad, la estratificación será estable debido a que las capas más pesadas quedan en el fondo; pero si disminuye con la profundidad, la estratificación será inestable, y puede cambiar totalmente por los movimientos del océano al hundirse las capas pesadas que están en la superficie.

La circulación superficial, se debe principalmente al viento, ya que mezcla las capas más superficiales generando un ascenso de aguas superficiales de menor temperatura hacia la superficie. Esta capa varía estacionalmente debido al flujo de calor en la capa, al viento y el oleaje.

La *presión* es producida por el peso de la columna de agua que gravita sobre una superficie situada a una determinada profundidad, más la presión atmosférica que actúa sobre la superficie del mar [Cifuentes Lemus y Torres-García., 1986].

4. MÉTODOS

El método utilizado en este trabajo de investigación comprende dos etapas; la primera etapa de adquisición de datos del levantamiento geofísico marino de las campañas oceanográficas "Chicxulub II" y "Chicxulub III"; y la segunda etapa corresponde al procesamiento de los datos adquiridos en estos levantamientos geofísicos.

4.1. Adquisición de datos

4.1.1. Campañas oceanográficas CHICXULUB II Y CHICXULUB III

Los datos analizados en este estudio geofísico fueron recolectados durante dos campañas oceanográficas a bordo del B/O Justo Sierra de la UNAM, denominadas CHICXULUB II y CHICXULUB III, en 2015 y 2016 respectivamente. Esta embarcación está dedicada a la investigación científica en los sectores del Golfo de México y Mar Caribe. A bordo se cuenta con un sistema de navegación GPS que presenta una precisión de posicionamiento de hasta 3 m. Este sistema es utilizado para el posicionamiento geográfico de los registros obtenidos por el ecosondeo batimétrico. Ambas campañas fueron coordinadas por la Dra. Ligia Pérez Cruz del Instituto de Geofísica de la UNAM y con la colaboración del Dr. David Salas de León del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM.

El levantamiento geofísico de la campaña oceanográfica CHICXULUB II, se realizó en la parte sur del Escarpe de Campeche, sobre el borde occidental de la plataforma de Yucatán; su localización geográfica se encuentra entre los 21°18' N y 21°46' N de latitud y entre los 92°33'W y 92°38'W de longitud, cubriendo una superficie aproximada de 881.62 km². Este levantamiento constó de 8 perfiles, de los cuales 7 tienen una orientación de norte a sur, solo el perfil restante presenta una orientación de sureste a noroeste. El levantamiento geofísico se llevó a cabo del 28 al 30 de abril de 2015.

Con el fin de obtener una cobertura mas amplia y detallada de los datos del levantamiento geofísico de la zona sur del Escarpe de Campeche, se llevó a cabo un segundo levantamiento batimétrico durante la campaña oceanográfica CHICXULUB III. Esta nueva zona se encuentra ubicada mas al sur del primer levantamiento entre 20°55'N y 21°19'N de latitud y entre los 92°33'W y 92°23'W de

longitud, cubriendo una superficie aproximada de 784.07 km². En este levantamiento se obtuvieron 21 perfiles, de los cuales 19 tienen una orientación de norte a sur y los 2 perfiles restantes presentan una orientación de noroeste a sureste. El levantamiento se realizó del 20 al 28 de abril de 2016. La velocidad de navegación del B/O Justo Sierra se mantuvo entre los 4.5 y 6 nudos durante ambos levantamientos geofísicos, ya que a esta velocidad se lograba evitar la turbulencia generada por el movimiento de la embarcación en altas velocidades y se lograba obtener un registro de los datos sin alteraciones. (Fig. 12)

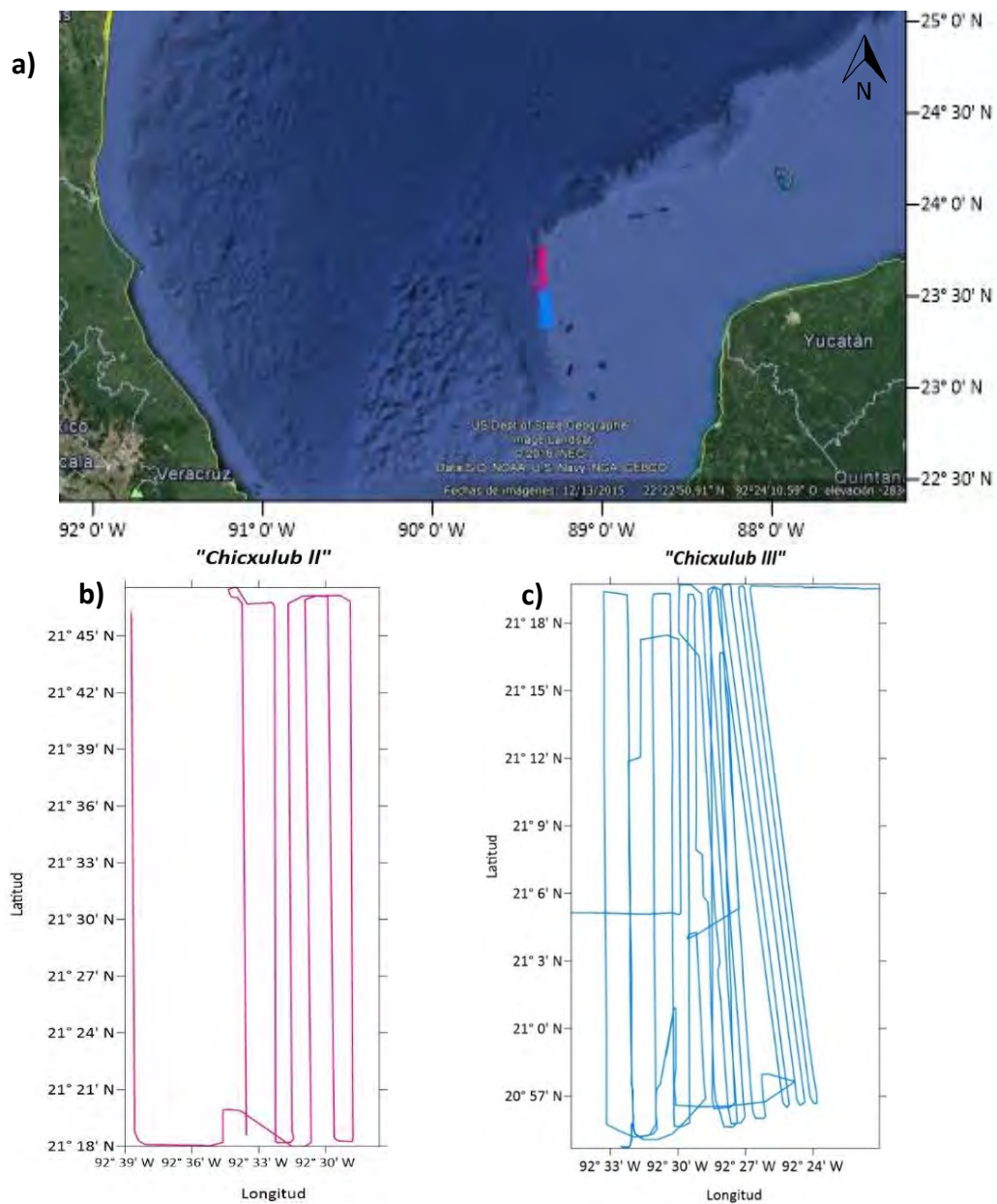


Figura 12.a) Localización de los levantamientos geofísicos marinos de las dos campañas a bordo del B/O JUSTO SIERRA; b) Recorrido de la campaña CHICXULUB II y c) Recorrido de la campaña CHICXULUB III.

4.1.2. Datos de batimetría

Los datos de Batimetría de alta resolución de las campañas CHICXULUB II y CHICXULUB III se obtuvieron empleando una ecosonda multihaz de 30 KHz, modelo EM300, fabricada por la marca Simrad Kongsberg.

La ecosonda Multihaz EM300 está diseñada para realizar mapeos desde 10 m hasta más de 5,000 m de profundidad, cuenta con 135 haces para obtener el mismo o menor número de mediciones y es capaz de tener una cobertura angular de hasta 150°.

La cobertura (swath width) que puede obtenerse en un fondo plano es de aproximadamente seis veces la profundidad. El tamaño del sector de cobertura angular y el ángulo de enfoque de cada haz pueden ser variados automáticamente con la profundidad de acuerdo con la cobertura alcanzable: En aguas con poca profundidad (menores a 500 m) el ancho de barrido lateral se reduce considerablemente; en aguas con profundidades mayores a 2,000 m la cobertura llega a ser de 4 a 5 km y en aguas profundas de hasta 5,000 m el ángulo de cobertura se reduce a casi 1 km. Existe la posibilidad de elegir entre una configuración de haces; *equidistante* con la huella acústica constante o *equiangular* con el espaciamiento angular constante entre haces.

Las Unidades principales del sistema EM300 de Kongsberg-Simrad son:

- 1.- Arreglo de transductores de transmisión
- 2.- Arreglo de transductores de recepción
- 3.- Unidad transceiver (conectada a los sistemas de posicionamiento, movimiento y tiempo del buque)
- 4.- Estación de trabajo del operador

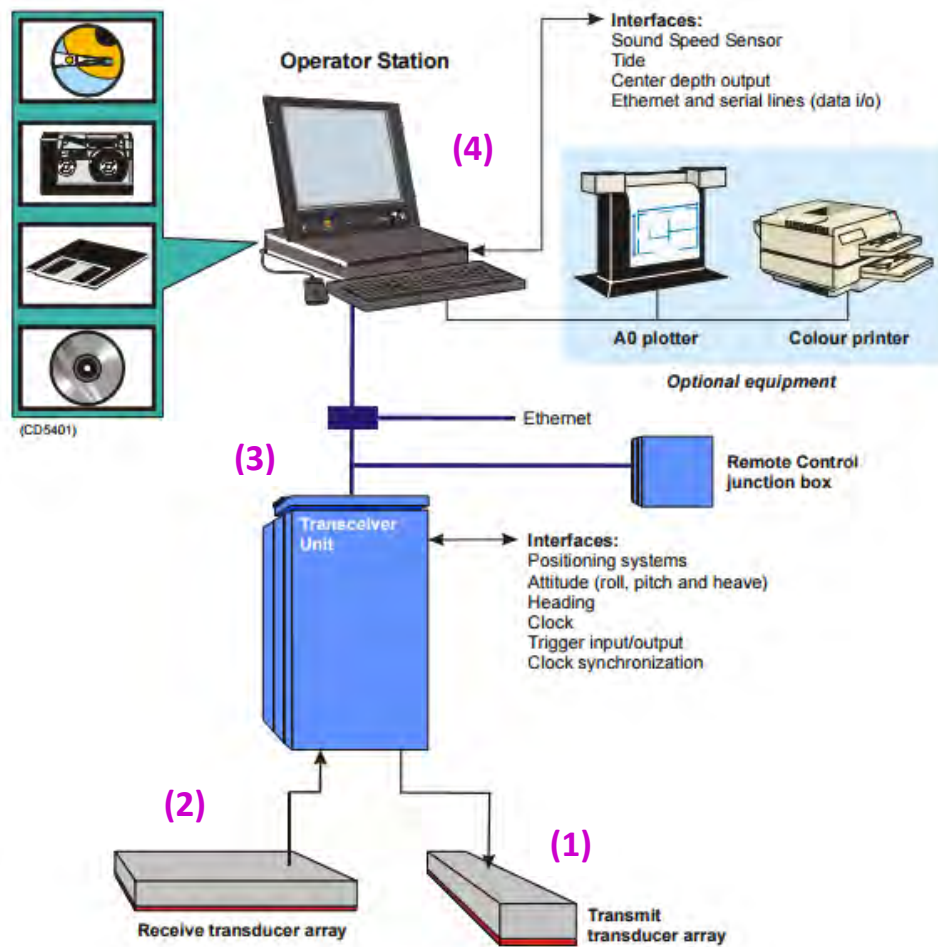


Figura 13. Módulos que componen la Ecosonda Multifaz EM 300 instalada en el B/O Justo Sierra consiste en: (1) Arreglo de transductores de transmisión; (2) Arreglo de transductores de recepción; (3) Unidad transceiver y (4) Estación de trabajo del operador [Manual de operador EM 300]

Arreglos de transductores

Los arreglos de transductores en la ecosonda EM 300 se encuentran en forma lineal con una configuración de haces cruzados, con unidades separadas para transmisor y receptor. La unidad de transmisión se extiende 1.5 o 3 metros de proa a popa con 432 u 864 elementos individuales y la unidad de recepción se extiende de 0.8, 1.6 o 3.3 m de babor a estribor con 32, 64 o 128 elementos individuales. Las longitudes de las unidades pueden ajustarse de acuerdo con los requisitos de instalación particulares. (Fig. 14)

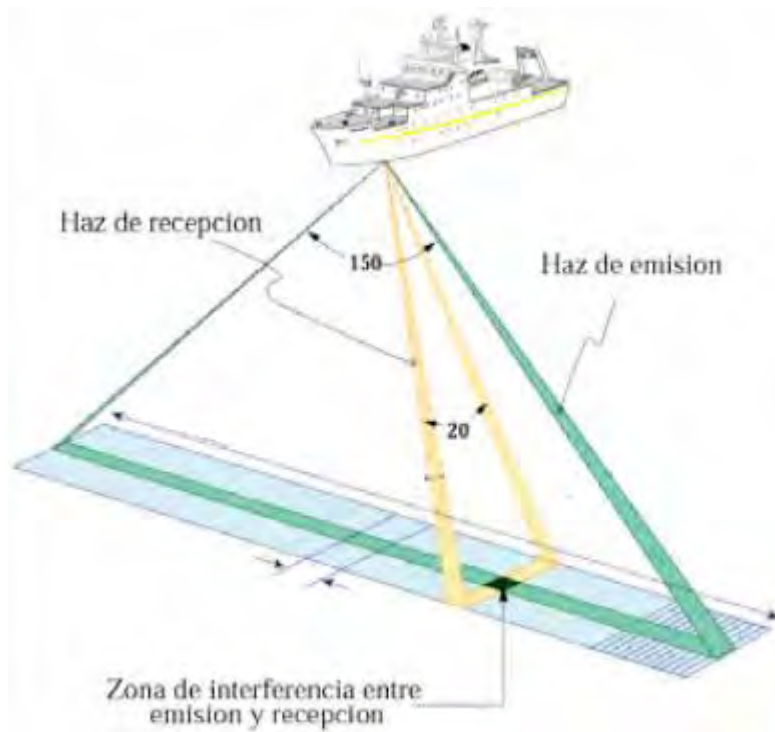


Figura 14. Geometría del sistema de haces cruzados [Modificada de Michaud et al, 2011]

Unidad transceiver

La unidad transceiver, se encuentra montada en un gabinete (Central de Registro), está contiene toda la electrónica de los arreglos de transductores del transmisor y del receptor, la formación de haces y los procesadores de detección de fondo, así como todas las interfaces de sensores externos en tiempo real, como sensor de movimiento del buque, girocompás, el posicionamiento y el reloj externo.

Estación de trabajo del operador

La consola de control y operación de la EM300 es una estación de trabajo con un sistema operativo Windows XP. Esta estación de trabajo esta enlazada vía Ethernet con el resto de las componentes del sistema (Transceiver, MRU-5 y Seapath200); la EM 300 cuenta con el software SIS "Seafloor Information System" de la marca Simrad Kongsberg para establecer los parámetros de operación, adquisición de datos y el desplegado grafico de los datos en un marco geográfico.

4.2. Procesamiento de datos

El procesamiento de los datos de batimetría multihaz registrados en las dos campañas oceanográficas CHICXULUB II y CHICXULUB III es elaborado con el paquete software de CARIS HIPS & SIPS 7.0. Después de adquirir los datos batimétricos con la ecosonda EM300, los datos requieren un post-procesado para poder corregir los errores sistemáticos que fueron introducidos durante la fase de adquisición como los cambios en las velocidades verticales en la columna de agua y el posicionamiento del buque entre otros, para posteriormente realizar una limpieza y filtrado de los datos y poder lograr un modelo digital de terreno suavizado.

El modelo sobre el flujo de trabajo realizado con este software se muestra en la Figura 15:



Figura 15. Flujo de trabajo en CARIS para ecosondas Multihaz.

Archivo de embarcación

Todos los proyectos en HIPS & SIPS deben contener un archivo de embarcación, en éste se describen las dimensiones del Buque de investigación, la instalación y la calibración de equipos instalados. La información del archivo de embarcación se utiliza en múltiples procesos y puede crearse o modificarse a través del módulo "Vessel Editor". El contenido de este archivo es necesario para realizar el Merge (combinar) de todos los datos de los sensores para crear un registro de la posición o la profundidad final.

Los datos de la embarcación colectan información para generar representaciones gráficas de la Embarcación, las ventajas de conocer estos datos son

- Permiten localizar visualmente el Punto de Referencia (RP)
- Permiten localizar todos los sensores con relación al RP

Pasos para crear el archivo de la embarcación

- 1.- Se selecciona Edit – Vassel Shape del menú principal
- 2.- Se ingresan las dimensiones del diseño del B/O Justo Sierra de la UNAM (Fig.16)

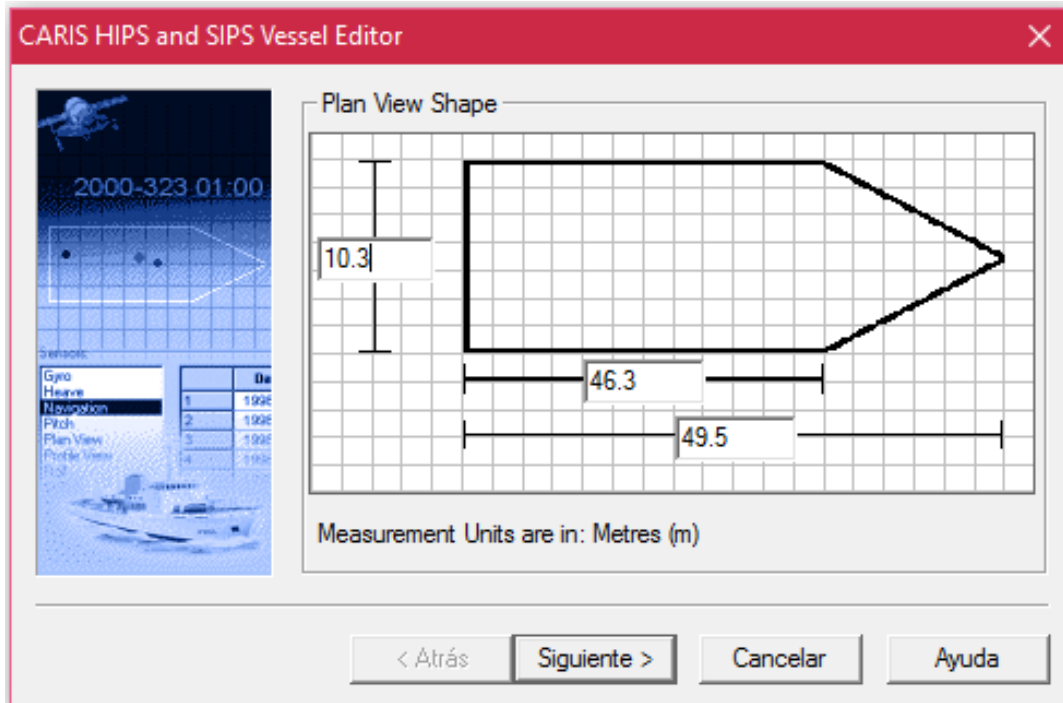


Figura 16. Dimensiones del del B/O "Justo Sierra": longitud total (eslora): 49.4 m; longitud principal: 46.3 m y ancho (manga): 10.3 m.

3.- Se ingresan las posiciones de vista plana.

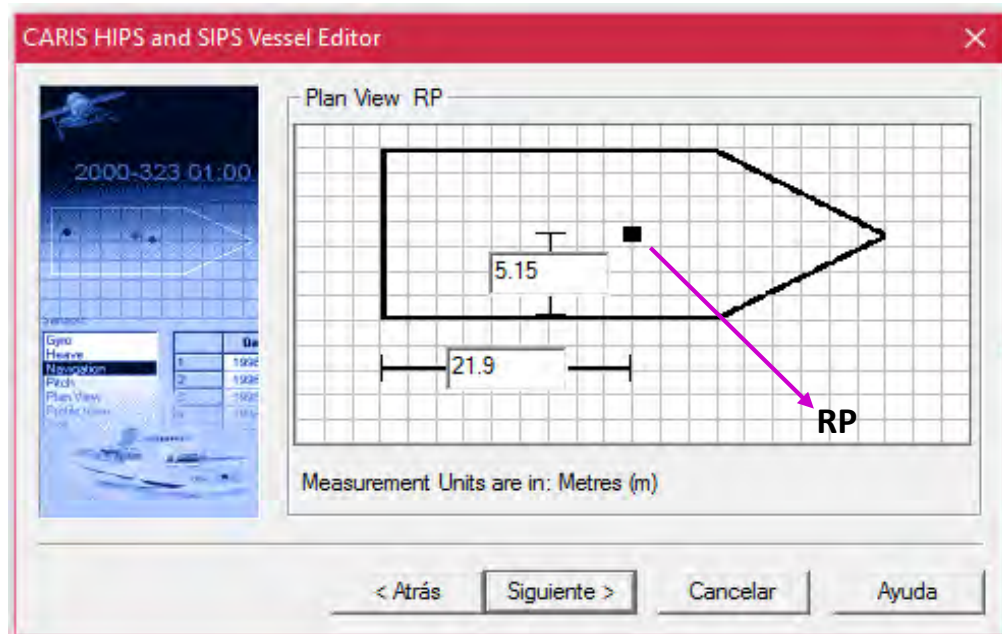


Figura 17. Dimensiones del B/O “Justo Sierra”, Vista Plana; 5.15 m de estribor, 21.9 m de popa

4.- Se ingresan las dimensiones de vista de perfil.

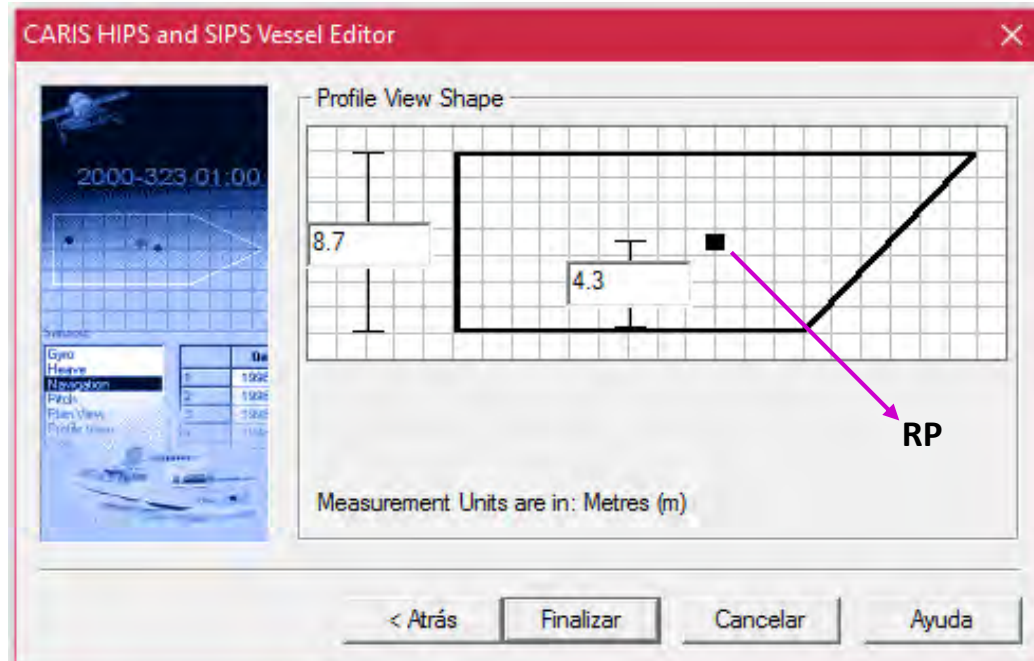


Figura 18. Dimensiones del B/O “Justo Sierra”, vista de perfil: Desde la quilla hasta RP: 4.3 m. Desde la quilla hasta la cubierta principal (punta): 8.7 m.

Al agregar las dimensiones del buque, se despliega un pantalla grafica 3-D de la embarcación y sus sensores.

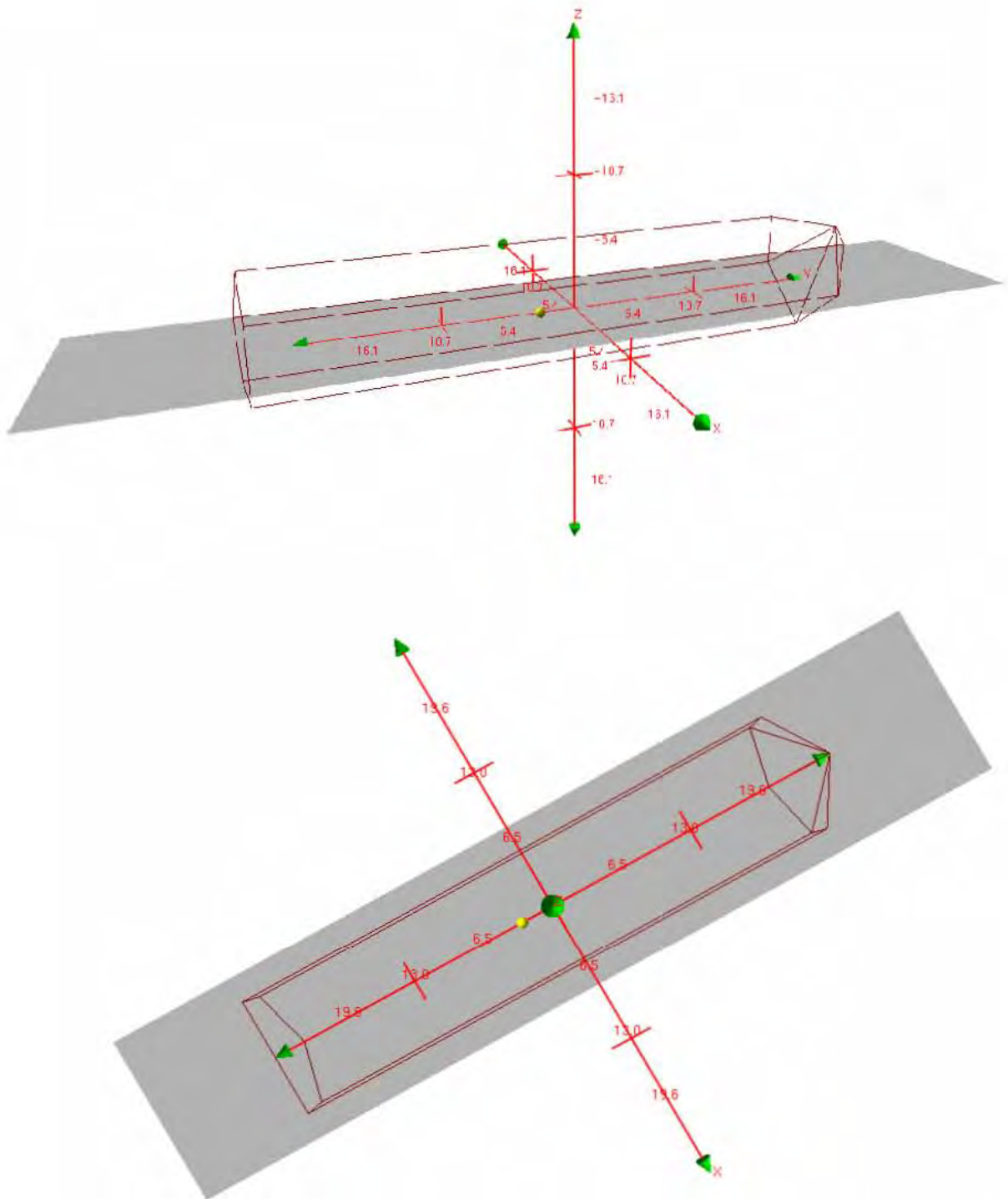


Figura 19. Dimensiones del B/O JUSTO SIERRA en 3D.

Proyecto nuevo

En Caris los datos se organizan en proyectos, toda la información sobre un proyecto se mantiene en una base de datos específica para cada uno de los proyectos, en esta parte del procesamiento, se proporcionan datos importantes como las fechas de los levantamientos, separados por días, el B/O en el que se llevó a cabo el levantamiento, el tipo de datos que fueron obtenidos, la descripción del proyecto, así como los parámetros geográficos del proyecto en zonas UTM.

Conversión de Datos

El proceso de conversión crea todos los nuevos archivos de datos dentro de la estructura del proyecto.

Los archivos *.all que se obtienen en el levantamiento batimétrico por las ecosondas Multihaz se convierten en archivo simrad para poder ser leídos por el Software (Fig. 20).

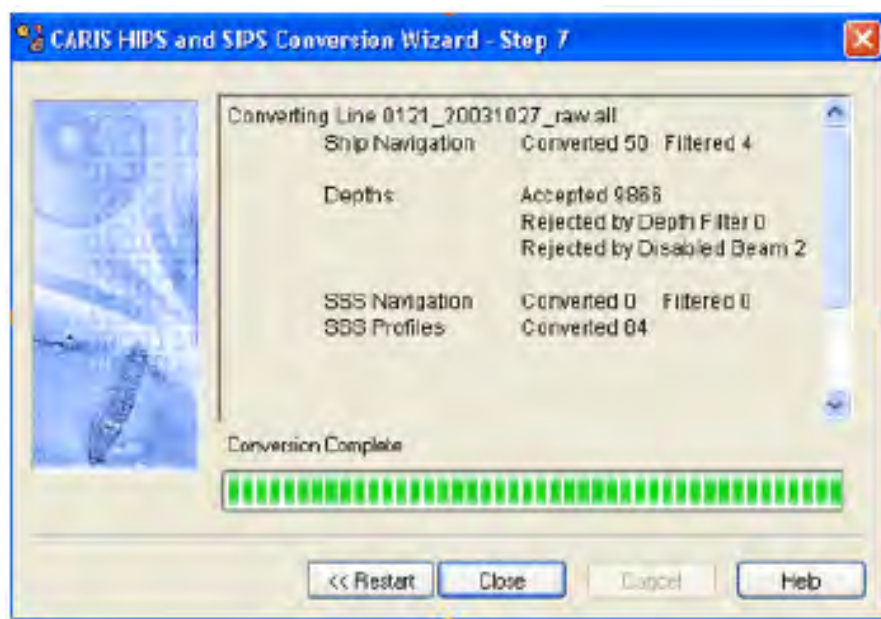


Figura 20. Ventana de conversión de datos multihaz

Guardar sesión

El archivo de sesión es un archivo de texto localizado en el directorio HIPS, que consiste en una serie de datos en formato XML describiendo:

- *Espacio de trabajo*: Creador de la sesión, nombre del proyecto, fechas de creación y ubicación de los datos fuentes de HIPS.
- *Extensión de la vista*: Es el tamaño de la última ventana utilizada y su ubicación.
- *Datos del Proyecto*: Líneas de levantamiento, archivos CARIS, imágenes de fondo y hojas de campo.

Esta sesión debe ser utilizada para organizar eficientemente los datos con los que se trabaja, lo que permitirá acceso más rápido y eficaz a los datos.

Velocidad del Sonido

Los perfiles de velocidad del sonido (SVP) se determinaron con mediciones de las características de la columna de agua, estas fueron adquiridas al inicio de cada levantamiento batimétrico por un CTD que consiste en una estructura integrada por 24 botellas y numerosos sensores para conocer diversas propiedades de la columna de agua (salinidad, temperatura, presión, velocidad de la corriente, etc). Esto permite visualizar el cambio de estas propiedades con la profundidad y qué caracteriza a las distintas masas de agua.

Estos perfiles obtenidos con las diferentes características de la columna de agua se utilizaron durante la adquisición de los datos en el B/O para realizar la corrección por velocidad de sonido.

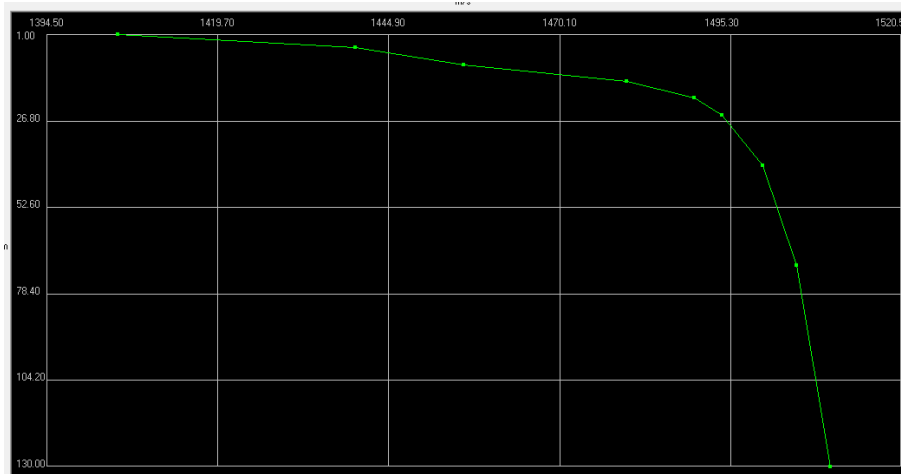


Figura 21. Ejemplo de un SVP en Caris

Cargar datos de marea

Los datos de observación de las mareas se deben cargar por cada línea del levantamiento antes de que el proceso de merge (combinar) sea ejecutado. Estos datos de marea se utilizan para generar profundidades finales referidas al punto cero de marea, restando la marea de la profundidad de sondeo.

Existen dos opciones para realizar la carga de la marea:

- Cargar un archivo *.TID para aplicar las observaciones de marea de una sola estación.
- Cargar un archivo *.ZDF para aplicar las observaciones de marea de múltiples estaciones

En el caso de este trabajo de investigación, se utilizaron archivos *.TID los cuales fueron proporcionados por el Servicio Mareográfico Nacional de la UNAM de las estaciones más cercanas a la zona de estudio, utilizando los datos de la estación de CELESTUN y la estación de SISAL para las campañas CHICXULUB II y CHICXULUB III respectivamente (Fig. 22).

Mapa de estaciones

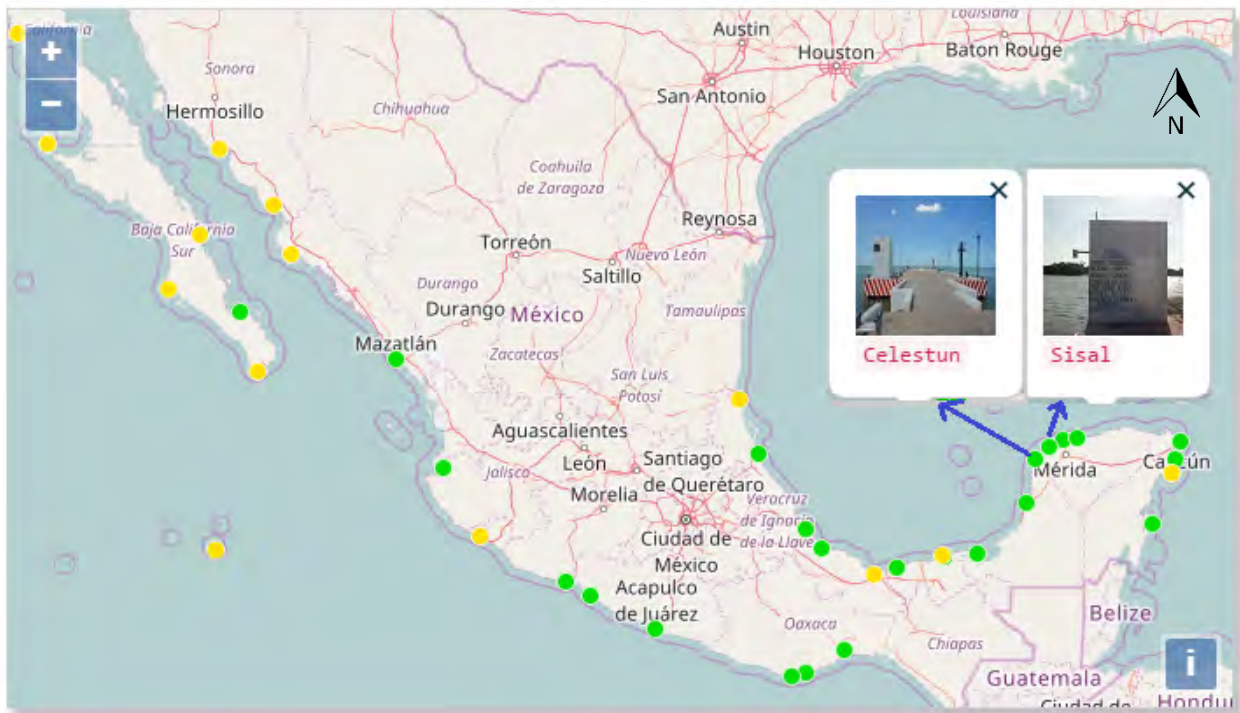


Figura 22. Mapa de estaciones del Sistema Mareográfico Nacional, UNAM

Se solicitaron los datos de mediciones de mareas correspondientes a los días en que se llevaron a cabo los levantamientos batimétricos en cada campaña CHICXULUB II y CHICXULUB III para con éstas crear el archivo de Mareas en el software CARIS correspondiente a cada campaña (Fig 23 y 24)

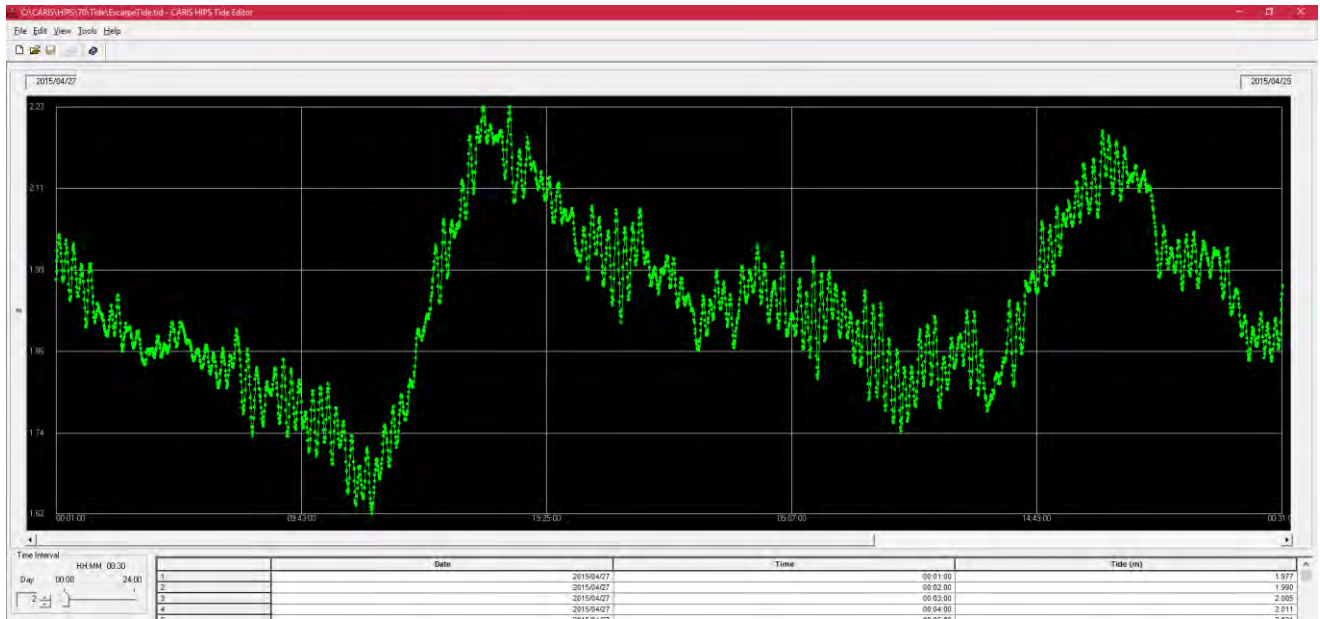


Figura 23. Archivo de Marea de la campaña CHICXULUB II de los días 28 y 29 de abril 2015

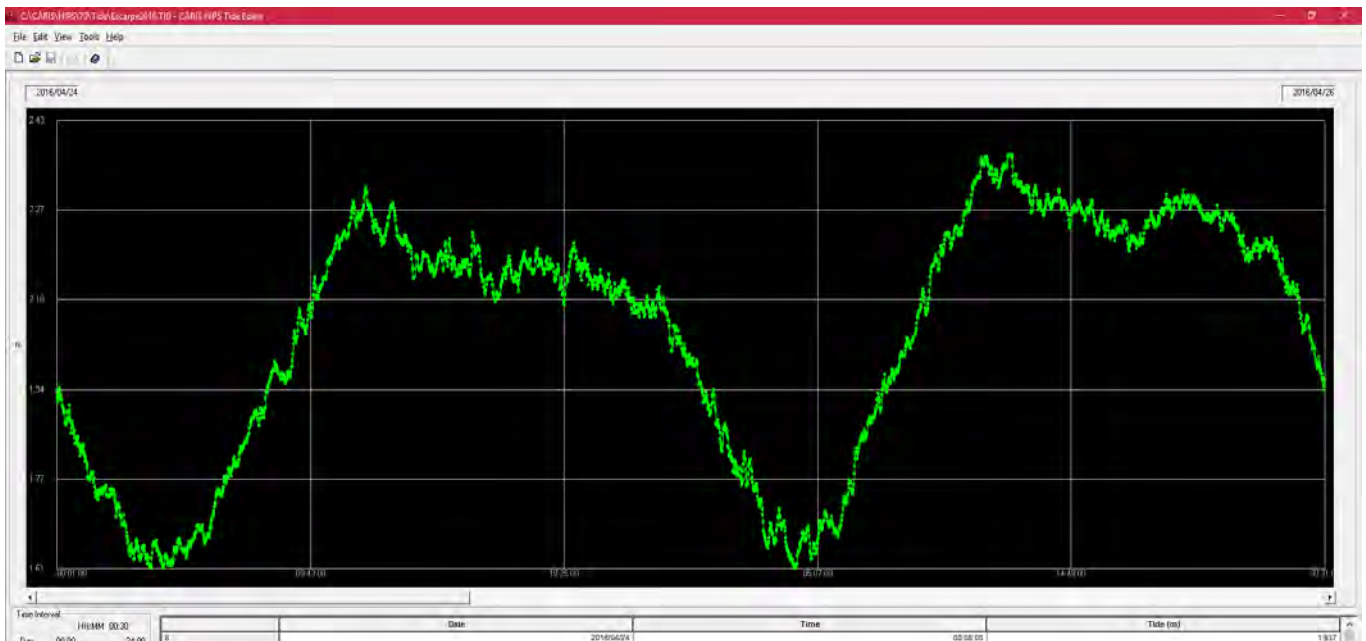


Figura 24. Archivo de Marea de la campaña CHICXULUB III de los días 20 al 28 de abril 2016

Merge

El proceso Merge o de combinación convierte en latitud y longitud los datos de las líneas del levantamiento y calcula la profundidad final tomando en cuenta toda la información de los desplazamientos verticales y horizontales.

Los datos deben ser combinados antes de realizar la superficie BASE así como de la limpieza de los datos (Fig. 25)

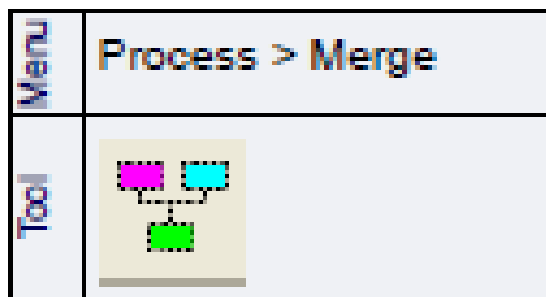


Figura 25. Icono para llevar a cabo el Merge dentro de la plataforma de CARIS

Nueva hoja de Campo

Las hojas de campo en HIPS & SIPS se utilizan para organizar los resultados de los datos de batimetría, limpiados y procesados. Juegan un papel importante en casi todos los procesos, estas hojas tienen dos propósitos principales en HIPS:

- Son esenciales para la creación de la Superficie Base
- Actúan como Mapas de CARIS

Una vez que se ha creado la nueva hoja de campo, esta aparece como una nueva capa en la pestaña **Layer** de la ventana de **Control**.

Es importante saber que los nombres de las hojas de campo, deben componerse solamente de caracteres alfanuméricos y sin espacios, por lo que las hojas de los paquetes de datos de cada campaña fueron nombradas como: "Escarpe" y "Escarpe 2016". (Fig. 26)

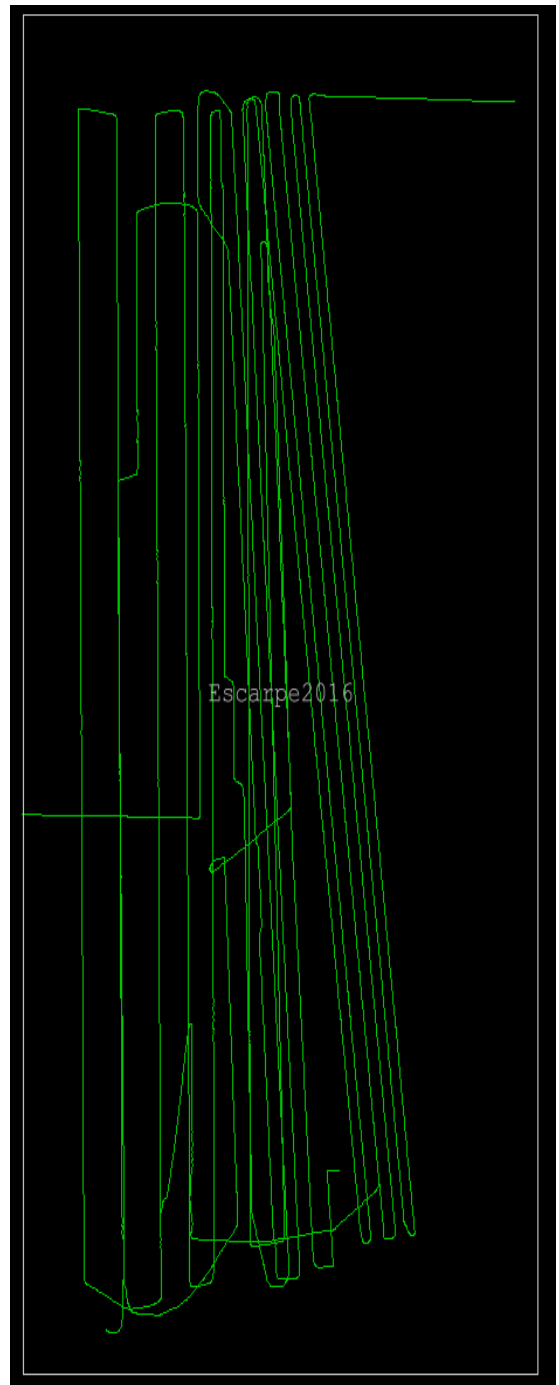
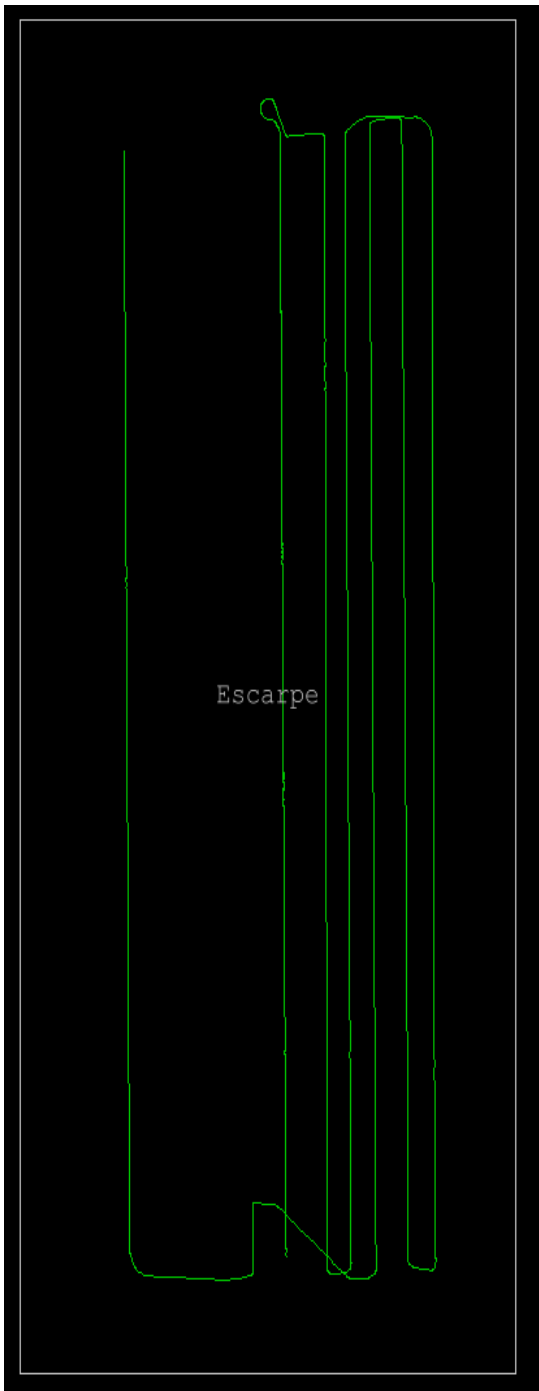


Figura 26. Hojas de campo realizadas para los datos de ambas campañas oceanográficas

Superficie Base

Una superficie base se utiliza para los siguientes fines:

- Como un fondo de ayuda visual al limpiar los datos de forma interactiva o automáticamente.
- Crear un archivo .TIFF georreferenciado que puede ser exportado a otros software, como sistemas de navegación en tiempo real.
- Exportar datos como un archivo de texto XYZ para que pueda ser importado como sondeos en un mapa CARIS o se utilizan para construir un modelo digital del terreno en otro software.
- Como una superficie del producto que se puede utilizar para construir curvas de nivel, selecciones de sondeo, perfiles y otras capas de datos. Estos datos más adelante se pueden utilizar para crear un gráfico *raster*.
- Como una función de control de calidad de los datos. Mediante la visualización de los valores de incertidumbre para los nodos, pueden identificarse datos erróneos y determinar si un área debe ser procesada de nuevo.

CARIS puede crear tres tipos diferentes de superficies:

- Superficie de ángulo de Barrido (Swath angle)
- Superficie de incertidumbre (Uncertainty)
- Superficie CUBE

Para este trabajo de investigación se decidió utilizar la superficie BASE por ángulo de barrido (Swath angle) ya que es un método de rasterización diseñado específicamente para los datos multihaz. Se trata de una representación precisa de datos multihaz, ya que considera la geometría actual del sistema de la ecosonda. Esto lo hace de tres maneras:

1.- Radio de influencia variable: El radio de influencia de cada sondaje se calcula a partir del ancho del haz del tipo de sonar seleccionado y se incrementa con la profundidad y el ángulo de contacto. Esto produce un incremento del tamaño de la huella con la distancia a la cabeza de la ecosonda

2.- Ponderación de la distancia: La ponderación de cada rango de sonido disminuye con la distancia desde el transductor. Esto reduce el efecto que los sondajes más alejados del transductor tendrán sobre la superficie BASE.

3.- Ponderación del ángulo de contacto: Los errores en los datos multihaz tienden a aumentar en magnitud en el exterior de los haces debido a las distancias al transductor. Esto tiende a magnificar los problemas de refracción y otros errores. La función de ponderación del ángulo de contacto se aplica a cada sondaje para reducir los efectos de los sondeos de haz externo en la superficie BASE

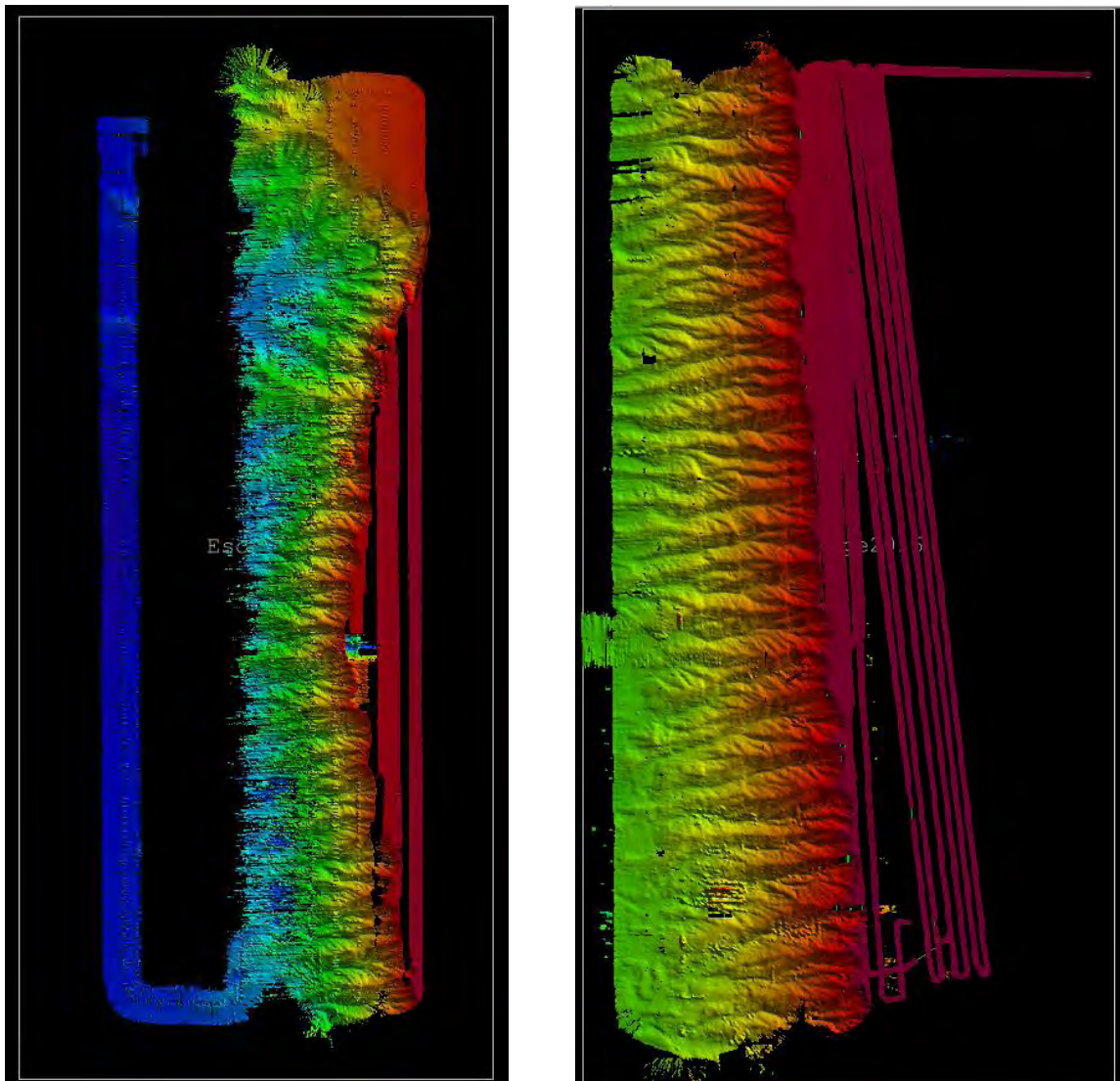


Figura 27. Superficies BASE de cada campaña, del lado izquierdo la correspondiente a CHICXULUB II y del lado derecho la de CHICXULUB III.

Limpieza y Edición de Datos

En este paso se utilizan dos herramientas dentro del paquete de HIPS & SIPS, denominada *Swath Editor* (Editor de bandas de sondaje) y *Subset Editor*, las cuales nos proporciona diferentes maneras para editar los datos de nuestros levantamientos batimétricos. (Fig. 28)

El mejor método recomendado es tener un acercamiento general de la morfología del fondo marino, usando las vistas del Editor de bandas de sondaje (*Swath Editor*), y la Superficie BASE; Se utiliza la información disponible para determinar información sensible en el Editor de bandas, como una herramienta que nos ayude a configurar y aplicar filtros en las líneas, removiendo manualmente los picos remanentes. Aunque las profundidades máximas y mínimas del área son los valores más importantes a determinar en un levantamiento general, también hay que tener en cuenta un promedio aproximado del ancho de barrido, para establecer la cantidad de datos que serán rechazados.

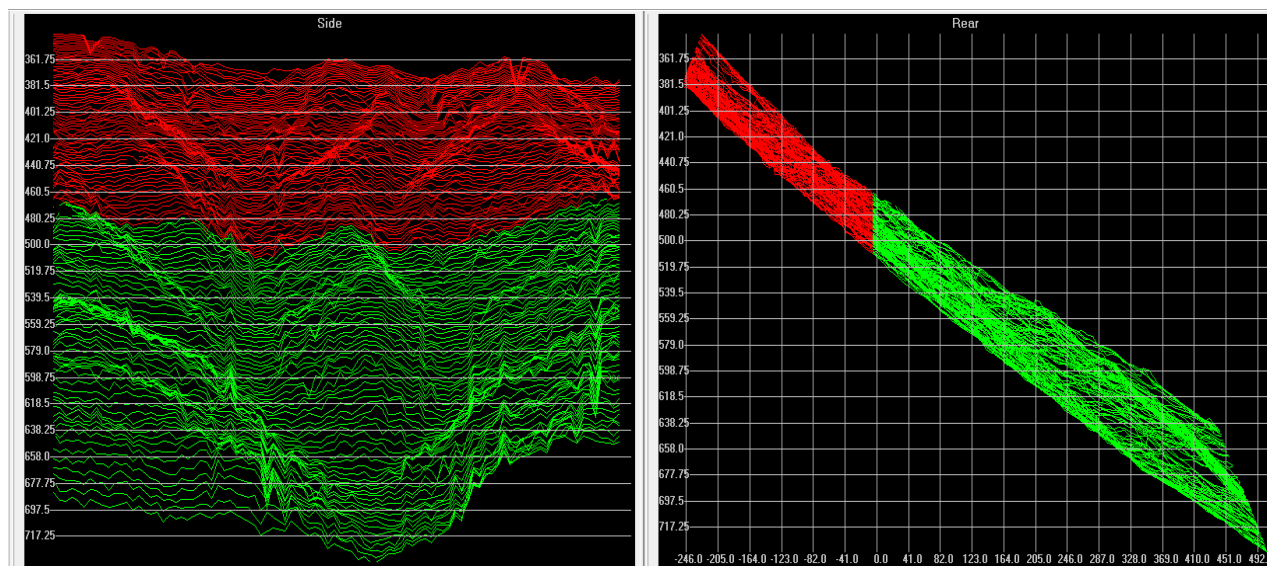


Figura 28. Ventana del editor de Bandas de sondaje con datos limpios de las Campañas.

La edición en Subset se refiere al proceso de subdividir el levantamiento por áreas y examinar todas las líneas de levantamiento dentro de cada área. El área, llamada "subset", se abre en un editor que proporciona herramientas de edición espacial, más que eso el "Subset Editor" nos permite examinar y editar los datos de sondeos de todas las líneas juntas, es una zona rectangular definida por el usuario, lo que nos permite que la limpieza de un gran conjunto de datos sea más manejable.

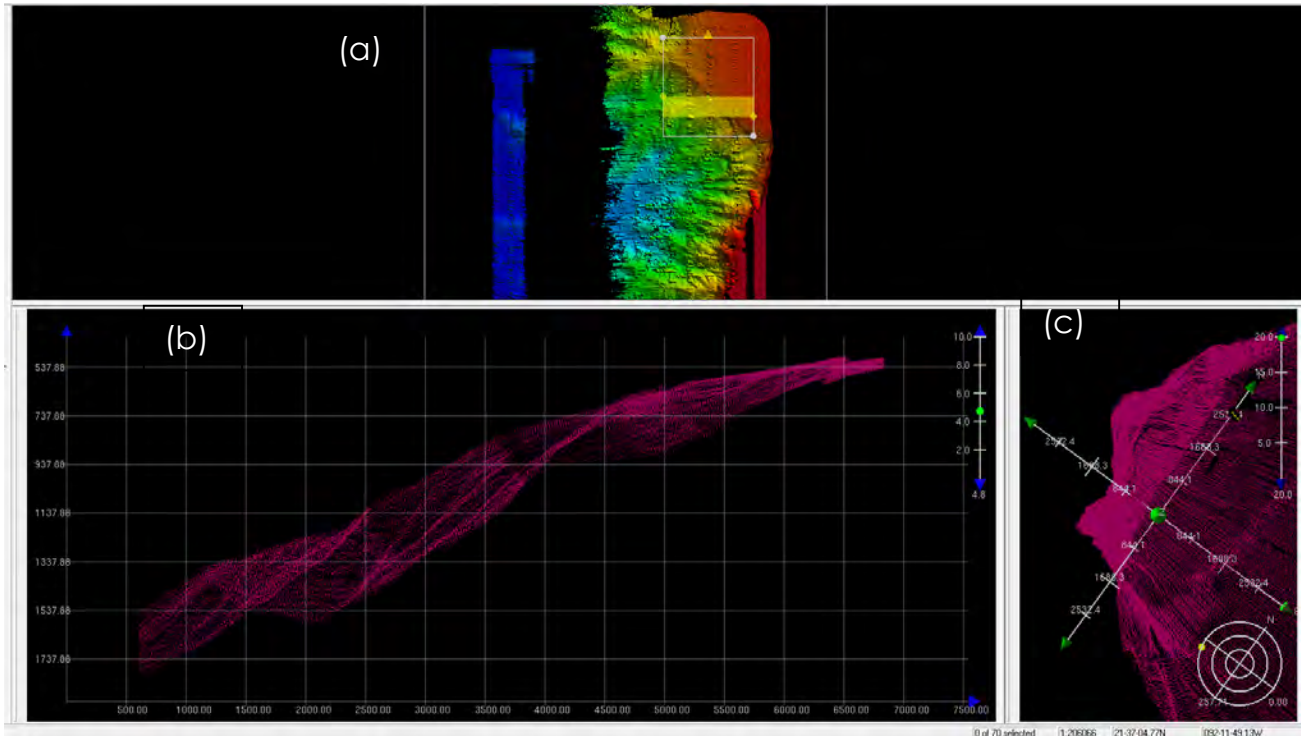


Figura 29. Ventanas del Subset editor; a) Muestra el tamaño del área que el usuario decide utilizar para limpiar los datos; b) Se muestra la interfaz con los datos de los perfiles para poder observar los datos erróneos y eliminarlos y c) Muestra el perfil en 3D de las áreas de limpieza.

La visualización de la superficie de referencia en el Subset editor permite la comparación de los datos obtenidos con la superficie seleccionada. Esto nos permite evaluar como los sondeos han contribuido a la creación de la superficie BASE e identificar áreas donde la superficie BASE se pudo haber desviado de los valores de las profundidades procesadas.

Después de haber terminado la edición de los datos y de haberlos limpiados en los dos editores, la superficie base aparecerá desactualizada, por lo que se necesita

recalcular, la función *Recompute* nos permite realizar la reconstrucción rápida de la superficie BASE para actualizar los cambios hechos.

Finalmente los datos batimétricos multihaz tienen la finalidad de generar un Modelo Digital del terreno (DTM) el cual pueda ser transferido posteriormente a otros sistemas de coordenadas. En caris con el menú Export se pueden exportar los datos a diferentes formatos, uno de ellos es en formato XYZ (Longitud, Latitud y profundidad), este formato es utilizado en diferentes paqueterías para interrelacionarlos con otros posibles datos geofísicos, para este trabajo de investigación se utilizó el paquete del software SURFER 13 en el cual se obtuvieron las representaciones gráficas de los resultado en cada levantamiento batimétrico.

5. RESULTADOS

5.1 Análisis de Resultados

Los datos de batimetría multihaz que fueron adquiridos con la ecosonda EM300 durante las campañas de CHICXULUB II y CHICXULUB III, se integraron en una carta batimétrica del relieve del fondo marino de la zona del borde occidental de la plataforma de Yucatán y el borde oriental del cañón de Campeche, abarcando un área aproximadamente de 1,608 km². El área del relieve del lecho marino de la primera campaña (CHICXULUB II) fue cubierto por 7 barridos laterales de mediciones batimétricas multihaz, con una distancia entre la mayoría de ellos de aproximadamente 1.5 y 2 km. Los valores batimétricos registrados en esta zona se encuentran en un intervalo de profundidades entre 214 m y 2,267 m, al final de la pared del talud; sin embargo, uno de los perfiles se realizó en una zona más alejada en dirección oeste con una distancia aproximada de 9 km del resto de los perfiles, en esa zona se registró una profundidad máxima de 3,022 m como se muestra en la figura 30. En la segunda campaña (CHICXULUB III) el área se cubrió con 21 barridos laterales con distancia entre ellos de alrededor de 1 a 1.5 km. Los valores batimétricos medidos en esta área se encuentran en un intervalo de profundidad de entre 100 m y 2,230 m. (Fig. 31)

Después de la interpolación con los datos de cada una de las zonas para obtener las imágenes finales, las zonas sin datos fueron recortadas para evitar interpretaciones donde no existe información. La escala de colores en las figuras es relativa a los mínimos y máximos registrados en cada una de las áreas; siendo los rojos para los mínimos valores de profundidad en CHICXULUB II de 200 m y en CHICXULUB III de 100 m y los azules, para los máximos de profundidad 3,000 m para ambas campañas. En los resultados se incluyen también mapas de relieve donde los niveles de contorno están a cada 400 m (Figs. 32).

La morfología del relieve del talud continental mostrada en cada una de las cartas de datos batimétricos en 3D presenta un descenso suave de la pendiente y está conformado en su mayoría por cañones submarinos como se observa en las figuras 33 y 34 respectivamente.

La Figura 36 muestra la ubicación del área de estudio en relación a la extensión del Golfo de México, mientras que en la Figura 35 se observa el resultado del acoplamiento de los datos batimétricos de ambas campañas. En la región norte del área de estudio se puede observar que sobre el borde de la plataforma continental presenta una profundidad mayor (400 m), la cual va disminuyendo hacia el sur de la plataforma continental (100 m).

5.2. Relieve batimétrico y mapas de contorno

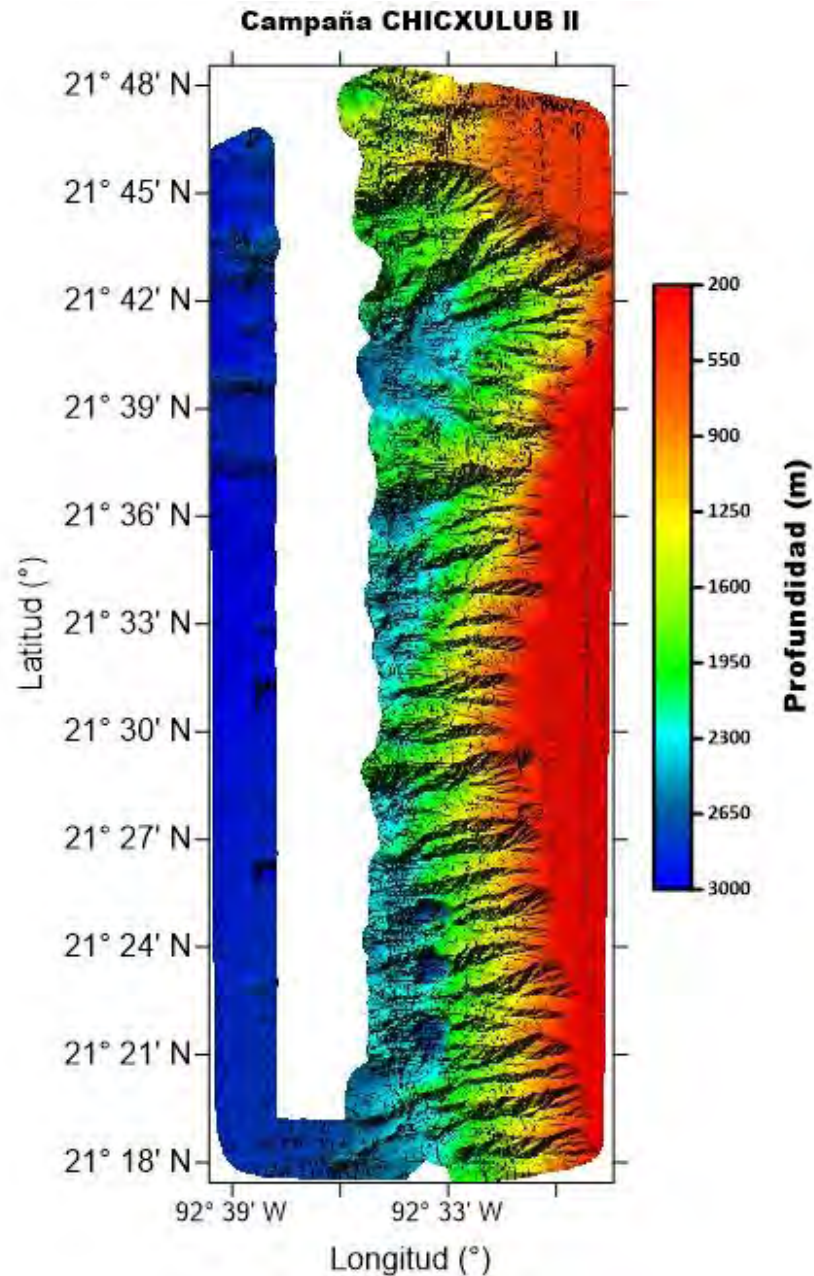


Figura 30. Relieve batimétrico de la zona de estudio de la primera campaña CHICXULUB II

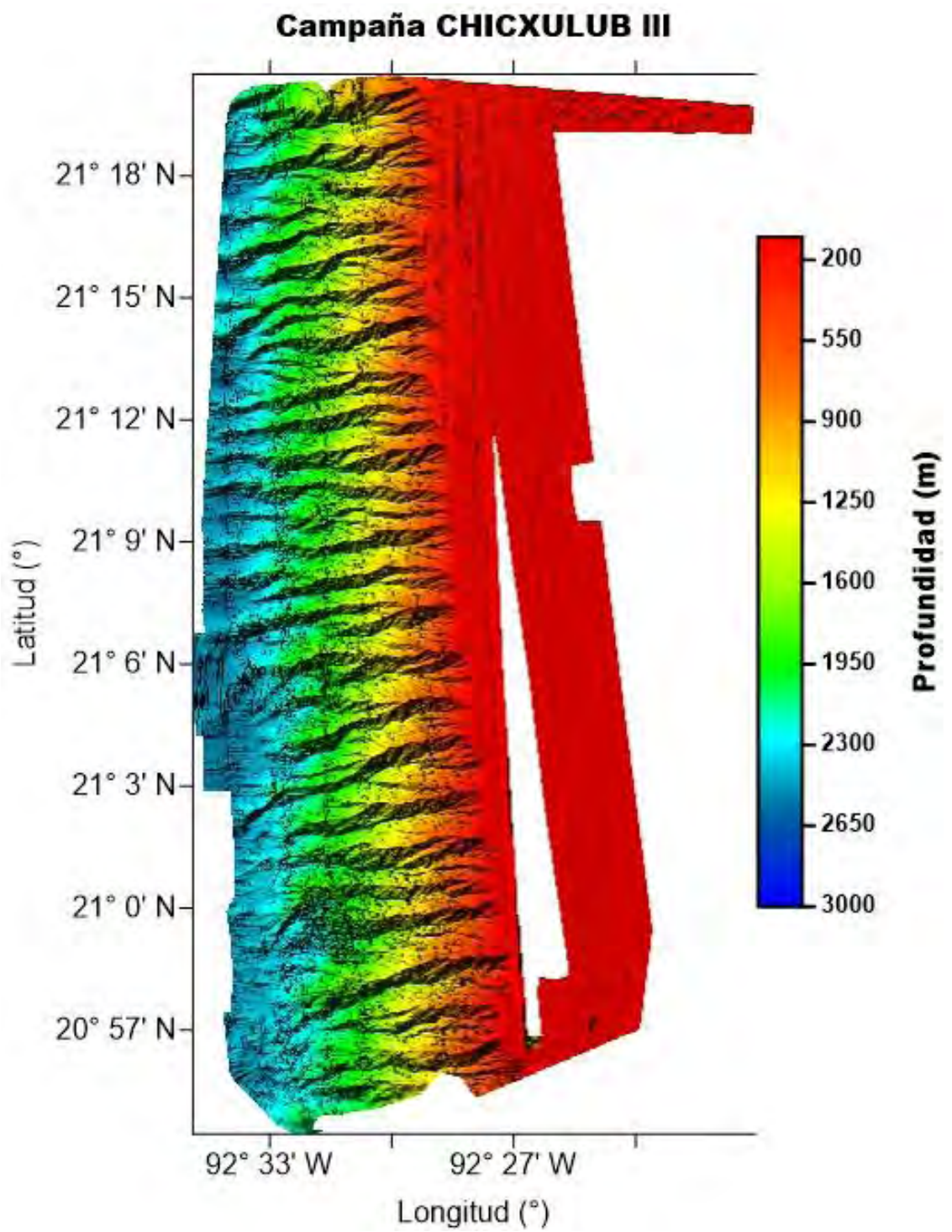
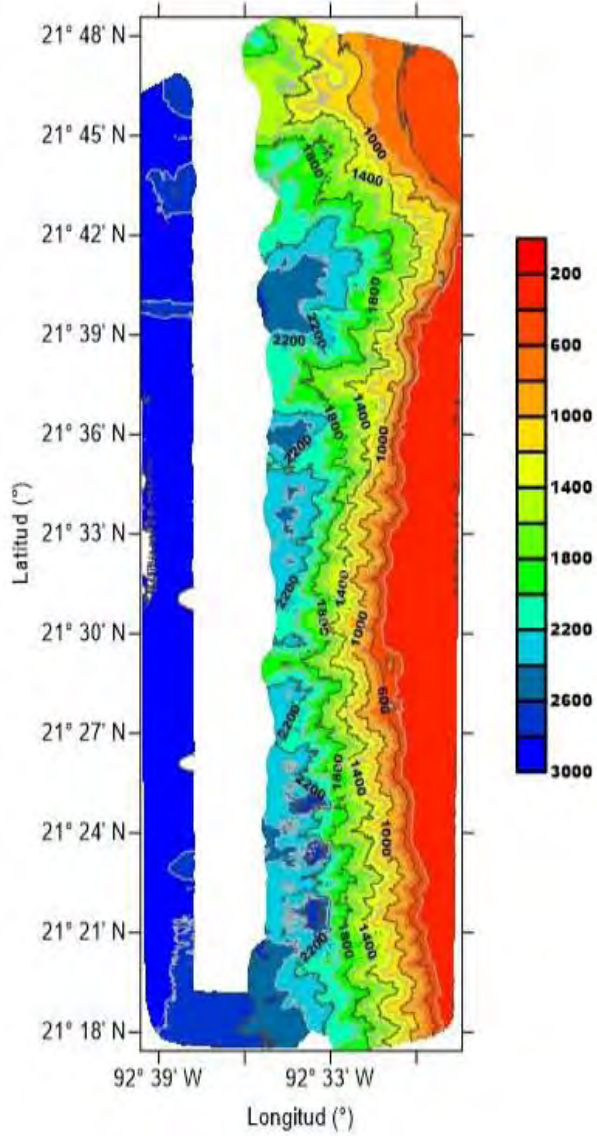


Figura 31. Relieve batimétrico de la zona de estudio de la primera campaña CHICXULUB II

Campaña CHICXULUB II



Campaña CHICXULUB III

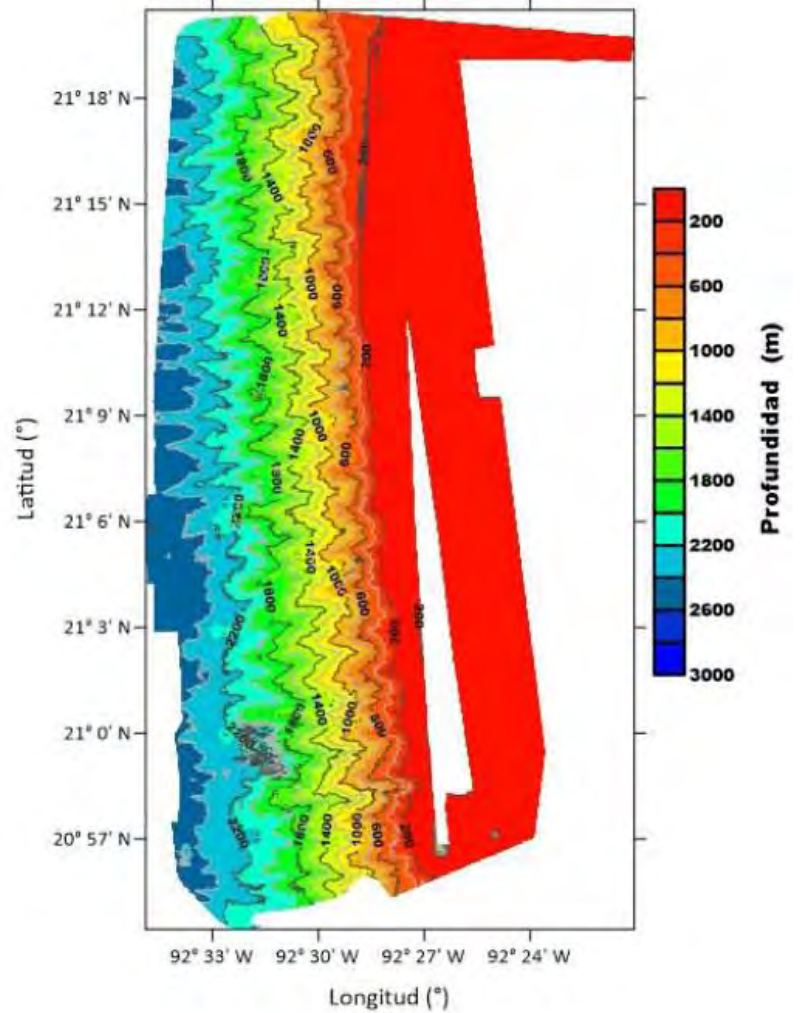


Figura 32. Mapas de contorno de los datos batimétricos en ambas campañas

5.3. Modelo batimétrico 3D

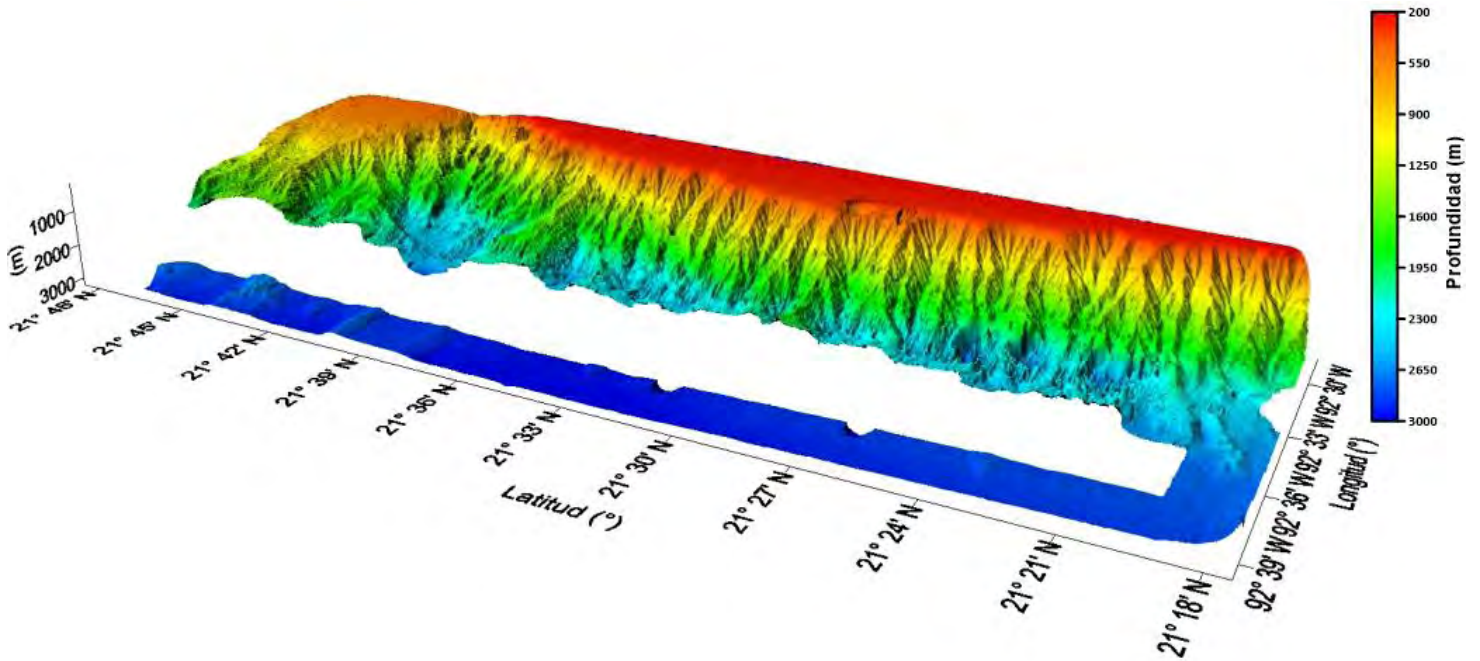


Figura 33. Proyección en 3D del relieve batimétrico campaña CHICXULUB II

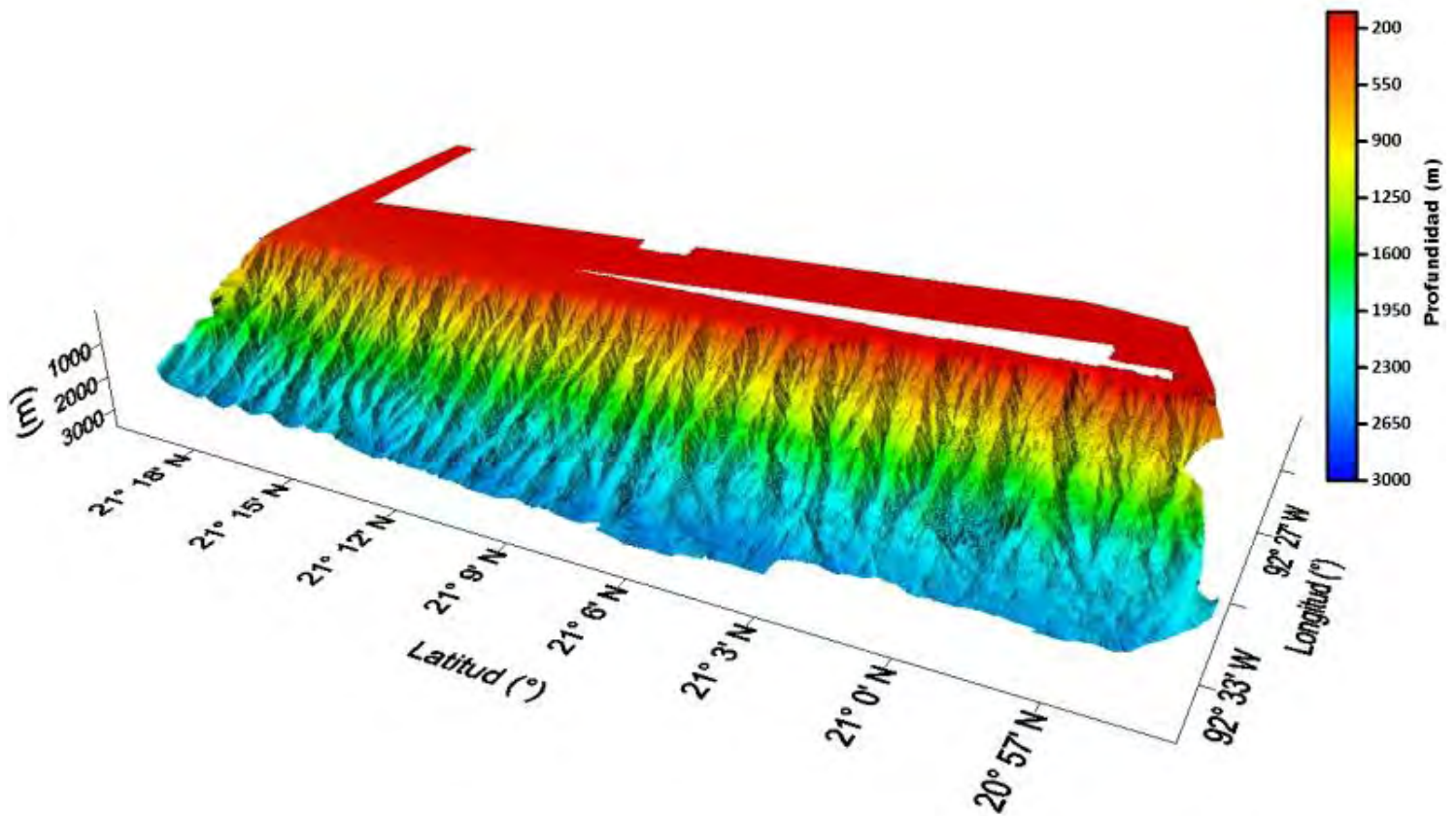
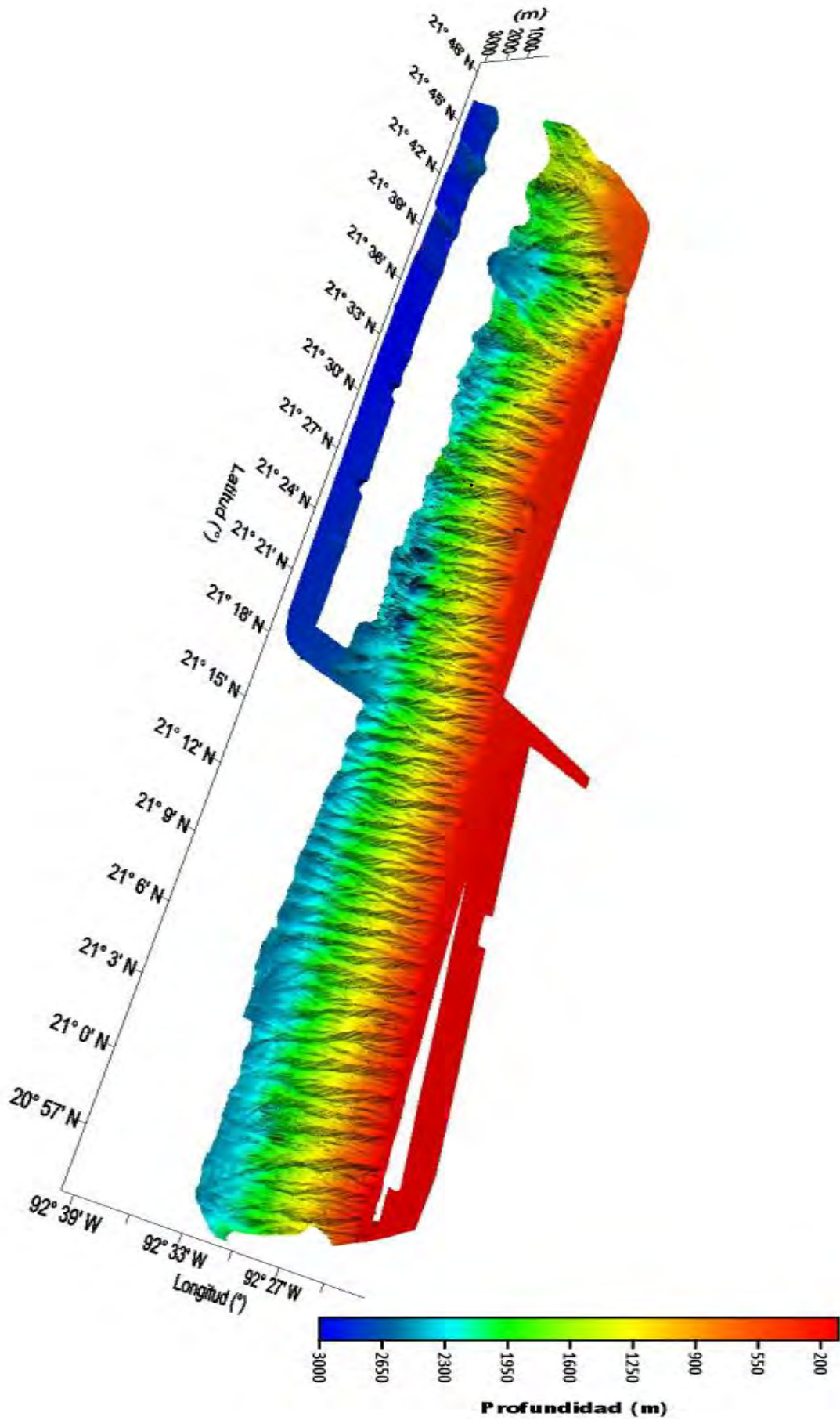


Figura 34. Proyección en 3D del relieve batimétrico campaña CHICXULUB II

Figura 35. Modelo batimétrico en 3D de los datos de ambas campañas



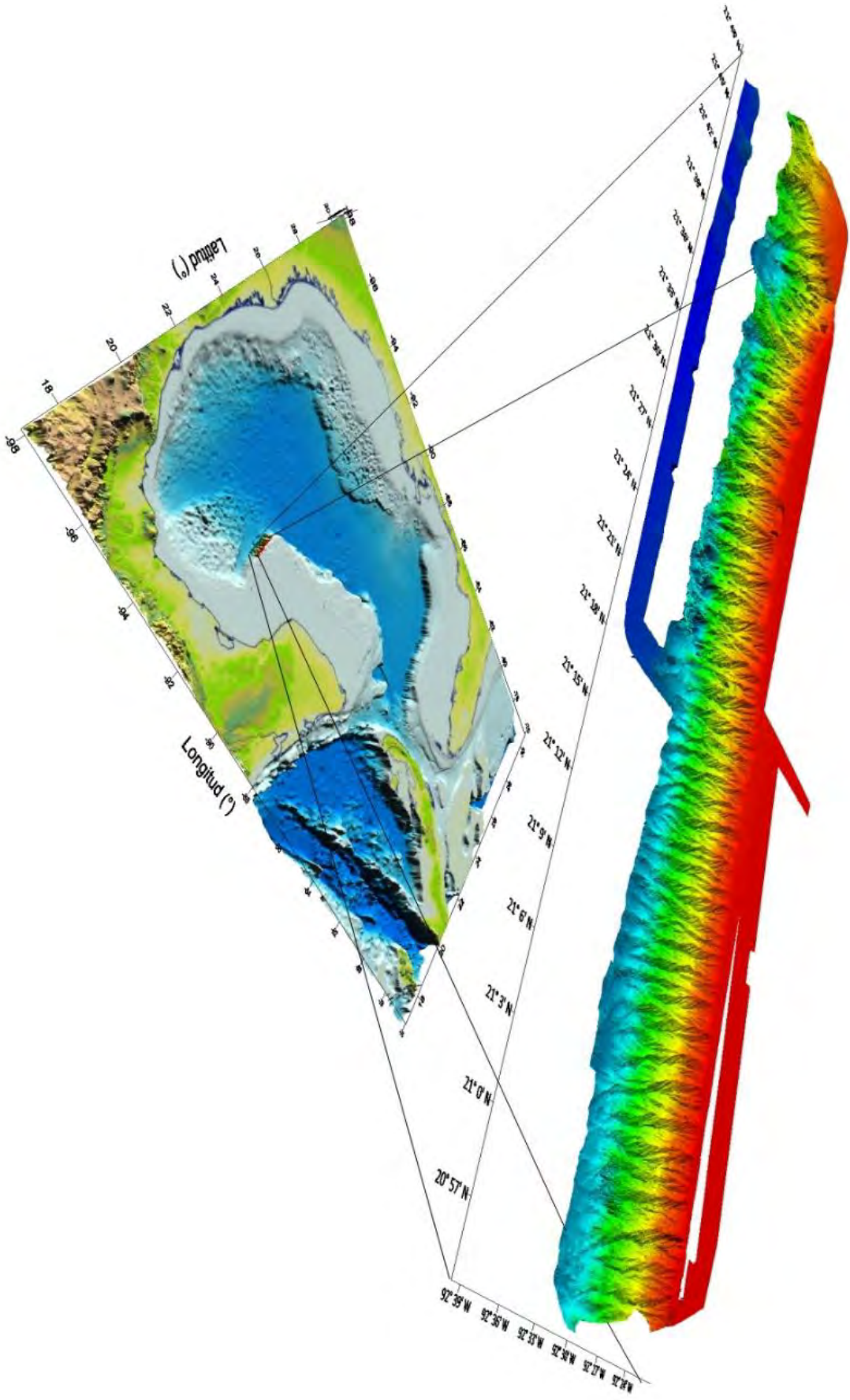


Figura 36. Localización del área de estudio en relación a la extensión del Golfo de México

6. INTERPRETACIÓN

Este estudio batimétrico reveló la morfología de 99.64 km de la cara sur del Escarpe de Campeche, éste presenta un rango de profundidades 100 m sobre plataforma continental y presenta su posición más distal a la profundidad de 2,600 m hacia el centro del cañón de Campeche, presenta un relieve del talud conformado principalmente por cañones submarinos que son producto del efecto de canalización por el drenaje que fluye desde la plataforma continental (flujos de gravedad).

La morfología más común a lo largo del escarpe de Campeche se caracteriza por cañones – corredores submarinos que cortan las porciones más escarpadas del talud y que representan la respuesta a los procesos gravitacionales modeladores de pequeñas depresiones longitudinales casi paralelas a la pendiente. La batimetría del área de la primera campaña muestra una serie de cañones cerrados que son característicos por presentar una forma semicircular como *U*. Estos presentan pendientes que oscilan de 8° a 13°. Comienzan a partir de aproximadamente 550 m de profundidad llegando hasta la base del escarpe y son simétricos o casi simétricos. En la parte Norte de esta primer área se presenta una estructura semicerrada que se adentra en dirección a la plataforma continental en donde los cañones submarinos que forman las laderas inclinadas son menos pronunciadas y por lo tanto, menos cerrados contando con pendientes más suaves de 7°.

La batimetría de la zona de la segunda campaña al igual que la zona anteriormente descrita, se caracteriza por presentar cañones cerrados en forma de *U* sobre toda la cara del escarpe, en esta zona los cañones – corredores muestran pendientes de entre 10° y 12°. Además en ambas zonas de estudio, se presentan rasgos topográficos distintivos sobre la cara del

escarpe, esta se caracteriza por laderas cóncavas, las cuales le dan una apariencia ondulada y que disminuye al aumentar la profundidad.

Es posible que su forma sea influenciada por procesos de transporte y sedimentación en la plataforma de Yucatán, ya que se conoce que el cañón de Campeche que comienza sobre la base del escarpe es genéticamente el resultado del contacto litológico entre los carbonatos de la plataforma (al este) y los diapiros de la Cuenca de Campeche (al oeste) [Mendoza *et al.*, 2000].

7. CONCLUSIONES

Los datos de batimetría obtenidos por ecosonda multihaz durante las campañas oceanográficas CHICXULUB II y CHICXULUB III, permitieron obtener modelos batimétricos, así como, proyecciones en 3D del sector sur del Escarpe de Campeche.

Estos modelos batimétricos revelan detalladamente la forma del relieve del lecho marino de la zona de estudio, lo que permite reconocer estructuras morfológicas características en la presencia de un talud continental.

Esta zona de estudio presenta un relieve que está conformado en su mayoría por cañones-corredores submarinos, que forman pequeños canales hasta llegar a la base, los cuales podrían estar influenciados por fracturas que favorecen el desarrollo de éstos, con una orientación casi este-oeste. Por otro lado, presenta también estructuras o laderas cóncavas que pueden corresponder a movimientos gravitacionales derivados de la inclinación y de la falta de soporte lateral que le dan la forma o textura corrugada a esta cara del Escarpe.

Estas características del relieve muestran que el escarpe podría ser la fuente probable de una gran cantidad de material transportado desde la plataforma continental hacia el piso del Golfo de México, lo que puede llegar a tener influencia sobre las grandes expresiones morfológicas de unidades adyacentes, principalmente el cañón de Campeche.

Cabe mencionar que es la primera vez que se lleva a cabo un levantamiento de batimetría multihaz de alta resolución sobre la parte sur del Escarpe de Campeche, en el borde occidental de la plataforma carbonatada de Yucatán.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Anónimo. EM300 Multibeam Echosounder Operator Manual; Base Version. Kongsberg Maritime AS, Maintenances manual 2004.

Anónimo. EM300 Multibeam Echosounder Product Description. Kongsberg Maritime, Norway, 2003

Anónimo. *CARIS HIPS & SIPS User Guide*, v 8.1. 2013.

Anónimo. *CARIS HIPS & SIPS User Guide*, v 7. 2011.

Anónimo. *Manual de procesamiento de Datos Multihaz CARIS HIPS & SIPS 7.1*

Blackington, J. G., 1991. *Bathymetric resolution, precision and accuracy considerations for swath bathymetry mapping SONAR systems*. IEEE Oceans '91, 550-557.

Bryant, W. R., Antoine, J. W., Ewing, M., y Jones, B., 1968., *Structure of the Mexican continental shelf and slope, Gulf of Mexico*: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, Vol. 52, pp. 1204-1228.

Bryant, W.R., Lugo, C., Cordova, C., Salvador, A., 1991. *Gulf of Mexico Basin: Physiography and Bathymetry*. En: Salvador, A. (ed). *The Geology of North America, Vol. J: The Gulf of Mexico Basin*. Geological Society of America, p. 13-30.

Buffler, R. T., 1991, *Seismic stratigraphy of the deep Gulf of Mexico basin and adjacent margins*: The Geology of North America, Vol J: Geological Society of America, The Geology of North America. pp. 353-387.

Cifuentes Lemus, J.L., Torres-Garcia, P., Frias, M. 1986. *El océano y sus recursos. Las ciencias del mar, oceanografía física*.

Clay, C.S. and H. Medwin, 1997. *Fundamentals of Acoustical Oceanography*. Academic Press, USA, 1998, 712 p.

Mendoza, M., Ortiz Pérez, M.A., 2000. "Caracterización geomorfológica del talud y la plataforma continentales de Campeche-Yucatán, México." *Investigaciones Geográficas, Boletín 43*, pp. 7-31

Michaud, F., Ratzov, G., Sallarés, V., Collot, J.Y., Pazmiño, N., De la Torre, G. 2009. "Métodos de Instrumentación acústica para la exploración en Geofísica Marina"

López Ramos, E. 1973. *Geological summary of the Yucatan Peninsula*. Boletín Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros. Vol. 25, No. 1-3, P. 257-281.

Padilla y Sánchez R.J. 2001. *Evolución Geológica del sureste Mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México* Boletín Sociedad Geológica Mexicana. Tomo 59, Núm. 1, 2007, P.19-42.

Parnum, I.M., Garvilov, A.N. 2011. *High-frequency multibeam echo-sounder measurements of seafloor backscatter in shallow water: Part 1 – Data acquisition and processing*. International Journal of the Society for underwater Technology, Vol 30 (2011) 3-12.

Parnum, I.M., Garvilov, A.N. 2011. *High-frequency multibeam echo-sounder measurements of seafloor backscatter in shallow water: Part 1 – Mosaic production, analysis and classification*. International Journal of the Society for underwater Technology, Vol 30 (2011) 13-26.

Paull, C., Caress, D. W., Gwiazda, R., Urrutia-Fucugauchi, F., Rebolledo-Vieyra, M., Lundsten, E., Anderson, K., Sumner, E.J. 2014. *Cretaceous-Paleogene boundary exposed: Campeche Escarpment, Gulf of Mexico*. Marine Geology 357 (2014) 392–400

Pindell, J. 1994. *Evolution of the Gulf of Mexico and the Caribbean*. Caribbean Geology: An introduction p 13-39

Pindell, J. and Kennan, L., 2001. *Kinematic Evolution of the Gulf of Mexico and Caribbean*. GCSSEPM, Tulsa, in press.

Pindell, J. L., y Kennan, L., 2009, *Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame*: Geological Society, London, Special Publications 2009; Vol. 328; pp. 1-55.

Quino-Cerdan, M., Rabinovich V.S., 2009. *Análisis de propagación de onda acústica en océanos estratificados mediante el método de modos normales*. Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 3, No. 2, 2009

Salvador, A., 1991. *Gulf of Mexico Basin: Origin and Development of the Gulf of Mexico Basin*. En: Salvador, A. (ed). *The Geology of North America, Vol. J: The Gulf of Mexico Basin*, Geological Society of America, p. 389-444.

Morris F. *Introducing an operational Multi-Beam array sonar* 35-40

Sawyer, D. S., Buffler, R. T., y Pilger, R. H., 1991, *The crust under the Gulf of Mexico basin: The Geology of North America*,. Vol. J: Geological Society of America, The Geology of North America. p. 53-72.

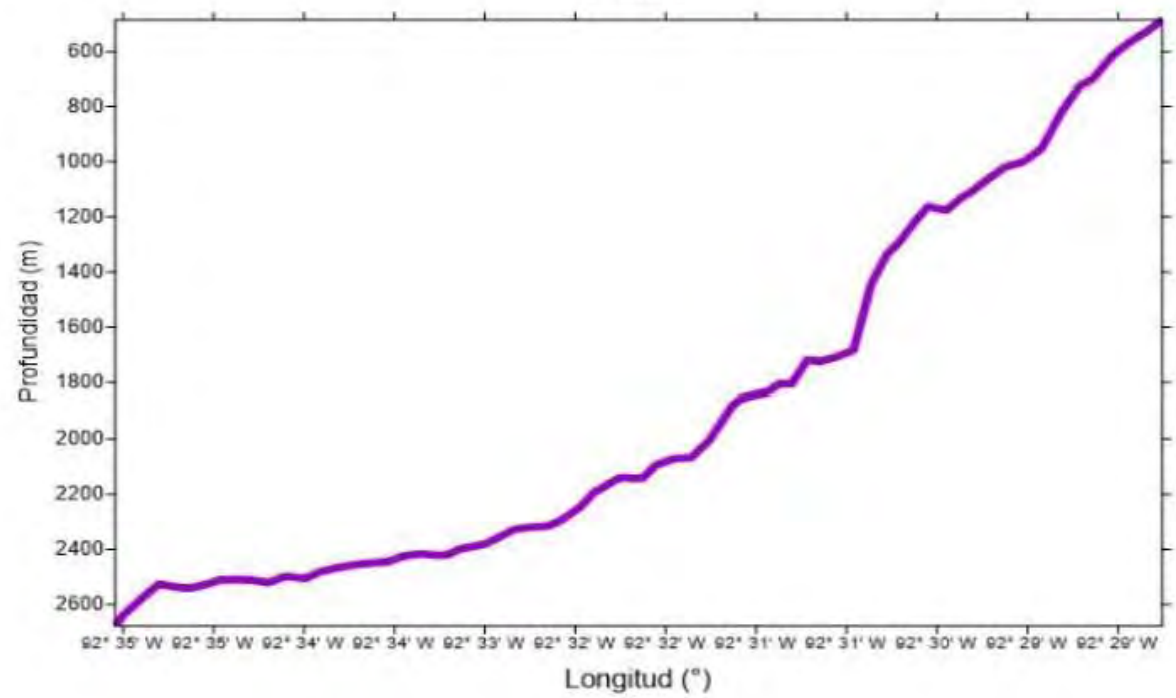
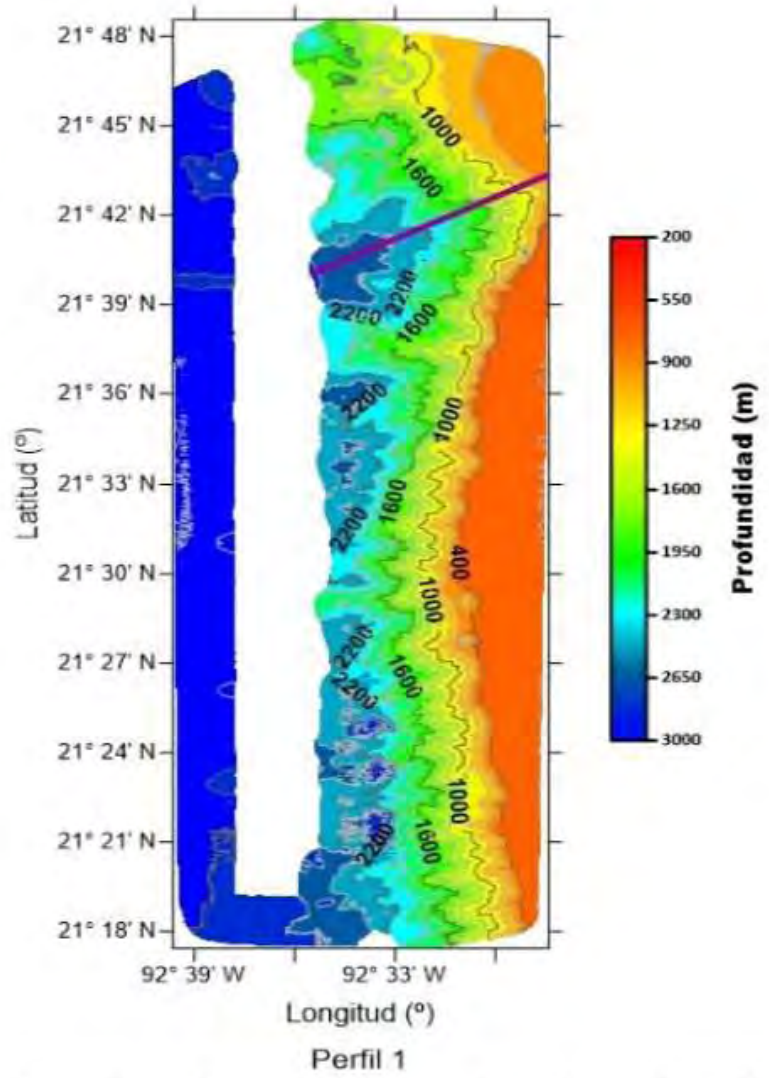
Stewart, R. H., 2006. *Introduction to Physical Oceanography*. Texas A & M University, 2006.

Organización Hidrográfica Internacional (OHI), 2005. *Manual de Hidrografía*. Bureau Hidrográfico Internacional, Mónaco, 1ª Edición (2005), 546 p.

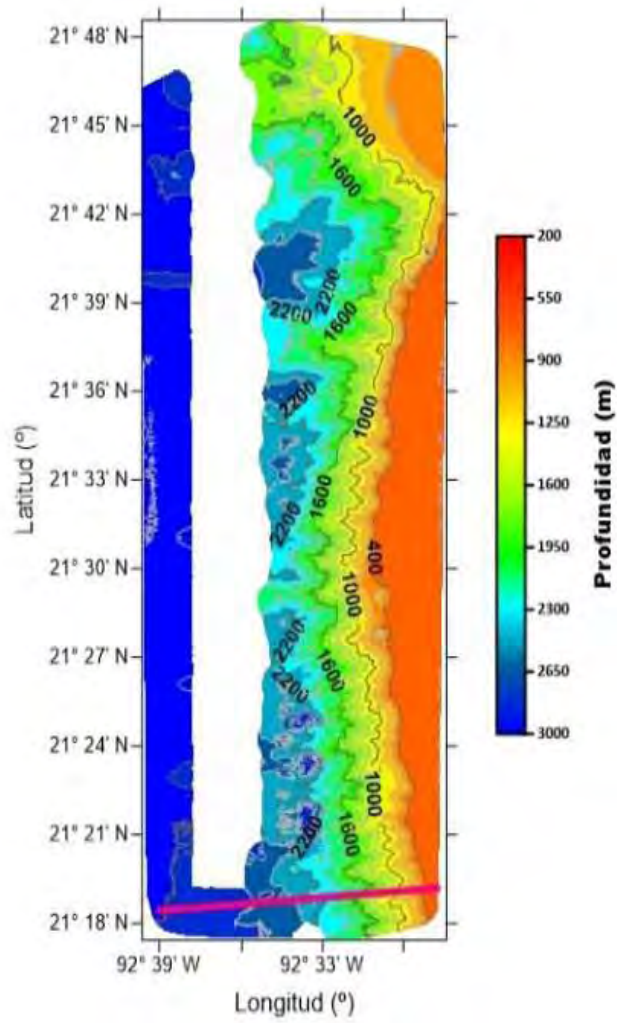
ANEXOS

Se realizaron 4 proyecciones en 2D de perfiles perpendiculares a la cara del Escarpe para observar el comportamiento de este con el incremento de la profundidad y poder identificar la existencia de algún cambio abrupto en la inclinación de las pendientes, los cuales podrían representar alguna estructura importante causada por el transporte de sedimentos o por algún otro fenómeno físico.

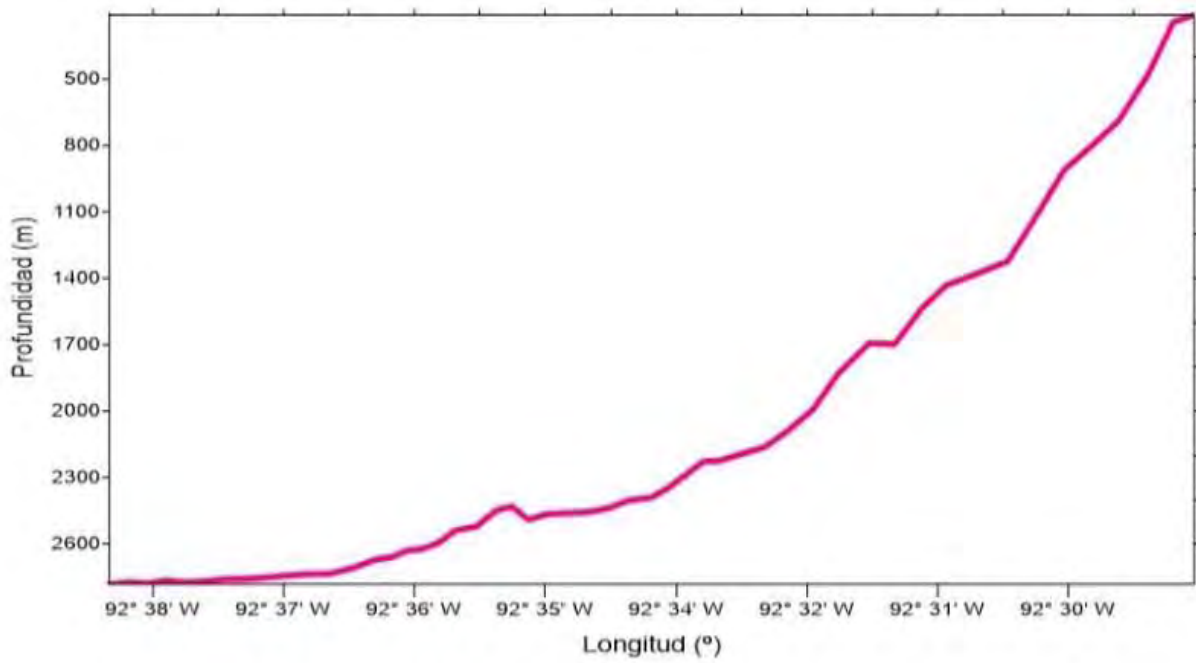
Estos perfiles nos permiten identificar la pendiente característica del talud, una pendiente que aumenta con la profundidad hasta llegar a la base del escarpe y que tiende a ser suave, sin presentar cambios abruptos



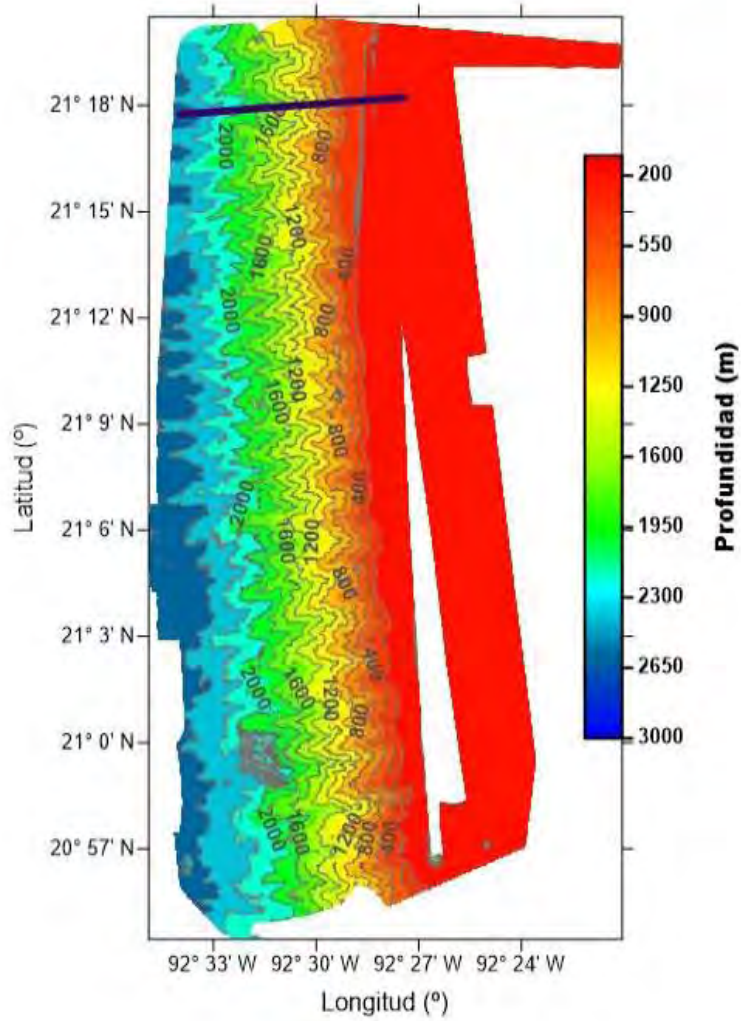
“Perfil perpendicular 1, Campaña CHICXULUB II”



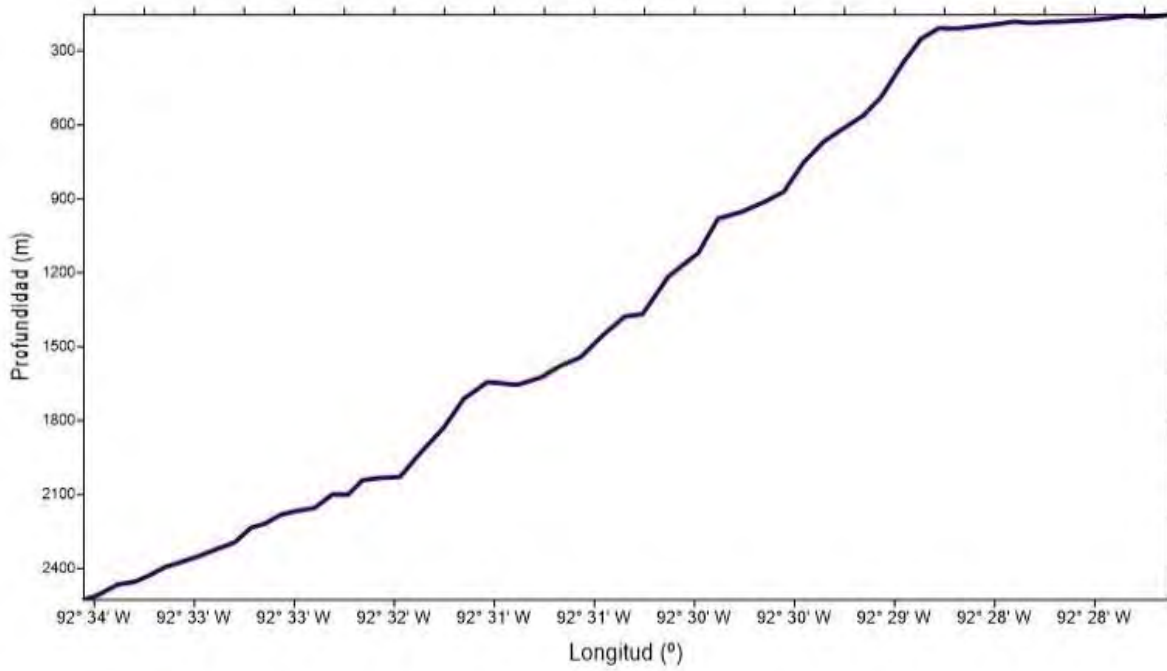
Perfil 2



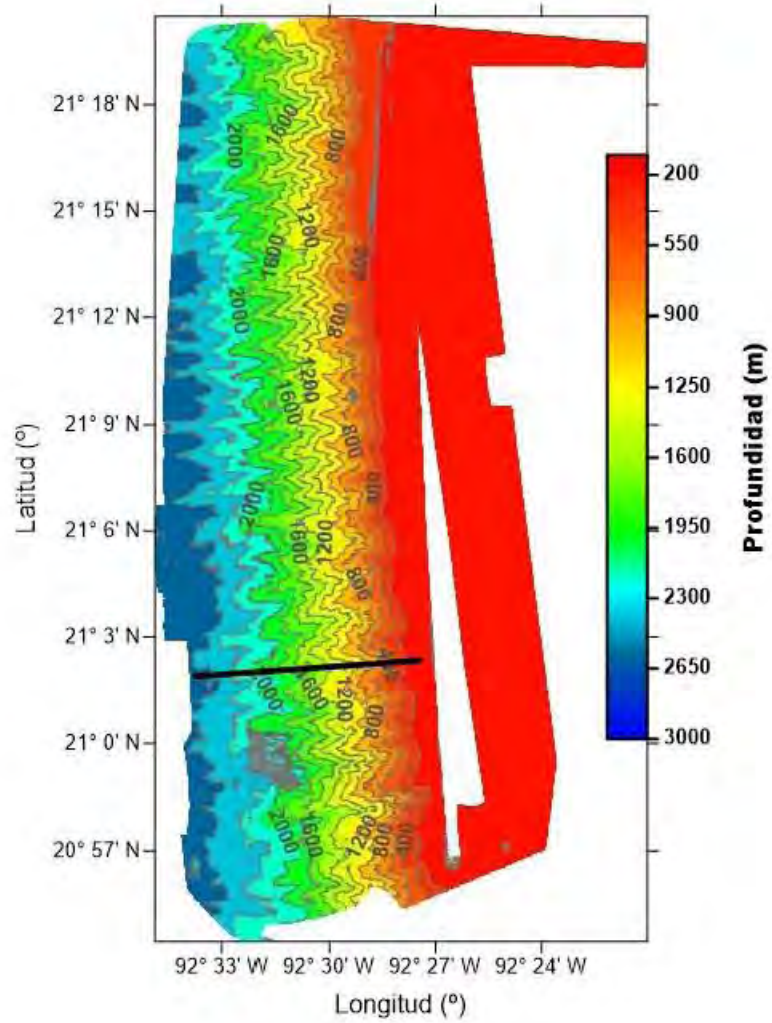
“Perfil perpendicular 2, Campaña CHICXULUB II”



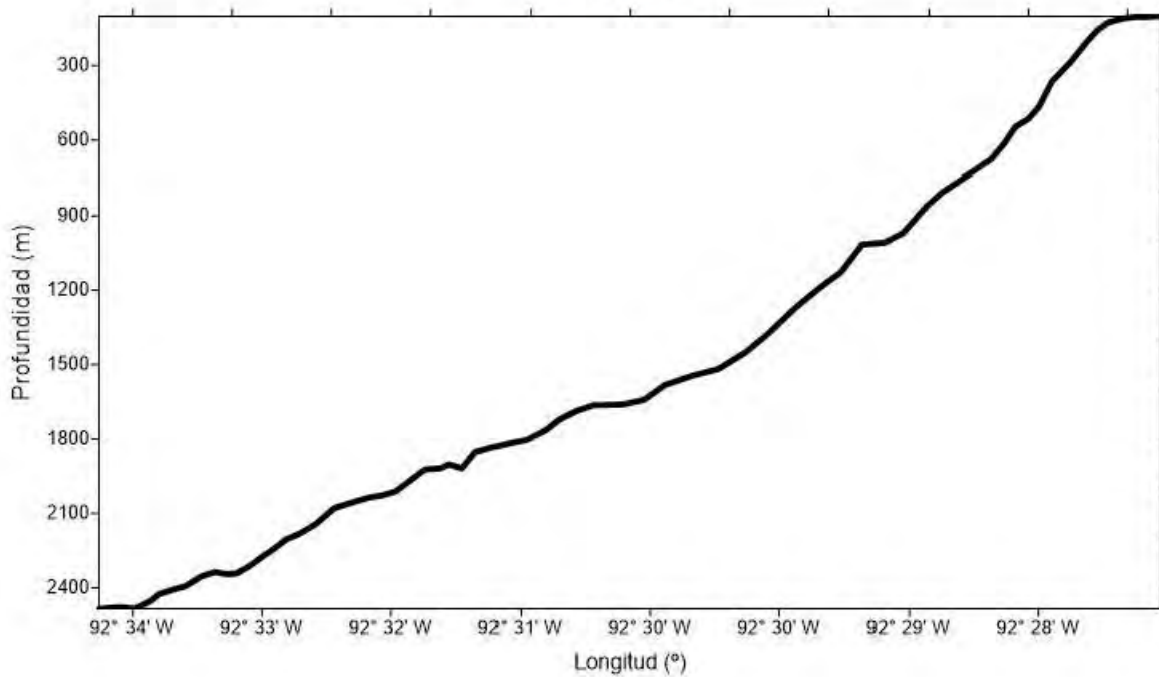
Perfil 3



“Perfil perpendicular 3, Campaña CHICXULUB III”



Perfil 4



“Perfil perpendicular 4, Campaña CHICXULUB III”