



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Litología de superficie del lecho marino con base en imágenes de retrodispersión acústica en la región norte de los Domos Salinos de Campeche, Golfo de México

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Geofísica

P R E S E N T A

Jessica Jazmín Reyes Díaz

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Francisco Ponce Núñez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020

*A quienes permanecieron en todo momento
con palabras de aliento.*

Agradecimientos

A mi alma máter, la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería. Por establecer principios y bases durante mi formación profesional. Por ser proveedoras de tan gran conocimiento, crecimiento, fortaleza y experiencia en más de un ámbito. Por ser mi segundo hogar.

A mi asesor, el Ing. Francisco Ponce Núñez, por brindarme todo el apoyo posible, orientación y mucha confianza; por su tiempo y espacio otorgados para realizar este trabajo. Todo esto contribuyendo de manera significativa a mi formación profesional y personal.

A los miembros del jurado, el Dr. Carlos Ángel Quintil Mortera Gutiérrez, la Dra. Iza Canales García, a la Dra. Mayumy Amparo Cabrera Ramírez y el Dr. Ricardo José Padilla y Sánchez por enriquecer esta tesis mediante su apoyo, tiempo, consejos y correcciones.

Al personal científico participante en la campaña M67-2a y tripulación del FS Meteor por suministrar los datos utilizados en este trabajo.

Al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología por permitirme trabajar con la licencia del software Caris HIPS and SIPS y brindarme un espacio acogedor, así como al Ing. Arturo Ronquillo Arvizu por darme la oportunidad de prestar el servicio social en el mismo bajo su tutela.

A mi madre Rocío Díaz Cerón, a mi padre Diego Antonio Reyes López, a mi hermana Leticia Reyes Díaz y a mi hermano Diego Antonio Reyes Díaz por nunca dejarme sola y apoyarme incondicionalmente para concluir este trabajo.

Índice General

Agradecimientos	2
Índice de Figuras	4
Resumen	8
Abstract	9
1. Introducción	10
2. Antecedentes	12
2.1. Área de estudio	12
2.2. Morfología del área de estudio	12
2.3. Fisiografía marina	14
2.3.1. Plataforma de Yucatán.....	15
2.3.2. Domos salinos de Campeche	17
2.3.3. Escarpe de Campeche	17
2.4. Fisiografía terrestre	17
2.5. Marco geológico	18
2.6. Tectónica salina	19
2.7. Estudios geofísicos en los Domos de Campeche	20
2.8. Ecosondeo del fondo marino	30
2.8.1. Ecosonda Monohaz	30
2.8.2. Ecosonda Multihaz	30
2.8.3. Movimientos del buque	34
2.9. Propagación acústica en el mar	35
2.9.1. Onda acústica	35
2.9.2. Propagación del sonido en una columna de agua	36
2.9.3. Distribución de velocidad.....	40
2.9.4. Refracción del sonido	41
2.9.5. Retrodispersión acústica.....	42
2.9.6. Campaña M67-2 a	48
3. Metodología	51
3.1. Datos de ecosonda multihaz del crucero M67-2a	51
3.2. Procesamiento de Datos Multihaz: Batimetría	52
3.2.1. Diagrama de Procesamiento de Datos en Caris	52
3.2.2. Efectos por Marea	53
3.2.3. Corrección de velocidad del sonido (SVC)	55
3.2.4. Perfil de Velocidad del Sonido para Datos Multihaz.....	56
3.2.5. Fórmula de Wilson calcular el SVP	57
3.2.6. Creación de superficies base	59
3.2.7. Limpieza de datos	63
3.3. Procesamiento de Datos Multihaz: Datos de Retrodispersión Acústica	64
3.3.1. Creación de GeoBaRs	66
3.3.2. Corrección del patrón de haz	69

3.2.3. Creación de mosaicos	70
3.4. Exportar batimetría y mosaicos	72
4. Resultados.....	75
4.1. Carta Batimétrica	75
4.1.2. Compilación cartas batimétricas de las campañas M67-2a y SO174-2a.....	75
4.2. Mosaico de imágenes de retrodispersión acústica	81
4.2.1. Compilación de mosaicos de imágenes de Backscatter de las campañas M67-2a y SO174-2.....	83
5. Interpretación	89
5.1. Carta Batimétrica	89
5.1.1. Área norte.....	89
5.1.2. Área sur.....	97
5.2. Mosaicos de Retrodispersión Acústica	104
5.2.1. Área norte.....	104
5.2.2 Área sur	109
6. Conclusiones	115
Anexos	118
Referencias Bibliográficas.....	149

Índice de Figuras

Figura 2.1. Mapa del área de estudio, campaña M67-2a.	12
Figura 2.2. Límites estructurales del golfo de México [Salvador, 1991].	13
Figura 2.3. Mapa de los límites del Golfo de México de acuerdo con la IHO realizado en Google Earth.	14
Figura 2.4. Provincias Fisiográficas del Golfo de México [Bryant et al., 1991].	16
Figura 2.5. Estructuras salinas [Modificada de Jackson and Hudec, 2017].	20
Figura 2.6. Mapa de batimetría monohaz derivado de datos de la NGDC. Región norte de los domos salinos de Campeche, Golfo de México.	21
Figura 2.7. Mapa gravimétrico derivado de datos de la NGDC. Región norte de los domos salinos de Campeche, Golfo de México.	22
Figura 2.8. Mapa magnético de datos obtenidos de la NGDC. Región norte de los domos salinos de Campeche, Golfo de México.	23
Figura 2.9. Localización de los perfiles sísmicos de la campaña V2402, en el área de los Domos de Campeche. Áreas cubiertas por las campañas SO174-2 (polígono rosa) y M67-2a (polígono verde).	24
Figura 2.10. Perfiles de sísmica monocanal de las líneas BC, DE', EF, MN y NO, campaña V2402 (1967).	25
Figura 2.11. Levantamiento de la campaña SO174-2 (Leg2) [Bohrmann y Schenck, 2004].	26
Figura 2.12. Carta batimétrica de alta resolución, campaña SO174-2 [modificado de Ponce, 2009].	28
Figura 2.13. Mosaico de imágenes acústicas, campaña SO174-2 [modificado de Ponce, 2009].	29
Figura 2.14. Ecosondeo monohaz (a), ecosondeo multihaz (b) [modificada de Saracin and Colin, 2014].	31

Figura 2.15. Esquema de un sistema multihaz, en el caso de la ecosonda EM120 el ángulo de cobertura es de 150 grados y 191 haces por ping [modificada de Saracin and Colin, 2014].	32
Figura 2.16. Relación entre el ancho del haz y tamaño la huella acústica [modificada de Saracin and Colin, 2014].	33
Figura 2.17. Movimientos del buque.	35
Figura 2.18. Onda acústica.	36
Figura 2.19. Salinidad promedio en la superficie del mar con intervalos de 0.25, las zonas sombreadas sobrepasan una salinidad de 36 [Stewart, 2008].	37
Figura 2.20. Curva de salinidad con datos de CTD de la campaña M67-2a.	37
Figura 2.21. Rango anual de temperatura de la superficie del mar. Cada intervalo de contorno representa 1°C, los contornos gruesos representan 4°C y 8°C. Las áreas sombreadas representan temperaturas mayores a 8°C [Stewart, 2008].	38
Figura 2.22. Curvas de temperatura y densidad respecto a la profundidad. Izquierda: Perfiles de temperatura (t) y potencial (θ). Derecha: Perfiles de anomalía de densidad (σ_t) y densidad potencial (σ_θ) [Stewart, 2008].	39
Figura 2.23. Curva de presión respecto a la profundidad con datos de CTD de la campaña M67-2a.	40
Figura 2.24. Distribución de la velocidad del sonido en función de de la temperatura, salinidad y profundidad. Izquierda: Temperatura (T) y salinidad (S) en función de la profundidad. Centro: Variación de la velocidad del sonido en función de los cambios de temperatura, salinidad y profundidad. Derecha: Perfil de velocidad del sonido en la columna de agua. [modificada de Stewart, 2008].	41
Figura 2.25. Ley de Snell para refracción [modificada de OHI, 2005].	42
Figura 2.26. Señal recibida por un haz [Modificada de Augustin, 1995].	43
Figura 2.27. Fuerza de retrodispersión para incidencia vertical y lateral [Modificada de Augustin, 1995].	45
Figura 2.28. Levantamiento Campaña M67-2a [Weinrebe, W., Bohrmann, G., Spiess, V., 2010].	50
Figura 3.1. Líneas de navegación utilizadas para el procesamiento de datos batimétricos y retrodispersión acústica de la campaña M67-2a (2006), en blanco se señalan los dos conjuntos de líneas particulares.	51
Figura 3.2. Flujo de trabajo en HIPS and SIPS para datos multihaz [Modificada de Caris Hips and Sips, 2009].	53
Figura 3.3. Marea registrada en la Estación Veracruz del Servicio Mareográfico Nacional durante los días 20 al 31 de marzo del 2006 [http://www.mareografico.unam.mx/portal/index.php?page=Estaciones].	54
Figura 3.4. Precisión de medición de la ecosonda EM120 respecto a profundidad y distancia across-track en modo profundo [Modificada de Kongsberg, 2005].	55
Figura 3.5. Corrección de velocidad del sonido [Modificada de Caris HIPS and SIPS, 2009].	56
Figura 3.6. Mapa con la ubicación donde fueron tomados los datos con CTD.	57
Figura 3.7. Perfiles de velocidad tomados durante la campaña M67-2a.	58
Figura 3.8. Perfil utilizado para el proceso de corrección de velocidad del sonido.	59
Figura 3.9. Ponderación en función del ángulo de incidencia con el lecho marino [Modificada de Caris Hips and Sips, 2009].	60
Figura 3.10. Ponderación en función de las unidades de la malla [Modificada de Caris Hips and Sips, 2009].	61
Figura 3.11. Gráfico del análisis de la huella acústica en relación al ángulo y a la profundidad.	61
Figura 3.12. Superficie BASE creada con una resolución de 200 m.	62
Figura 3.13. Ventanas de la herramienta Subset Editor en software Caris. En la parte superior se observa sobre la superficie BASE la sección enmarcada en blanco para la limpiarse, en la parte inferior	

izquierda se observa la vista 2D del área sombreada en amarillo, y en la parte inferior derecha se ubica la vista 3D de la sección completa.	63
Figura 3.14. Ejemplo de la vista 3D del editor Subset en el cual se señalan con elipses los datos que se descartaron durante la limpieza.	64
Figura 3.15. Flujo de trabajo para crear mosaicos en Caris 7.0.	65
Figura 3.16. Ventana del editor de mosaicos de Caris.	67
Figura 3.17. Ventana con la que se crean los GeoBaRs.	69
Figura 3.18. La línea azul representa la línea de navegación tomada para crear el archivo de patrón del haz.	69
Figura 3.19. Patrón de haz corregido.	70
Figura 3.20. Ventana en la que se ingresan los parámetros con los que se desea crear un mosaico.	71
Figura 3.21. Mosaicos en Caris Hips and SIPS.	71
Figura 3.22. Batimetría final exportada desde Caris.	72
Figura 3.23. a) y b) Mosaicos exportados como imagen desde Caris.	74
Figura 4.1. Carta batimétrica de alta resolución (200 m), campaña M67-2a (2006).	76
Figura 4.2. Carta batimétrica de alta resolución (200 m) de las campañas M67-2a (2006) y S0174-2 (2003).	77
Figura 4.3. Detalle de la zona norte del área de estudio. El polígono blanco y polígono amarillo representan los límites de los modelos batimétricos de las campañas M67-2a y S0174-2 respectivamente, en rosa se indican los domos mapeados por ambos estudios.	78
Figura 4.4. Acercamiento a zona donde se aprecia diferencia entre curvas de nivel.	79
Figura 4.5. Domo el Chapopote mapeado por las campañas, a) M67-2a (2006) y b) S0174-2 (2003).	80
Figura 4.6. Domo chapopote en vista 3D. (a) y (c) muestran el domo mapeado por la campaña M67-2a (2006), y (b) y (d) muestran el domo mapeado por la campaña S0174-2 (2003).	81
Figura 4.7. Mosaico de imágenes de retrodispersión acústica de la campaña M67-2a (2006) en los Domos de Campeche.	82
Figura 4.8. Mosaicos de retrodispersión acústica de las campañas S0174-2 (2003) y M67-2a (2006).	84
Figura 4.9. Ejemplo del sector N-E donde se indican las discontinuidades evidenciando cada archivo de entrada.	85
Figura 4.10. Detalle en zona donde se aprecia altas intensidades de retrodispersión acústica a lo largo de la línea del nadir.	86
Figura 4.11. Detalle de mosaico de la campaña S0174-2 en donde se observa bandeamiento.	86
Figura 4.12. Zonas en el área de estudio de la campaña M67-2a en donde se ejemplifica la ausencia de datos en el mosaico de retrodispersión acústica en comparación con la carta batimétrica.	87
Figura 4.13. Áreas del mosaico de retrodispersión acústica donde se observan zonas difuminadas por los giros en la navegación, campaña M67-2a.	88
Figura 5.1. Carta batimétrica de las campañas S0174-2 (2003) y M67-2a (2006). Con líneas blancas se señalan los escalones batimétricos conduciendo las mayores profundidades hacia el norte.	90
Figura 5.2. Carta batimétrica de la zona norte con ambas campañas señalando orientación de domos. Flechas anaranjadas domos de la campaña S0174-2 (2003), flechas negras domos de la campaña M67-2a (2006). Pendiente general hacia el NW (flecha rosa).	91
Figura 5.3. Estructuras observadas en el área norte identificadas como canales. (a) Canales sobre la carta batimétrica M67-2a, se observa solo un segmento del canal izquierdo. (b) Canales sobre ambas cartas batimétricas indicado el trayecto con color verde, el canal izquierdo se prolonga desde el sur hacia la planicie Sigsbee.	92
Figura 5.4. Rizaduras vistas en mapa de sombras indicadas con flechas rojas. Campañas M67-2a (2006) y S0174 (2003).	93

Figura 5.5. Mapa de sombras de las campañas M67-2a (2006) y SO174-2(2003) donde se observan estructuras de rizaduras; batimetría del área norte del Escarpe de Campeche tomados en la campaña Chicxulub II (2015) [Cossío, 2020].	95
Figura 5.6. Extensiones en los domos 10, 15 y 17 señalados en círculos amarillos.	96
Figura 5.7. Área sur de la carta batimétrica de la campaña M67-2a en donde se señala con flechas verdes la orientación de los domos, con flechas rojas la orientación de las cordilleras y con flechas amarillas punteadas la dirección de los flancos de algunos domos.	98
Figura 5.8. Valles cerrados en la zona sur. Elipses blancas: indican valles cerrados. Polígono rosa: posible continuación de cordilleras de domos donde hay ausencia de datos.	100
Figura 5.9. Derrumbes en los flancos de los domos al norte de la zona sur. En círculos amarillos se indica los derrumbes en los flancos de los domos 21, 22 y 24.	101
Figura 5.10. Detalles del domo 39. En rojo se señalan las extensiones el este y al oeste [i) Meseta que se extiende hacia el norte y oeste; ii) Domo alargado que se despliega hacia el SW. En azul se indican los valles al norte y sur.	103
Figura 5.11. Mosaico de retrodispersión acústica de la zona norte. Campañas SO174-2 (2003) y M67-2a (2003).	105
Figura 5.12. Morfología de los domos 1, 2, 8, 9, 10, 11 y 15 expuesta por valores altos de backscatter.	106
Figura 5.13. Zonas de alta intensidad acústica ubicadas en las cimas (polígonos color verde), y en los flancos y cañones de los domos (polígonos color rosa). En color azul se indican los canales sobre los mosaicos de ambas campañas, se observa que se interrumpen en algunas partes de su trayectoria. Campaña SO174-2 (2003) y M67-2(2006).	107
Figura 5.14. Mosaico de imágenes retrodispersión acústica del domo Chapopote. (a) y (c) pertenecen a la campaña M67-2a (2006) y (b) y (d) a la campaña SO174-2 (2003). En (c) y (d) se ilustra el domo en imagen 3D con vista hacia el suroeste.	108
Figura 5.15. Imagen de retrodispersión acústica de la región sur de la campaña M67-2a.	110
Figura 5.16. Zonas de alta intensidad de backscatter en la región sur del mosaico de la campaña M67-2a. En color rosa se señalan las zonas de alto bs que se encuentran en los flancos y cañones de los domos, en color verde se indican las zonas de alto bs que se encuentran en las cimas de los domos.	111
Figura 5.17. Mosaico del domo 21 visto en 3D (a) flanco izquierdo (b) flanco derecho. Vista en planta, el punto verde señala un área de estudio conocida como "oil ridge". Campaña M67-2a (2006).	112

Resumen

En este trabajo se presentan un modelo digital del terreno de alta resolución y un mosaico de imágenes de retrodispersión acústica en el área norte de la provincia salina de los Domos de Campeche (entre las latitudes 19°43' N - 22°25' N y las longitudes 92°37' W - 94°12' W) en el Golfo de México, con el objetivo de identificar rasgos morfológicos y caracterización del lecho marino, así como contribuir a la cartografía de alta resolución de mares mexicanos. Los datos batimétricos y de backscatter se registraron usando una ecosonda multihaz Kongsberg EM120 durante la campaña oceanográfica M67-2a a bordo del buque FS Meteor en marzo del 2006. Estos datos fueron post-procesados usando CARIS HIPS&SIPS V. 7.0 para corregir errores sistemáticos de la adquisición y compensación de datos de intensidad acústica. El modelo digital batimétrico cubre una superficie aproximada de 13,242 km², abarca profundidades de 787 m a 3742 m y tiene una resolución de 200 m. La morfología del área es caracterizada por estructuras dómicas y valles entre éstas. La densidad de domos aumenta de norte a sur; en el norte las estructuras son aisladas mientras que en el sur forman cordilleras entre ellas; las alturas de los domos se encuentran entre los 200 m y los 800 m por encima de los valles. También se observaron canales y estructuras de *rizaduras*. El mosaico de retrodispersión acústica tiene la misma extensión que la carta batimétrica y tiene un tamaño de celda de 50 m. Los valores de intensidad de *backscatter* se encuentran entre -10 dB a -30 db. Cualitativamente se observaron zonas de alto *backscatter* en cimas y flancos de los domos que podrían representar derrames asfálticos, hidratos de gas o compactación del sedimento. Adicionalmente se realizó una compilación de los modelos de elevación y backscatter de las campañas M67-2a (2006) y S0174-2 (2003) para obtener un análisis más completo en la zona de estudio. Estos modelos de elevación conjuntos cubren un área de aproximadamente 20,000 km².

Abstract

This work presents a digital bathymetric model and backscatter intensity (BS) images in the northern area of the Campeche Knolls saline province (latitude 19°43' N to 22°25' N and longitude 92°37' W to 94°12' W) in the Gulf of Mexico, aiming to identify morphological features, acoustic characterization of the sea bottom, and to contribute to high resolution cartography of Mexican waters. Bathymetry and backscatter data were recorded using FS Meteor's EM120 multibeam echosounder during M67-2a cruise, March 2006. Data was processed using CARIS HIPS&SIPS V. 7.0 to correct systematic errors from acquisition and compensation of BS values. Bathymetric model covers approximately 13,242 km², depths ranging from 787 m to 3742 m, and 200-m spatial resolution. Morphology of the area is dominated by dome structures and valleys between them. Density of the domes increases southward; to the north of the area structures are isolated, while to the south, they form dome ranges. Height of the domes ranges from 200 m to 800m above the valleys. Bathymetric model also reveals channels and ripple-like structures. BS mosaics have the same coverage as the bathymetric model, a 50 m grid size, and BS ranges from 10 dB to -30 dB. High BS areas were observed on the top and sides of some domes, which could indicate asphalt seeps, gas hydrate or sediment compaction. Bathymetric models and BS mosaics from cruise M67-2a (2006) were joined with the data from cruise SO174-2 (2003) to complement the analysis of the area. These compound models and BS mosaics cover approximately 20,000 km².

1. Introducción

La realización de estudios batimétricos ha avanzado de manera relevante al rededor del mundo desarrollándose a través del tiempo con distintos objetivos. Estos datos del fondo marino contribuyen a diversos temas de investigación como ruinas arqueológicas, naufragios, infraestructura submarina, fuentes de hidrocarburos, identificación de depósitos sedimentarios entre otras.

La energía acústica emitida, al interactuar con el fondo marino se redistribuye en diferentes direcciones a causa de la dispersión, y cuando dicha energía regresa a los receptores por el mismo trayecto con el que se emitió se le denomina retrodispersión acústica. Las ecosondas multihaz en la actualidad son capaces de medir la intensidad de retrodispersión conocida como “*backscatter strenght*” con la que se puede obtener información litológica del fondo marino como atenuación e impedancia acústica, tamaño de grano y rugosidad de la superficie de sedimentos; esto a su vez nos lleva a un análisis del cambio en la intensidad de *backscatter* como consecuencia del cambio de litología [Augustin *et al.*, 1995].

La integración de la batimetría y la información de retrodispersión pueden proporcionar información muy útil del fondo del mar. La interpretación de expertos de este tipo de datos ha dado lugar a una revolución en nuestra comprensión de las características y los procesos del fondo marino [Collins *et al.*, 2002]. Existen estudios sobre la batimetría y la retrodispersión acústica del lecho marino alrededor del mundo que han permitido conocer las características acústicas del material que lo componen [Cristián, 2006].

La cuenca sedimentaria del Golfo de México se caracteriza desde hace décadas por ser un área de interés en términos de potencialidad prospectivo para extracción de hidrocarburos. Es por ello que se han realizado numerosos cruceros con el objetivo de conocer la morfología del lecho marino, biología marina, fuentes de hidrocarburos, etc. [i.e. NOAA; Weinrebe *et al.*, 2010; Bohrmann and Schenck, 2004].

En 2003, se llevó a cabo una campaña denominada S0174-2 a bordo del buque alemán RF Sonne, en la cual se descubrieron emanaciones de hidrocarburo pesado (chapoteras) en la región de los Domos de Campeche. Como resultado de esta investigación se mapeó a

gran detalle el volcán de asfalto que es conocido como “Chapopote” [Bohrmann and Schenck, 2004]. Estos hallazgos fueron base para el lanzamiento de otra campaña de investigación llevada a cabo en 2006, a bordo del buque FS Meteor.

Los datos utilizados en esta investigación fueron registrados en la campaña M67-2 a bordo del buque alemán FS Meteor durante el mes de marzo de 2006. En este crucero se realizaron métodos geofísicos como: mapeo de haces múltiples, sísmica y ecosonda de sedimentos a través del sector sur del Golfo de México con el objetivo de obtener más información de la distribución del vulcanismo de asfalto (*asphalt vulcanism*), así como la cartografía batimétrica de los domos de Campeche [Weinrebe *et al.*, 2010]. El registro batimétrico se adquirió con una Ecosonda Multihaz EM 120 Kongsberg que tiene una frecuencia nominal de 12kHz, un sector de cobertura angular de hasta 150° y 191 haces por ping a una angostura de 1° entre haces.

En un estudio previo en el área norte de los Domos de Campeche [Ponce, 2009] se analizaron datos de batimetría multihaz y *backscatter* de un crucero previo (S0174-2) a bordo del RF Sonne. Con esto en mente, se compilaron los datos de la campaña S0174-2 (2003) y los de la campaña M67-2a (2006) para que este trabajo amplíe la contribución al conocimiento del fondo marino de esta zona.

El objetivo de la presente tesis es obtener un mosaico de imágenes acústicas y un modelo batimétrico de alta resolución que permitan identificar rasgos morfológicos y caracterización del lecho marino, identificar diferentes tipos de litologías usando datos de intensidad de *backscatter* y contribuir a la cartografía de mares mexicanos.

La composición de este escrito es de cinco capítulos: (I) Introducción; (II) Antecedentes: se describe la geología y estudios previos en el área de estudio, conceptos referentes a acústica marina y retrodispersión acústica; (III) Metodología: se expone el procedimiento que se llevó a cabo para el post-procesado de los datos batimétricos y de *backscatter*, las consideraciones y análisis requerido para elegir los parámetros utilizados en el software; (IV) Resultados: contiene las cartas batimétricas de alta resolución y mosaicos de imágenes de retrodispersión acústica con su descripción; (V) Interpretación: se fusionan los productos obtenidos a través del post-procesado con el análisis y reconocimiento de anomalías, deformaciones, y áreas sobresalientes en la batimetría y el *backscatter*; y (VI) Conclusiones.

2. Antecedentes

2.1. Área de estudio

El área de estudio se encuentra dentro de la cuenca del Golfo de México y es conocida como Domo de Campeche que se ubica al sur de la Planicie Abisal Sigsbee, al este del Cañón de Veracruz y al oeste del Cañón de Campeche. Abarca un área aproximada de 14,000 km² entre las latitudes 19°43' - 22°25' y las longitudes -92°37' - 94°12' (figura 2.1).

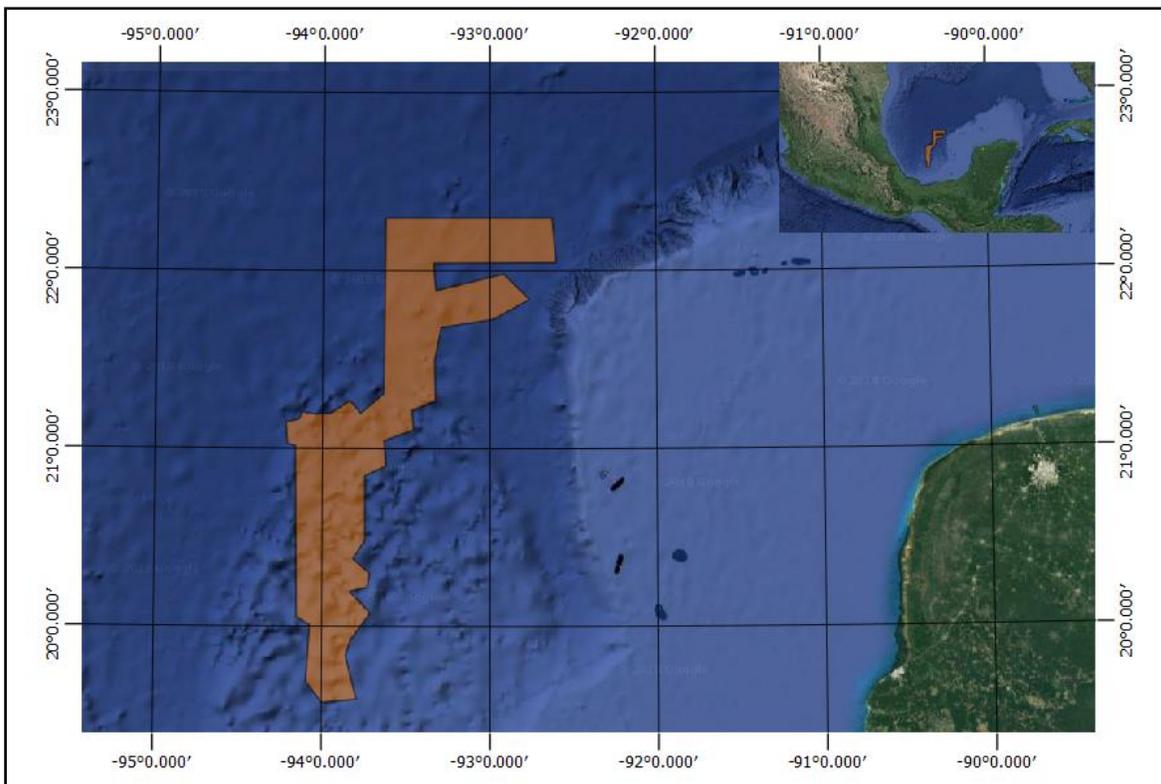


Figura 2.1. Mapa del área de estudio, campaña M67-2a.

2.2. Morfología del área de estudio

El Golfo de México está rodeado al norte y al oeste por la planicie de costa baja que varía entre menos de 50km en el centro-este de México hasta más de 550 km en la parte centro de Estados Unidos. El Golfo de México es una cuenca estructural que presenta de 10 a 15 km de roca sedimentaria, teniendo en su parte central un área de más de 1.5 millones de km² y alcanzando profundidades de 3,750 m en su planicie abisal. Los límites de la cuenca, en su mayoría, se refieren a características estructurales y en este caso a cadenas montañosas. (figura 2.2).

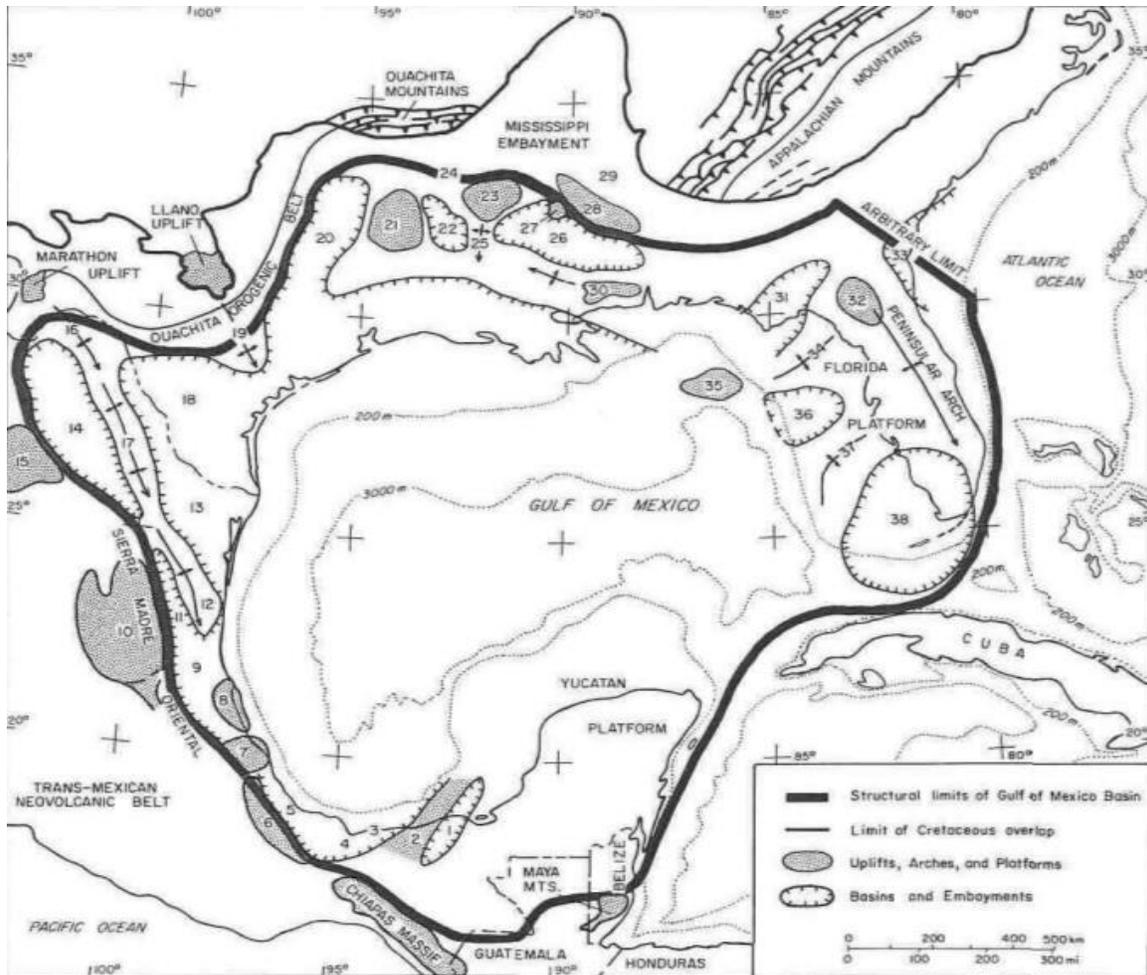


Figura 2.2. Límites estructurales del golfo de México [Salvador, 1991]. (1) Macuspana basin; (2) Villahermosa uplift; (3) Comalcalco basin; (4) Isthmus Saline basin; (5) Veracruz basin; (6) Cordoba platform; (7) Santa Ana massif; (8) Tuxpan platform; (9) Tampico-Misantla basin; (10) Valles-San Luis Potosi 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 Groundarch; (35) Southern platform; (36) Tampa embayment; (37) Sarasota arch; 38, South Florida basin.

Al norte se encuentra delimitado, de oeste a este por los flancos elevados Marathon, el macizo Edwards, el cinturón orogénico Ouchita, el cinturón del Central Mississippi y el extremo sur de los Apalaches; al oeste se ubica La Sierra Madre Oriental y al suroeste el macizo de Chiapas; al este y sur se localizan las Plataformas de Florida y Yucatán respectivamente. Las planicies costeras así como las plataformas del Golfo de México se distinguen de acuerdo a sus límites: hacia el norte y noroeste más anchas con una pendiente más suave hacia el centro, al oeste la llanura costera y la plataforma son mucho más estrechas

y escarpadas; al sureste y este el basamento se eleva súbitamente a lo largo de los escarpes marinos de Campeche y Florida hasta las plataformas carbonatadas de Yucatán y Florida [Bryant *et al.*, 1991].

De acuerdo con la Organización Internacional Hidrográfica (IHO) los límites del Golfo de México son: En el sureste, se une mediante una línea el Faro de Cabo Catoche con el Faro de Cabo San Antonio en Cuba, se rodea esta isla hasta el meridiano 83 hasta llegar a Dry Tortugas y luego a Rebecca Shoal, de allí se limita a través de Florida Keys hasta la Bahía de Florida para continuar con las costas de E.U.A y México hasta regresar a Cabo Catoche (figura 2.3).

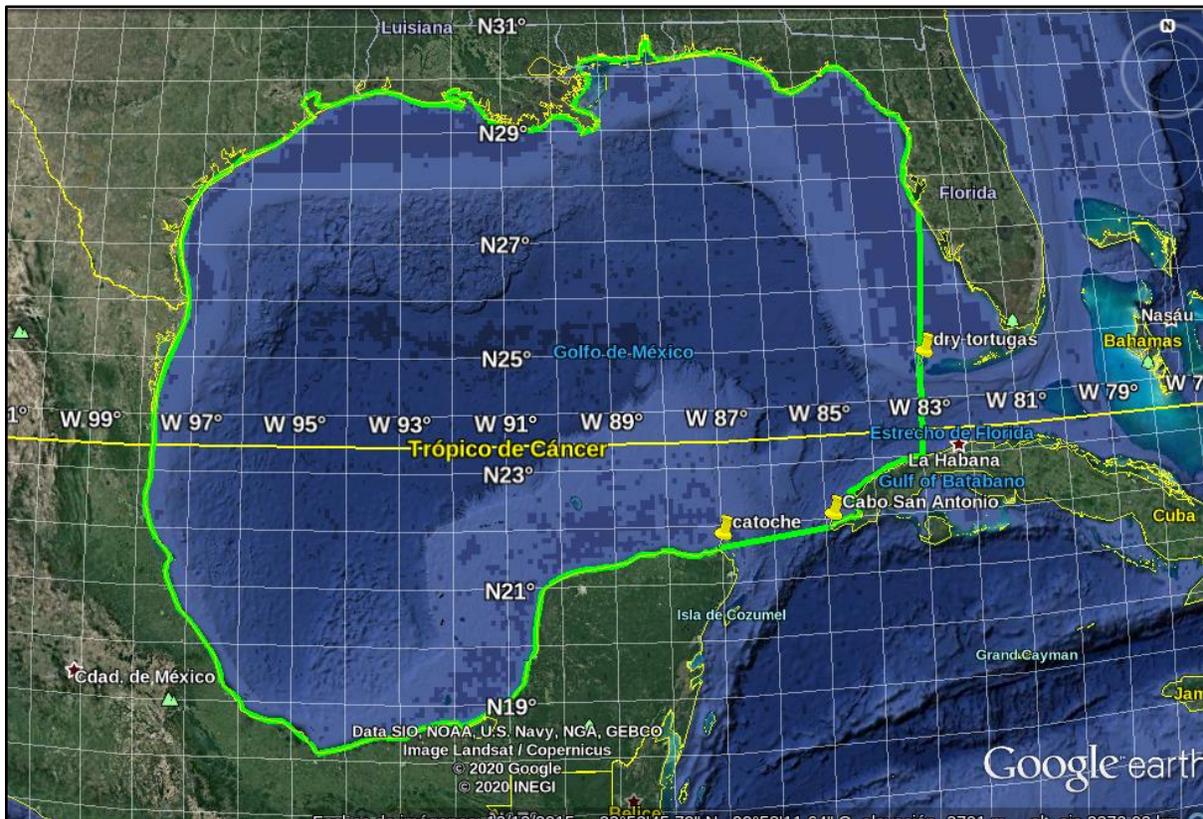


Figura 2.3. Mapa de los límites del Golfo de México de acuerdo con la IHO realizado en Google Earth.

2.3. Fisiografía marina

Las plataformas continentales del Golfo de México ubicadas en la parte norte, sur y este son amplias extendiéndose hasta 170 km, mientras que hacia el oeste en la plataforma de México puede contar en algunas partes con tan solo 13 km de ancho. La Planicie Abisal

Sigsbee a pesar de ser una de las superficies más planas en la Tierra es intrusionada por estructuras de sal ascendente y tiene espesores de sedimento de 9 km aproximadamente. En Texas y Louisiana la suave pendiente contrasta rigurosamente con las pendientes del oeste de Florida y Campeche. En Florida, esta plataforma carbonatada se separa en el occidente por sedimentos terrígenos y por el Cañón de Soto; por otro lado, el cañón de Campeche divide la Plataforma de Yucatán compuesta por carbonatos de la región Domos de Campeche compuesta por sedimentos terrígenos, que es afectada por la tectónica salina [Bryant *et al*, 1991].

El cañón de Veracruz separa las estructuras de los pliegues submarinos mexicanos (mexican ridges foldbelt) de los Domos de Campeche, una región de alta actividad de tectónica salina. El suministro de sedimentos de la zona de drenaje en el canal que forma el cañón de Veracruz ha sido controlado por el efecto de embocadura de las estructuras diapíricas en el este y las crestas en el oeste. Los cañones submarinos DeSoto y Mississippi contrastan con los cañones Alaminos, Río Perdido y Keathley pues estos últimos se deformaron por actividad salina.

Actualmente la fisiografía del Golfo de México es el reflejo de acontecimientos ocurridos durante su formación. Los procesos que han controlado la fisiografía de la cuenca del Golfo de México son: (1) apertura (rifting), (2) subsidencia de la cuenca, (3) desarrollo de plataformas carbonatadas, (4) variaciones en la sedimentación y márgenes debido a los cambios eustáticos del nivel del mar, (5) tectónica salina, (6) deslizamiento de laderas (slumping) y (7) flujos de densidad (turbiditas) [Bryant *et al*, 1991].

2.3.1. Plataforma de Yucatán

Durante el Cretácico y el Cenozoico las plataformas carbonatadas de Florida y Yucatán fueron divididas por una profunda vía marítima; estructuralmente las plataformas se han mantenido inalteradas desde el Cretácico [Schlager *et al*, 1984].

Al norte y oeste de la Plataforma de Yucatán se encuentra una región sumergida llamada Banco de Campeche, la porción correspondiente en tierra es de topografía kárstica con poco drenaje superficial por lo que no ha tenido influencia relevante en la descomposición de la plataforma y su pendiente. Hacia el norte la plataforma es ancha

alcanzando 240 km, y es estrecha hacia el oriente. Desde el cretácico temprano se han depositado calizas y evaporitas.

La plataforma se encuentra dividida en tres partes con grandes pendientes que se extienden hasta 3,600 m desde el borde de la plataforma hasta el fondo del golfo. Existen terrazas que rompen dichas pendientes, una de las principales es la llamada terraza de Campeche que se sitúa a 1000 m de profundidad y 200 km de ancho, con una pendiente de 5° aproximadamente.

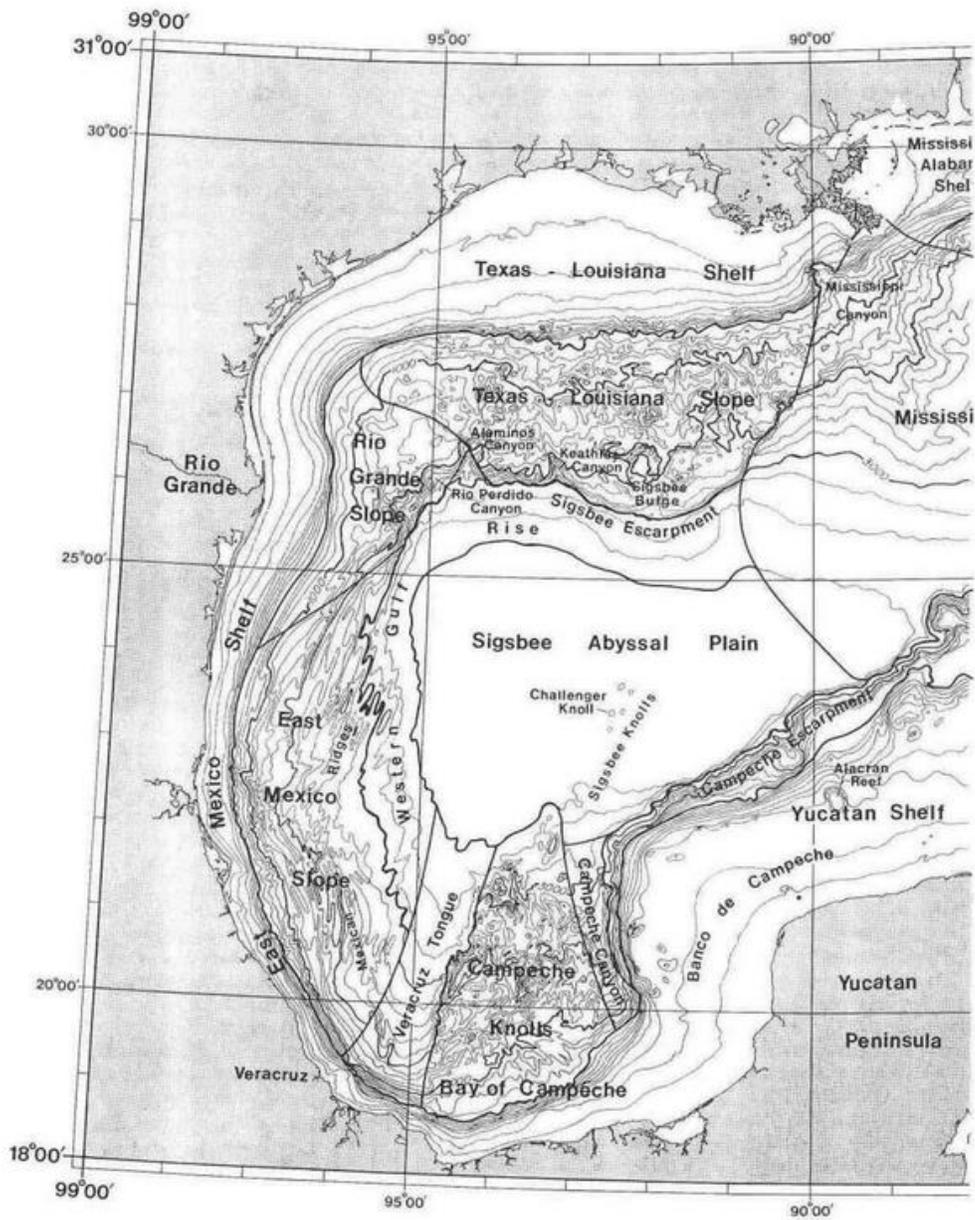


Figura 2.4. Provincias Fisiográficas del Golfo de México [Bryant *et al.*, 1991].

2.3.2. Domos salinos de Campeche

La provincia de los Domos de Campeche se ubica en la Bahía de Campeche. Los primeros en examinar con detalle los Domos de Campeche fueron Worzel *et al.* (1968) y plantearon que el mecanismo que controlaba la topografía de la región era la sal. Se limita al oeste con el Cañón de Veracruz, al este con el Cañón de Campeche, al sur encuentra sus límites con la Cuenca Salina del Istmo y la Plataforma de Yucatán y al norte tiene continuidad con la Planicie Abisal Sigsbee.

Existe una alineación entre la Cuenca Salina del Istmo, los Domos de Campeche y los Domos de Sigsbee la cual sugiere que la sal subyace al talud continental de la bahía de Campeche. Garrison y Martin (1973) afirman que en la región central de la ladera superior cerca de 20 ° N existe una superficie de más de 20,000 km² que está sustentada por macizos de sal. El fondo marino de esta provincia es monticular debido al desplazamiento vertical de las masas de sal que se encuentran cubiertas por capas de sedimentos de 1 km de espesor y fuertemente deformadas o falladas.

2.3.3. Escarpe de Campeche

El escarpe de Campeche es el resultado de la formación de arrecifes en el Cretácico temprano y el crecimiento de la Plataforma de Yucatán a través de la lenta acumulación de carbonatos y evaporitas que han persistido o superado la subsidencia [Bryant *et al*, 1991].

Esta provincia se orienta aproximadamente de norte a sur y abarca una superficie de poco más de 3 000 km², está formada por rocas carbonatadas y anhidritas. Presenta fallas lítricas paralelas al margen del escarpe como resultado de la fuerte pendiente y la fuerza de gravedad actuante sobre los macizos que la conforman. [Mendoza, 2000].

2.4. Fisiografía terrestre

La Península de Yucatán es una provincia fisiográfica terrestre de la cuenca del Golfo de México es una planicie carbonatada que no supera los 100 m sobre el nivel del mar y el relieve escaso evidencia las secuencias del Cretácico y Cenozoico que la subyace, la sección tiene un espesor de 3000 a 4000 m.

2.5. Marco geológico

El proceso geológico con el que se inició el surgimiento del Golfo de México fue con la fragmentación de Pangea, dicho proceso prevaleció hasta el final del Jurásico Medio y probablemente hasta el Jurásico Superior (Oxfordiano inferior), la actividad tectónica de extensión fue la que controló la sedimentación continental durante esta época [Cantú-Chapa, 1998; Salvador, 19991].

Existe la probabilidad de que el mar iniciara su avance desde el Pacífico hacia el Proto-Golfo formando extensos cuerpos someros de aguas hipersalinas y movilidad limitada que favoreció el depósito de volúmenes enormes de evaporitas en la parte central del Golfo de México [Padilla y Sánchez, 2007].

La evidencia con que se cuenta en la actualidad indica que toda la sal del Golfo de México se depositó durante el Calloviano (164-159 Ma) [Salvador, 1991]. El movimiento del bloque de Yucatán hacia el sur se realizó a lo largo de dos sistemas de fallas transformantes, el sistema de Falla Tamaulipas-Oaxaca; el desplazamiento de la falla fue cambiante pues fue normal durante el Permotriásico de nuevo transformante durante el Calloviano y nuevamente tuvo desplazamiento normal después del Calloviano [Padilla y Sánchez, 1986].

Posterior al rifting (finales del Calloviano) comenzó el depósito de sedimentos clásticos principalmente provenientes del área del bloque de Yucatán y del noreste. Ocurrió una subsidencia lenta y continua que perduró todo el Kimmeridgiano. Para el Tithoniano se desarrollaron amplias plataformas en el sureste del Golfo que se extendían hasta el Macizo de Chiapas y el occidente del Bloque de Yucatán. Estas plataformas además de continuar aportando clásticos, se depositaron sobre ellas grandes volúmenes de carbonatos. La velocidad de la subsidencia de las plataformas aumentó en el Neocomiano Superior lo que benefició el depósito de grandes volúmenes de carbonatos con espesores de más de 1,500 m en los cuales disminuyeron las intercalaciones de lutitas, por otro lado franjas de arrecifes de rudistas se formaron en los bordes de las plataformas.

Durante el Paleoceno tardío hasta el Eoceno temprano ocurrió la Orogenia Laramide que dio origen a las cadenas plegadas y cabalgadas del occidente del Golfo de México provocada por la convergencia entre la Placa Farallón por debajo de la Placa

Norteamericana. Al término de la orogenia el aporte de sedimentos se acentuó significativamente, tal efecto fue tan grande que a partir del Eoceno tardío la forma de la cuenca fue enteramente sometida al flujo de los sedimentos clásticos, asimismo la sal y arcilla del sur del Golfo de México se comenzaron a desplazar formando los diapiros [Padilla y Sánchez, 2007].

2.6. Tectónica salina

La tectónica salina se refiere a la deformación que implica cuerpos de sal formados por halita y otros minerales (anhidrita o yeso) [Hudec and Jackson, 2007]. Los movimientos que se presentan en la tectónica salina pueden ser de extensión, acortamiento, desgarramiento y halokinesis, este último se refiere a una deformación provocada por la fuerza de gravedad.

La sal actúa como un lubricante geológico que fluye como un fluido viscoso en el subsuelo y en la superficie [Jackson and Hudec, 2017]. Las estructuras de sal son el resultado del tipo de movimiento involucrado en la tectónica y en los sedimentos próximos a ellas y en realidad son estos sedimentos los que brindan más información que el mismo cuerpo salino. Las relaciones de espesor, contacto, edad y regionales son aspectos que permiten dar una interpretación a la tectónica salina y se obtienen a partir del vínculo que existe entre los estratos de sobrecarga y los cuerpos de sal.

Dentro de las estructuras más comunes de los cuerpos de sal se encuentran: 1) los diapiros que son masas de sal discordantes a su sobrecarga, es decir, sus contactos superiores cortan a través de la estratificación de la sobrecarga y se han desprendido de la fuente principal de sal; 2) las almohadas (*salt pillows*) y anticlinales (*salt anticlines*), las cuales son concordantes con su sobrecarga. En el caso de las almohadas se aprecia en superficie un domo con una relación de longitud y anchura inferior a dos, en el caso de los anticlinales esta relación es de dos o más; 3) las reservas (*stocks*) y paredes de sal (*salt walls*), que alcanzan dimensiones de 10 km de altura y en el caso de las paredes hasta 100km de largo; 4) Las láminas de sal (*salt sheets*) y doseles de sal (*salt canopies*) que son estructuras compuestas por sal alóctona, es decir, se desprendieron de la fuente principal y se extienden en dirección horizontal. La diferencia entre estos dos es que las láminas se componen de sal proveniente de una sola fuente y doseles son una integración de dos o más láminas, siendo posible cubrir miles de kilómetros. [Jackson and Hudec, 2017].

En la figura 2.5 se observa el conjunto de las estructuras salinas más comunes, sus nombres se derivan de sus respectivas formas transversales.

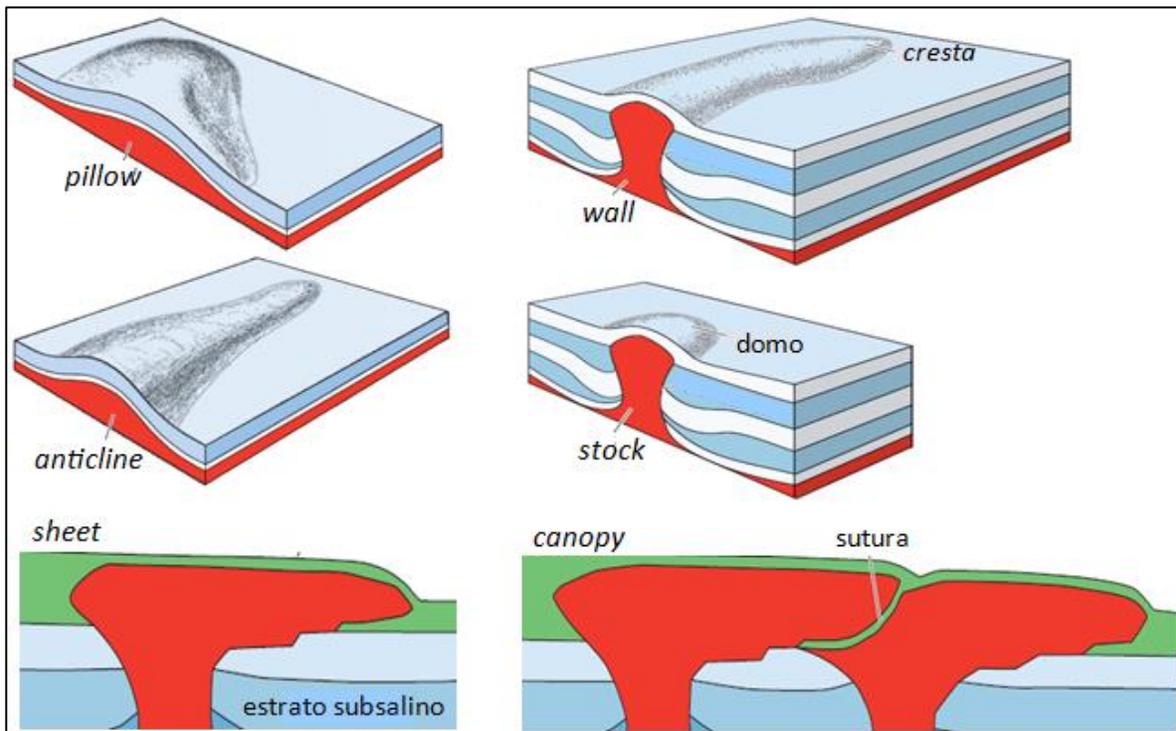


Figura 2.5. Estructuras salinas [Modificada de Jackson and Hudec, 2017].

2.7. Estudios geofísicos en los Domos de Campeche

Las figuras 2.6, 2.7 y 2.8 muestran mapas con datos de batimetría, magnetometría y gravimetría de distintos cruceros en la zona norte de los Domos de Campeche obtenidos de la base de datos del NGDC (*National Geophysical Data Center*) que pertenece a la NOAA (*National Oceanographic and Atmospheric Administration*). Estas mallas cubren un área entre las longitudes 92°20' W y 94°24' W y las latitudes 22°40' N y 19°32' N.

Se utilizaron datos de cinco campañas (U171GM, KA939009, V2402, IG1601 y RC0902), compilando 7220 valores de profundidad (m), 4488 valores de anomalía gravimétrica de aire libre (mGal) y 4075 valores de campo magnético total (nT) para hacer el mallado. Los datos de batimetría son de ecosondeo monohaz, y carece de registro de batimetría multihaz del área de estudio en la base de datos. Los mallados se realizaron con el software Surfer con el método de interpolación de mínima curvatura.

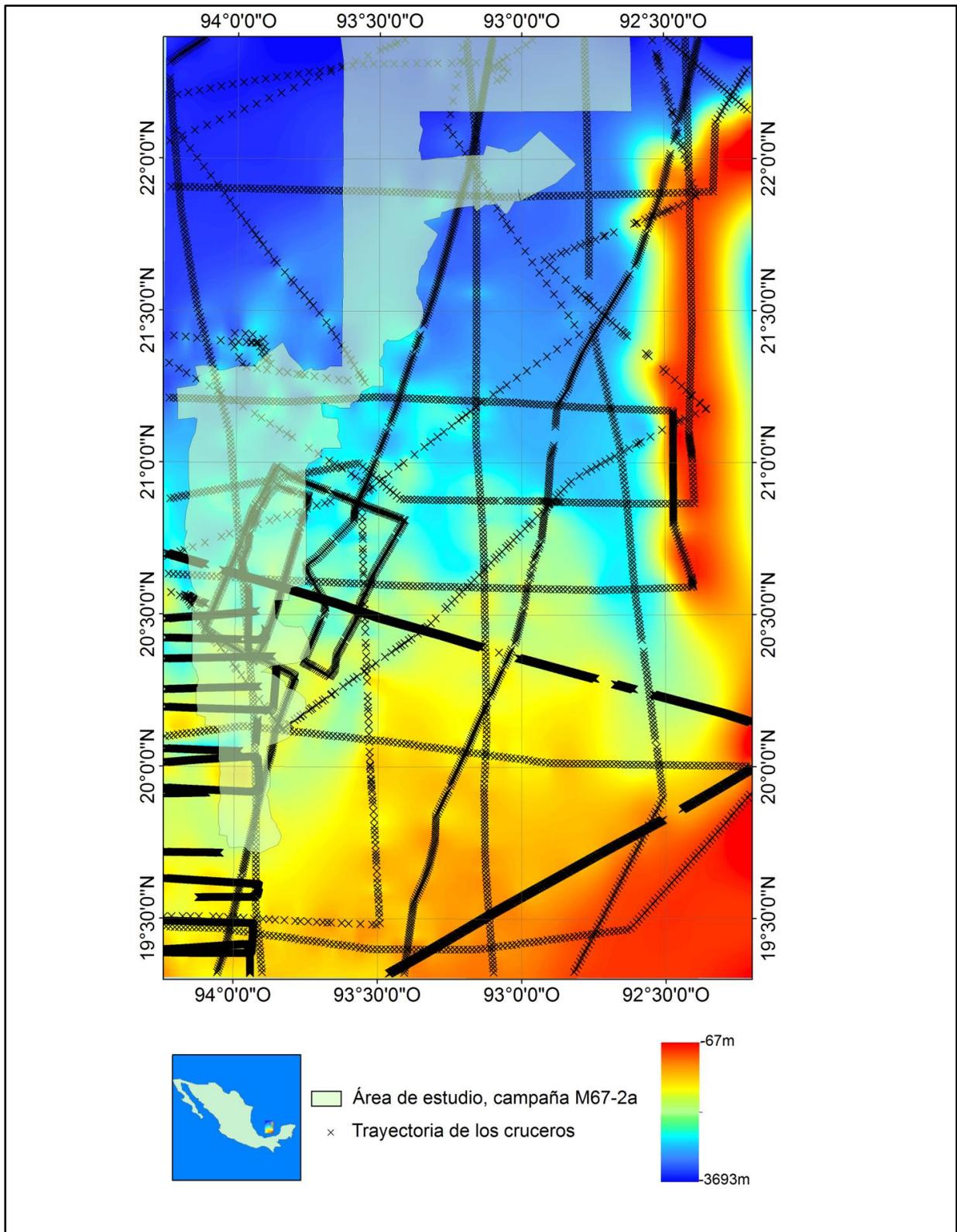


Figura 2.6. Mapa de batimetría monohaz derivado de datos de la NGDC. Región norte de los domos salinos de Campeche, Golfo de México.

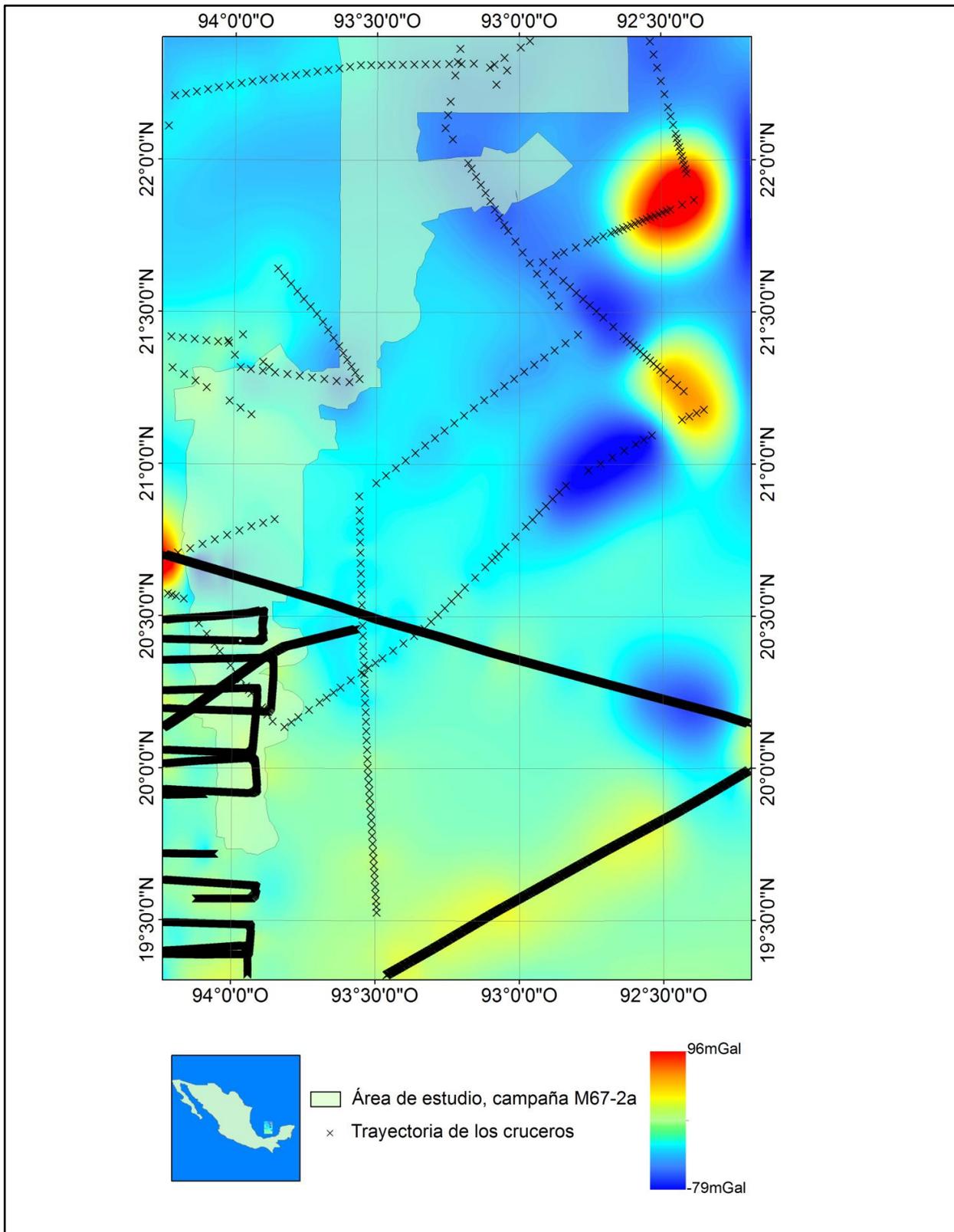


Figura 2.7. Mapa gravimétrico derivado de datos de la NGDC. Región norte de los domos salinos de Campeche, Golfo de México.

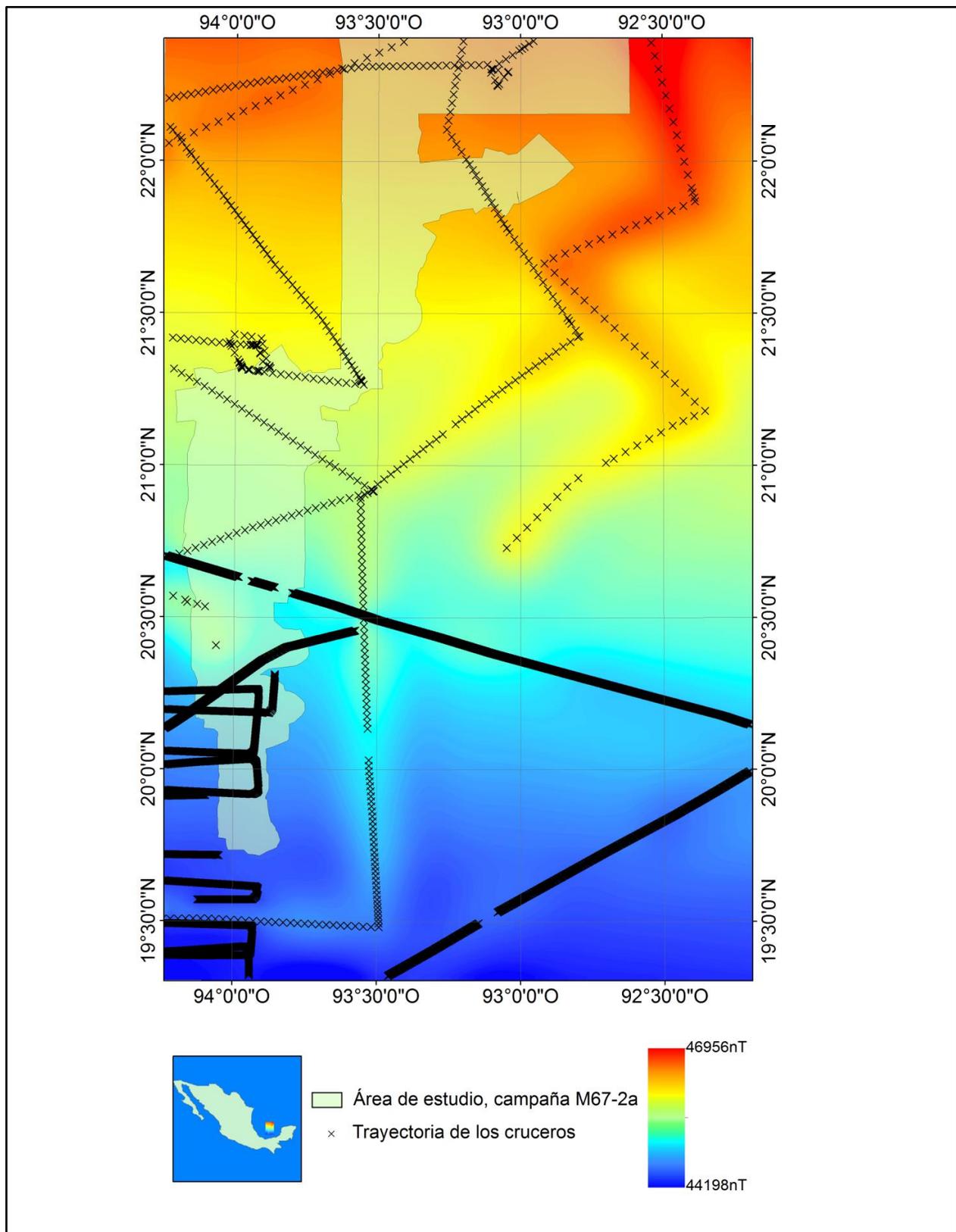


Figura 2.8. Mapa magnético de datos obtenidos de la NGDC. Región norte de los domos salinos de Campeche, Golfo de México.

La figura 2.9 muestra la posición de los perfiles sísmicos monocanal de la campaña V2402 (1967) en el área de estudio; también se muestran los polígonos correspondientes a los cruceros M67-2a (2006) y S0174-2 (2003). Estas secciones sísmicas fueron registradas analógicamente en papel y digitalizadas posteriormente.

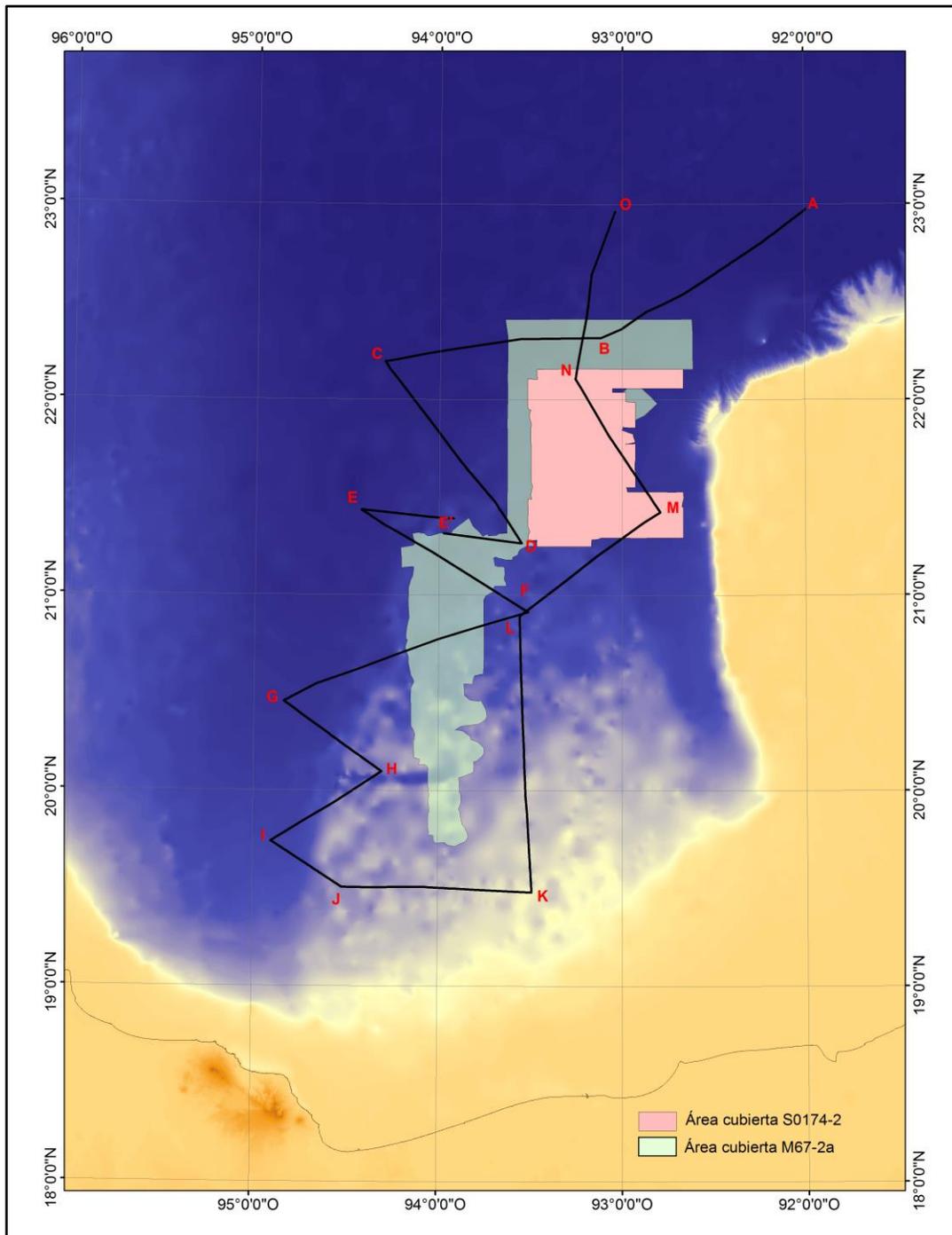


Figura 2.9. Localización de los perfiles sísmicos de la campaña V2402, en el área de los Domos de Campeche. Áreas cubiertas por las campañas S0174-2 (polígono rosa) y M67-2a (polígono verde).

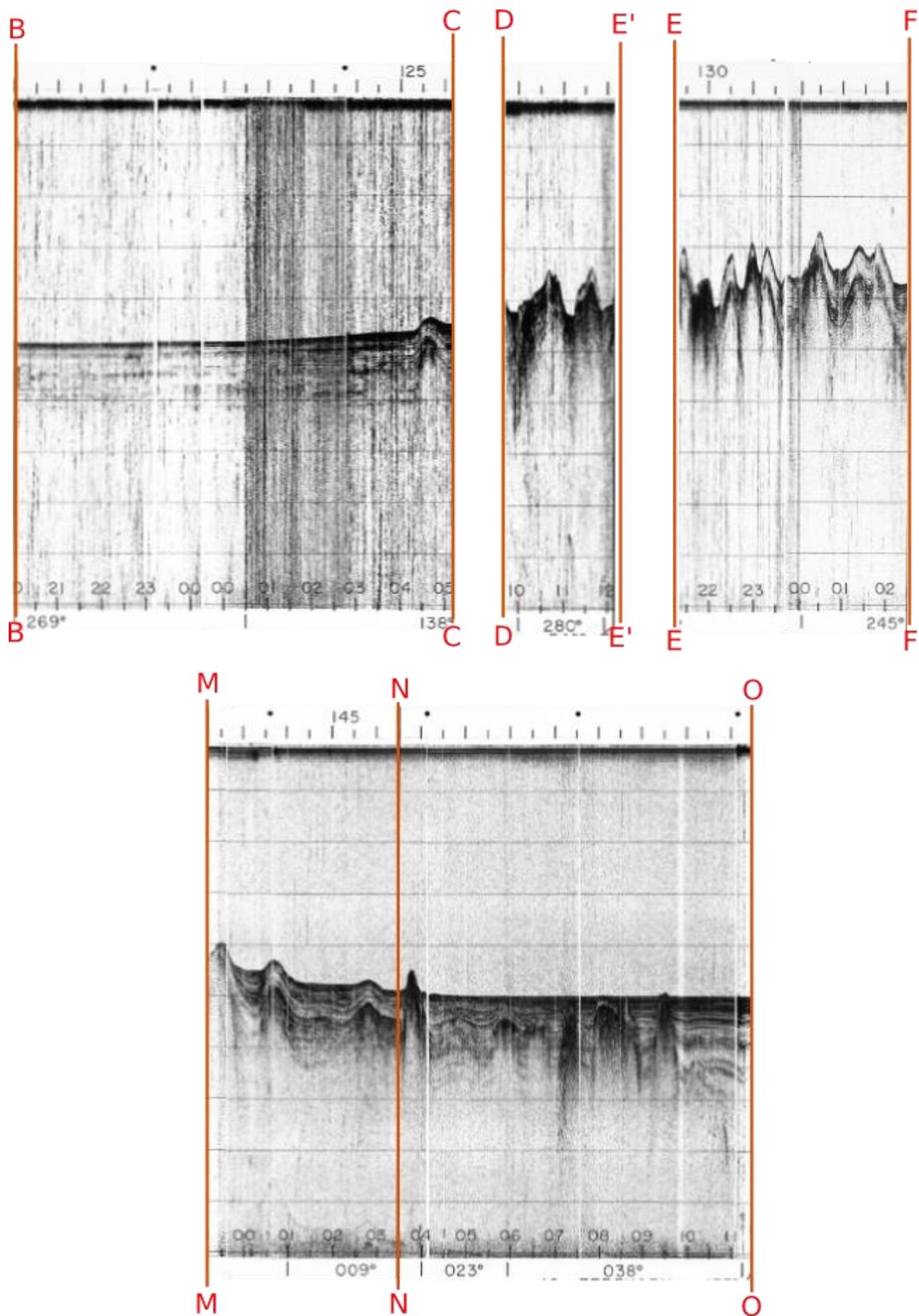


Figura 1.10. Perfiles de sismica monocanal de las líneas BC, DE', EF, MN y NO, campaña V2402 (1967).

Campaña S0174-2 a bordo del RV SONNE

Se llevó a cabo del 26 de octubre al 12 de noviembre del 2003, las zonas estudiadas durante la campaña son: la planicie y domos Sigsbee, el escarpe de Campeche y la provincia de los domos de Campeche. Fue la primera campaña en registrar datos de ecosondeo multihaz, perfiles sísmicos de alta resolución y recolectar muestras de sedimentos y rocas en dichas zonas. Los datos de batimetría fueron obtenidos utilizando una ecosonda multihaz EM 120 mientras que los perfiles sísmicos se obtuvieron con perfilador de penetración o ecosonda paramétrica PARASOUND.

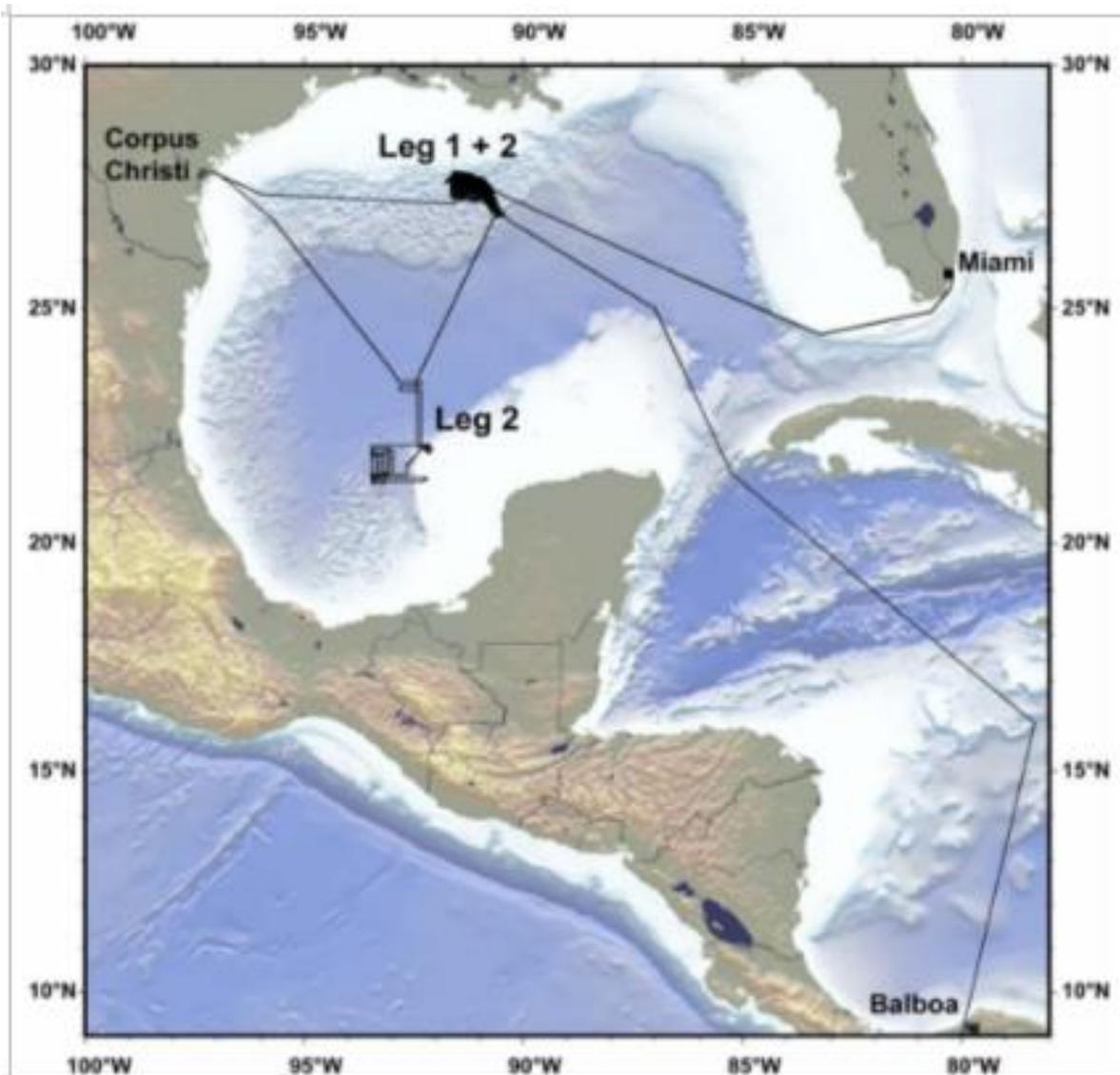


Figura 2.11. Levantamiento de la campaña S0174-2 (Leg2) [Bohrmann y Schenck, 2004].

El objetivo principal de la campaña S0174-2 fue el entendimiento del origen y comportamiento de las estructuras geológicas y componentes biológicos asociadas a la formación de hidrato de metano de emplazamiento somero, su interacción con el ambiente oceánico y sedimentario y, además, para evaluar estas asociaciones en el ciclo del carbono global [Ponce, 2009]. En la provincia salina de los domos de Campeche el objetivo fue evidenciar la presencia de hidratos de gas asociados a ventilas de hidrocarburos en el lecho marino y a las manchas de aceite observadas en imágenes satelitales; además, producir un mapa batimétrico de alta resolución.

En la tesis desarrollada por Ponce (2009) se obtuvieron una carta batimétrica y un mosaico de imágenes de retrodispersión acústica (backscatter) de los datos multihaz de la campaña S0174-2. Estos productos serán utilizados para complementar los resultados de la presente tesis.

Carta batimétrica S0174-2

En la figura 2.12 se observa la carta batimétrica con resolución de 200 m, abarca aproximadamente un área de 6,940 km² correspondiendo profundidades entre 2,360 m y 3,600 m en la parte más profunda. La morfología del área está dominada por estructuras dómicas aisladas, cordilleras formadas por la sucesión de domos y valles que se forman entre estas estructuras salinas; lo cual es similar a la morfología que se observa en el talud continental de Texas y Louisiana en el norte del Golfo de México. En el sector SO son más comunes las cordilleras de domos sucesivos, mientras que en el sector noroeste los domos aislados son más frecuentes.

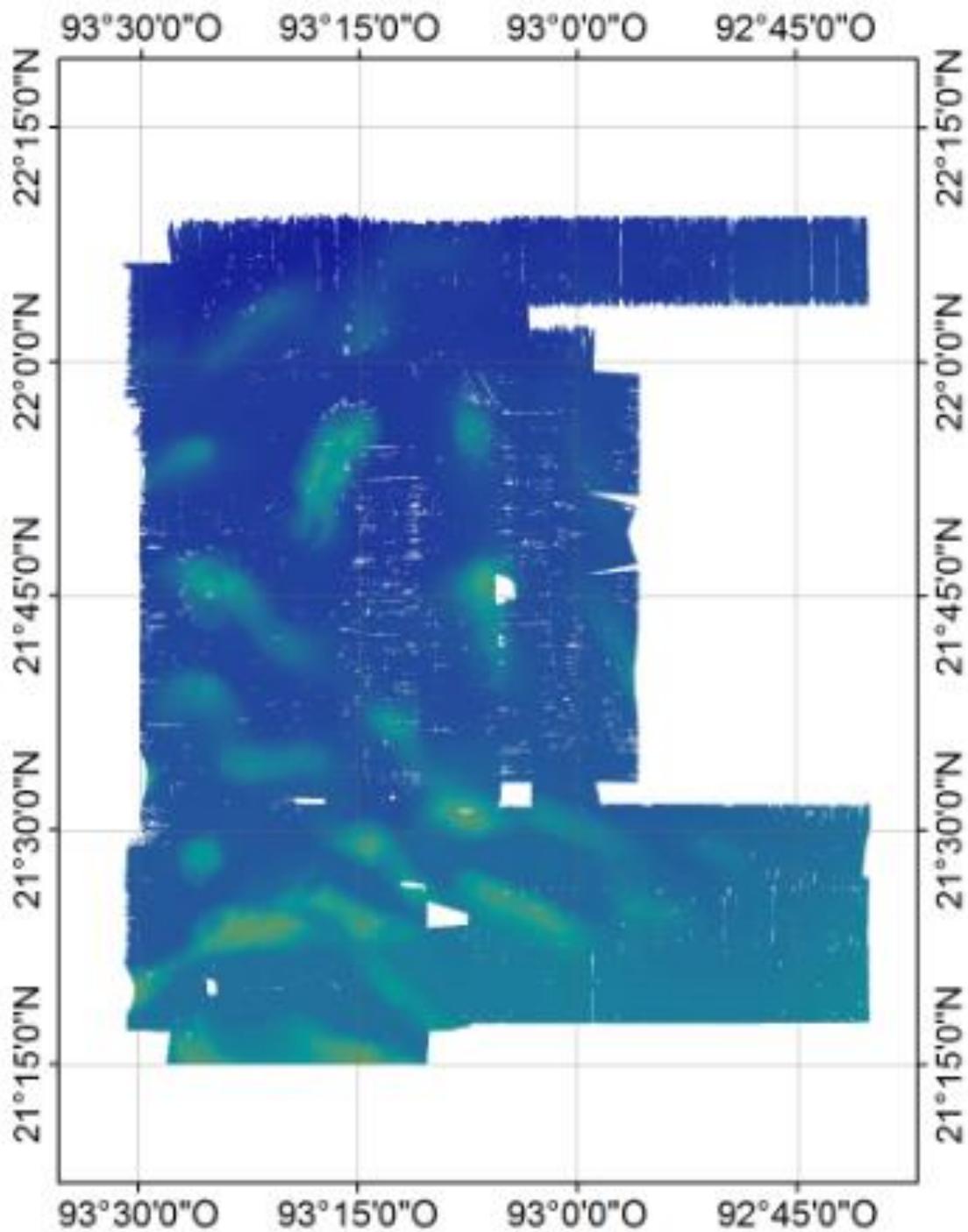


Figura 2.12. Carta batimétrica de alta resolución, campaña S0174-2 [modificado de Ponce, 2009].

Mosaico de imágenes de *backscatter*

El mosaico tiene una resolución de 200 m y cubre la misma superficie que la carta batimétrica (figura 2.13). Se registran alineaciones de zonas de muy alta intensidad de

backscatter en la región del nadir, contrastando con las regiones de los valles entre los domos y planicies de muy baja pendiente, donde se observa que los valores de *backscatter* disminuyen conforme se alejan del nadir. Se observa también que sobre los domos los valores de *backscatter* en general son más bajos.

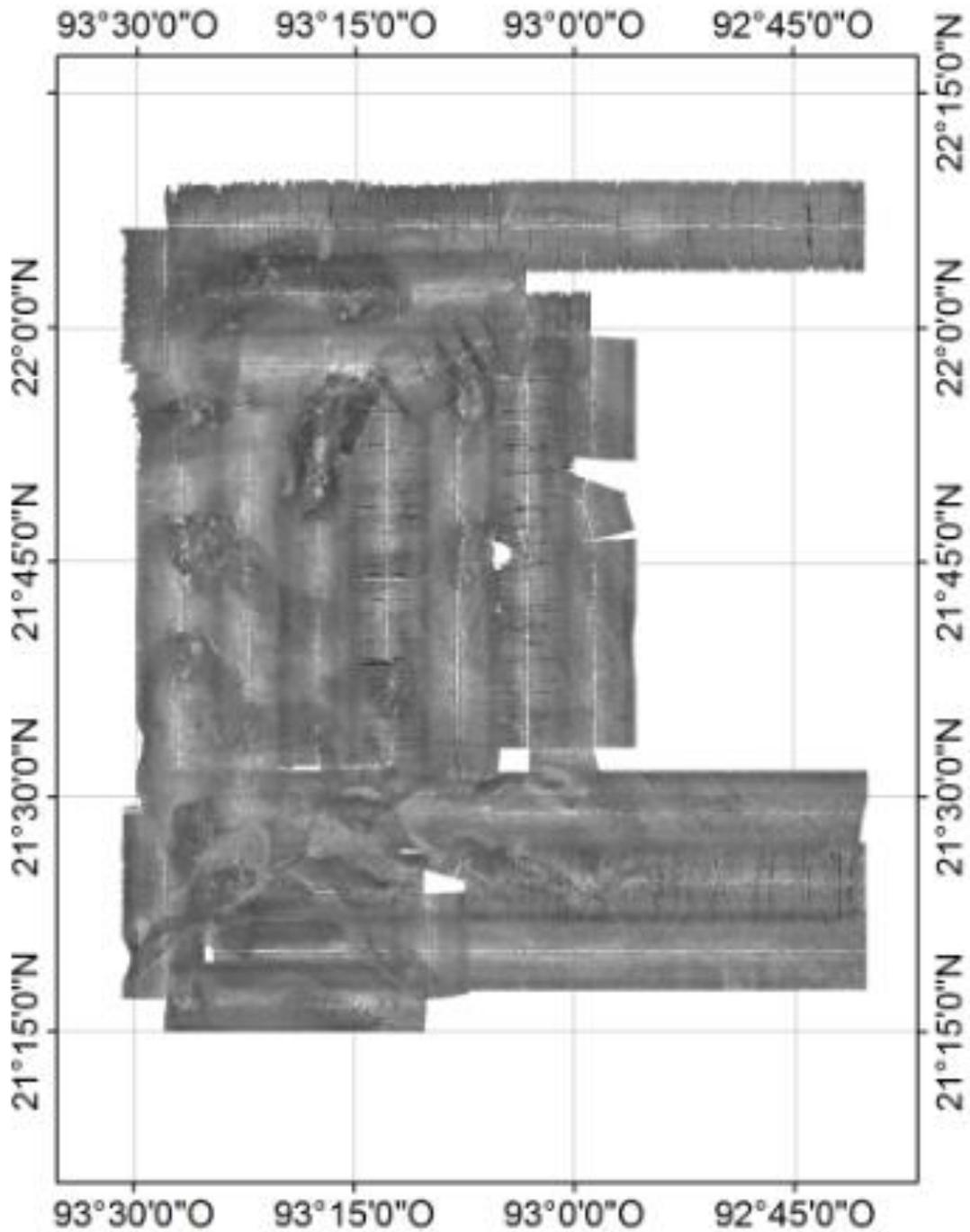


Figura 2.13. Mosaico de imágenes acústicas, campaña S0174-2 [modificado de Ponce, 2009].

2.8. Ecosondeo del fondo marino

Una ecosonda es un equipo utilizado para la obtención de profundidades del fondo marino, se logra por medio de la medición del intervalo de tiempo entre un pulso emitido y el retorno del eco, tomando en cuenta la velocidad del sonido en el mar.

El primer sonar diseñado de la misma manera que el sonar moderno fue inventado y desarrollado como una consecuencia directa de la pérdida del Titanic en 1912, donde el requisito básico era detectar icebergs en 2 millas de distancia. El sonido subacuático es utilizado tanto por ballenas como por delfines para la comunicación y la ecolocalización [Saracin, 2014].

2.8.1. Ecosonda Monohaz

La ecosonda monohaz emite un pulso (ping) acústico, en una única dirección - generalmente hacia abajo - éste viaja a través de la columna de agua, al tocar el fondo marino se refleja, transmite y dispersa. El sonido se produce con un transductor (en modo de emisión), que convierte la energía eléctrica en acústica, el equipo recibe el eco del fondo por medio del mismo transductor (en modo de recepción) que convierte las oscilaciones de presión de nuevo en una señal eléctrica. Los transductores se encuentran adosados en el casco del buque.

La distancia de la ecosonda al reflector se calculará una vez que es medido el intervalo de tiempo entre la transmisión del pulso y la recepción del eco; se considera generalmente que la velocidad del sonido en el mar es de aproximadamente 1 500 m por segundo. La frecuencia de la señal acústica transmitida es la frecuencia de oscilación propia del transductor, se denomina frecuencia de operación, y es función de las dimensiones y material del mismo. El número de pulsos emitidos por unidad de tiempo se conoce como tasa de repetición de pulso, la duración del pulso es el intervalo de tiempo en el que el transductor vibra [Burczynski, 1982].

2.8.2. Ecosonda Multihaz

A diferencia de la ecosonda monohaz, esta ecosonda emite el pulso acústico hacia una región más amplia del lecho marino, y recibe en múltiples direcciones por cada ciclo de transmisión y recepción (ping). La geometría de estos haces en diferente dirección forma un

abánico transversal al buque y para cada haz se hace una estimación de profundidad. Mientras el buque avanza los pings consecutivos dan un mapa continuo del área (figura 2.14).

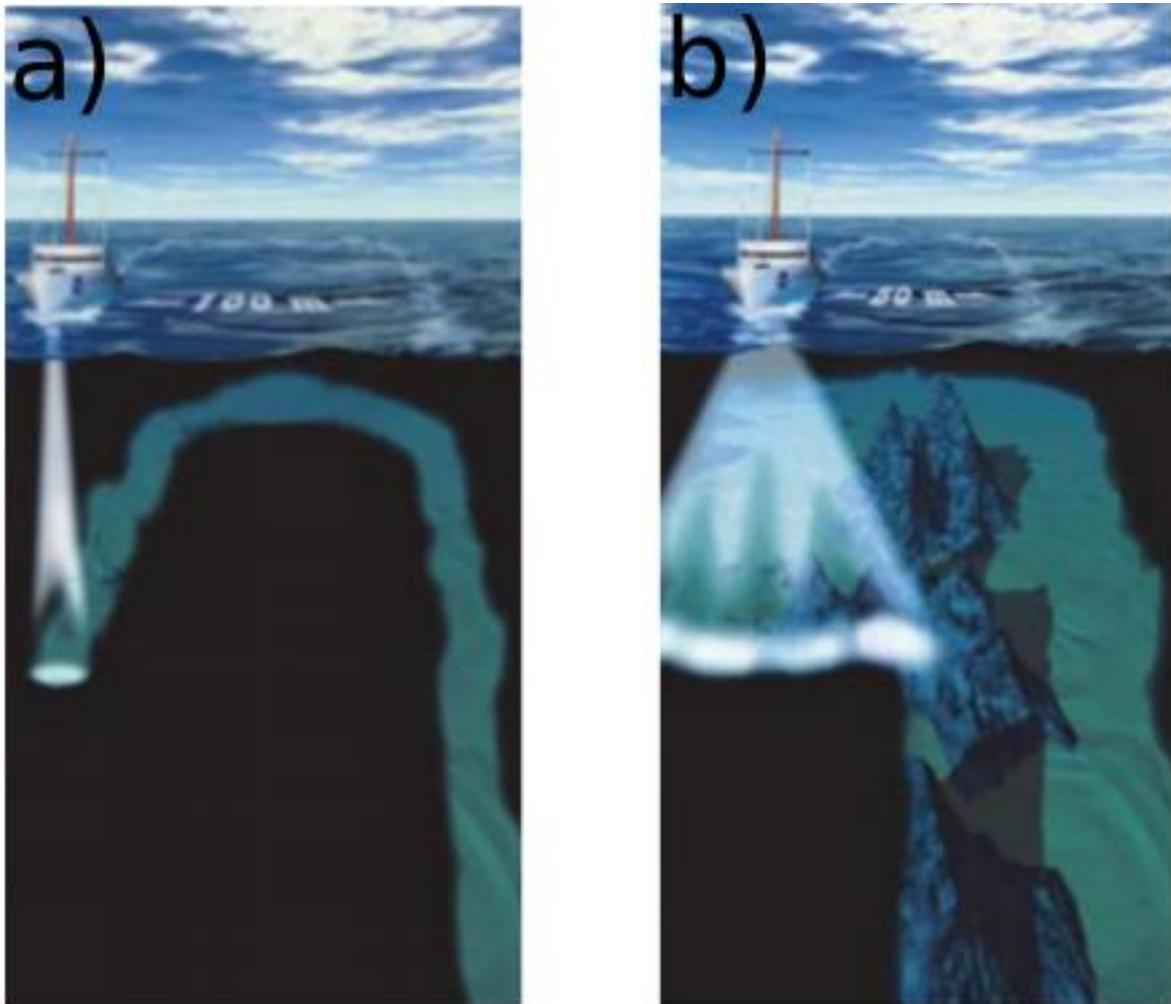


Figura 2.14. Ecosondeo monohaz (a), ecosondeo multihaz (b) [modificada de Saracin and Colin, 2014].

La figura 2.15 muestra la dirección de navegación “*along-track*” y perpendicular a ella se encuentra la línea “*across-track*” en la que se distribuye el barrido lateral. Al área cubierta por este barrido lateral se le conoce como “*swath*” y al ancho del “*swath*” en la dirección *acrosstrack* se le conoce como *swathwidth*.

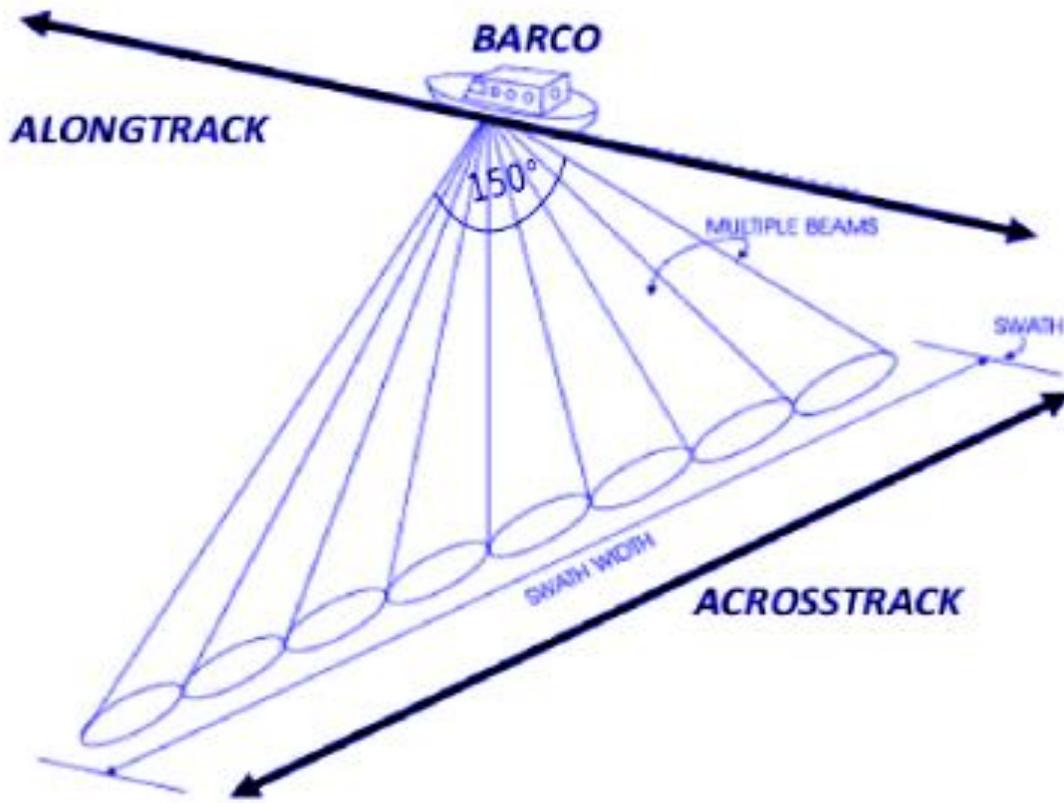


Figura 2.15. Esquema de un sistema multihaz, en el caso de la ecosonda EM120 el ángulo de cobertura es de 150 grados y 191 haces por ping [modificada de Saracin and Colin, 2014].

Las ecosondas multihaz se basan en la alta resolución angular de cada rayo para medir la profundidad simultáneamente a intervalos angulares discretos evitando así la mayoría de las ambigüedades del tiempo encontradas en la geometría lateral. Por la misma razón se pueden utilizar ecosondas multihaz para obtener sondeos de profundidad geoméricamente correctos del fondo marino [de Moustier, 1986a, Hammerstad *et al.*, 1991].

La resolución espacial está definida en términos del ancho del haz (tamaño del ángulo sólido) y ancho de banda (espesor acústico en la zona ensonificada). El ancho de banda del pulso emitido por el transductor condiciona la resolución de alcance ΔR , esta última se refiere a la capacidad de discriminar señales reflejadas de objetivos adyacentes. La ecuación 1 (ec.1) muestra la relación entre el ancho de banda y la resolución de alcance.

$$\Delta R = \frac{c}{2w} \quad \text{ec. (1)}$$

donde C es la velocidad del sonido y W es el ancho de banda de la señal, cuanto mayor sea el ancho de banda mayor será la resolución de alcance.

Por otro lado, la resolución angular $R\theta$, que es la capacidad de discriminar la dirección proveniente de un eco que está regresando al transductor, resulta proporcional a la frecuencia y está dado por:

$$R\theta = \frac{c}{FL} \quad \text{ec. (2)}$$

donde F es la frecuencia central y L es la longitud del transductor.

La ecuación 3 muestra la relación entre la resolución angular y el ancho del haz del transductor, así como la longitud de onda y las dimensiones del mismo. θ_{bw} :

$$R\theta \approx \theta_{bw} = 0.88 \frac{\lambda}{L} \quad \text{ec. (3)}$$

donde λ es la longitud de onda acústica y el término constante 0.88 es una aproximación cuando la longitud de la apertura L es mayor a 4λ (un haz estrecho en altas frecuencias).

El área ensonificada por un pulso dentro del haz es el producto de la resolución de alcance ΔR proyectada en la horizontal por la extensión de la resolución angular $R\theta$ en el mismo plano, en el ángulo de incidencia ϕ (ecuación 4 y figura 2.16).

$$A = \frac{\Delta R}{\cos\phi} \cdot R\theta = \frac{c}{2W\cos\phi} \cdot \frac{Rc}{FL} \quad \text{ec. (4)}$$

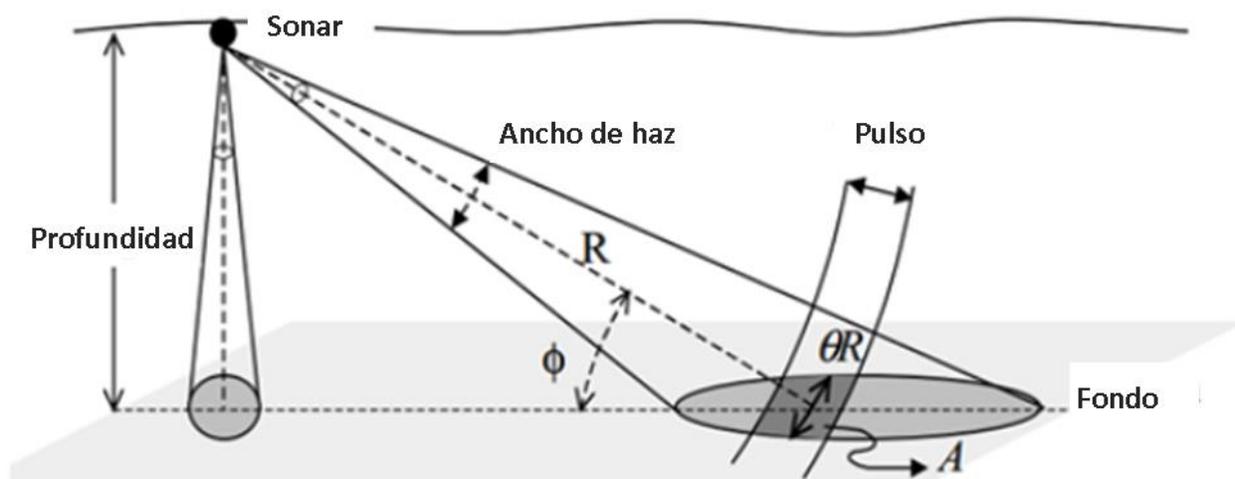


Figura 2.16. Relación entre el ancho del haz y tamaño la huella acústica [modificada de Saracin and Colin, 2014].

Con respecto al tamaño de la huella acústica, se puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$f_a = \frac{2d}{\cos^2\theta} \cdot \tan\frac{\varphi}{2} \quad \text{ec. (5)}$$

donde d es la profundidad, θ es el ángulo de incidencia y φ es el ancho del haz de recepción en la dirección transversal.

Si se asume que la superficie es plana y la profundidad es constante, la dimensión de la huella aumenta si el ángulo de incidencia crece, por lo que se espera obtener la máxima resolución en la región del nadir e irá disminuyendo hacia los extremos en dirección transversal.

2.8.3. Movimientos del buque

El buque se comporta como una plataforma móvil en el agua, debido a esto, se requiere tomar en cuenta los movimientos que tiene el buque para determinar correctamente la posición del eco en el lecho marino. El registro de estos movimientos se obtiene con un sistema de referencia en el buque los cuales pueden ser sensores inerciales con un sensor de rumbo (usualmente un girocompás) o sensores inerciales con la integración de información GPS y su magnitud está en función del oleaje, corrientes y viento; así como de la operación y el diseño del buque.

Existen seis grados de libertad para los movimientos del buque permitiendo tres movimientos de traslación y tres de rotación como se muestra en la figura 2.17.

1. Pitch (Cabeceo), rotación alrededor del eje transversal: movimiento angular que levanta la proa del buque (signo positivo) o la baja (signo negativo).
2. Roll (Balanceo), rotación alrededor del eje longitudinal: movimiento que “acuesta” al buque, hacia estribor (signo positivo) o hacia babor (signo negativo).
3. Yaw (Guiñada), rotación alrededor del eje Z: movimiento sobre el plano horizontal que “gira” el buque hacia estribor (signo positivo) o hacia babor (signo negativo).
4. Heave (Deriva vertical), traslación vertical sobre el eje Z.
5. Surge (Deriva horizontal), traslación horizontal sobre el eje longitudinal.
6. Sway (Deriva horizontal), traslación horizontal sobre el eje transversal.

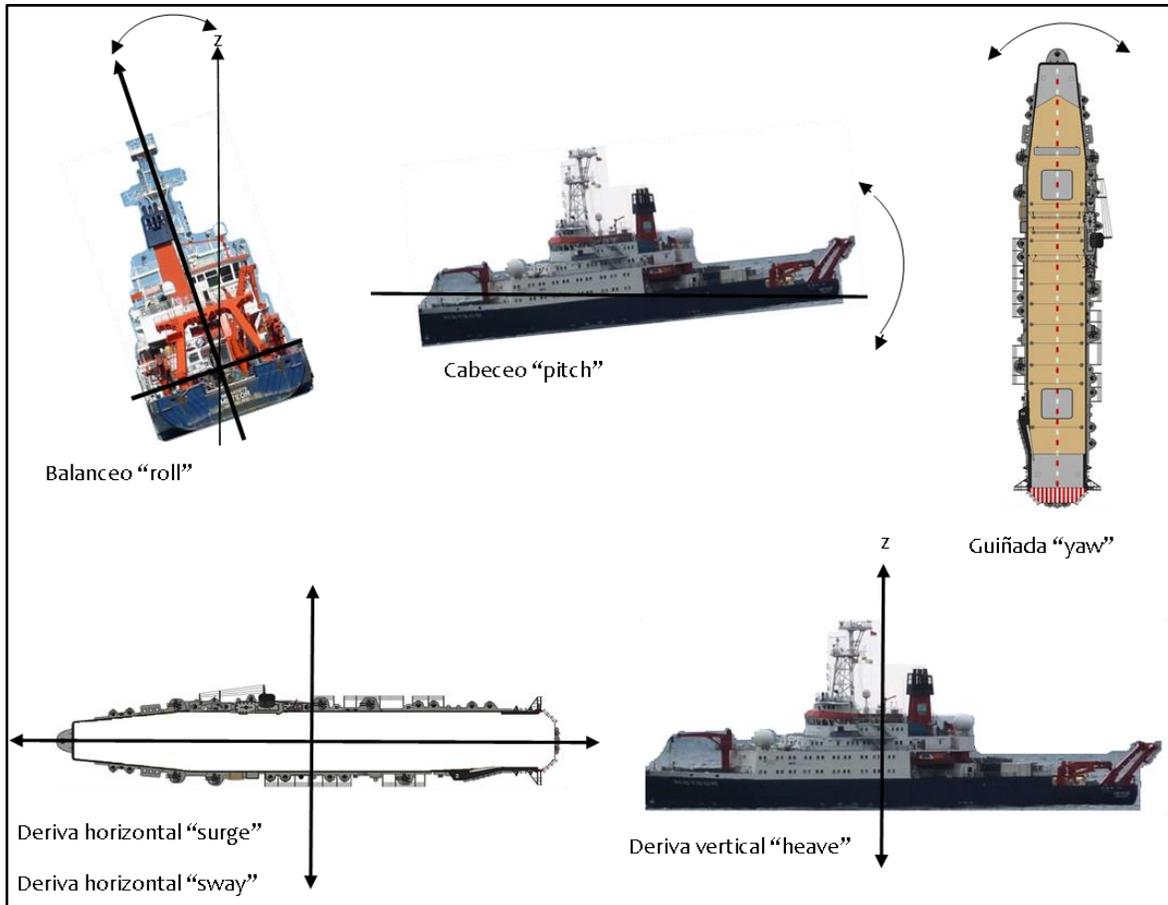


Figura 2.17. Movimientos del buque.

Los cuatro movimientos que tienen un efecto más significativo para el cálculo de posicionamiento de los haces son: pitch, roll, yaw y heave. Debido a los movimientos del barco la ecosonda no tiene la misma posición al momento de transmitir el pulso acústico que cuando lo recibe por lo tanto los ángulos de salida y de arribo de la onda no serán concordantes respecto al sistema de referencia afectando el registro de la señal.

2.9. Propagación acústica en el mar

2.9.1. Onda acústica

El sonido es una perturbación de presión que viaja como una onda, al sonido también se le denomina ondas de compresión u ondas longitudinales [Saracin, 2014]. Los elementos que caracterizan a las ondas acústicas son:

- Periodo de onda T [s]
- Frecuencia $f = 1 / T$ [Hz]

- Velocidad del sonido C [m / s]
- Longitud de onda $\lambda = C / f$ [m]

La onda acústica (figura 2.18) tiene la ventaja de propagarse en el agua con menor pérdida de energía, alcanza grandes distancias y viaja a gran velocidad en el mar.

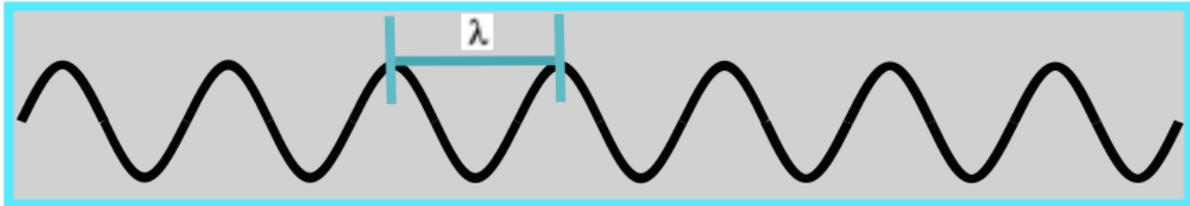


Figura 2.18. Onda acústica.

2.9.2. Propagación del sonido en una columna de agua

Para un estudio batimétrico la velocidad del sonido debe ser conocida para obtener posición del eco en el lecho marino. La velocidad del sonido en el agua es función de la densidad y su compresibilidad que a su vez dependen de la temperatura, la salinidad y la presión. Los flujos de calor, la evaporación, la lluvia, la afluencia de los ríos, la congelación y fusión del hielo marino influyen en la distribución de la temperatura y la salinidad en la superficie del océano y a través de la columna de agua. En general, en el océano abierto la columna de agua se encuentra estratificada y se considera que no hay cambios laterales de estas propiedades.

La salinidad, en su definición más simple es la “cantidad total de material disuelto en gramos en un kilogramo de agua de mar” por lo que es una cantidad adimensional [Stewart, 2008]. El rango de salinidad para la mayor parte del agua del océano es de 34.60 a 34.80 partes por mil, o 200 partes por millón.

La distribución de la salinidad de la superficie tiende a ser zonal (figura 2.19). Los factores que juegan un papel muy importante para los cambios de salinidad son las corrientes de ríos de agua dulce, la evaporación y la precipitación. El agua más salada se encuentra en latitudes medias donde la evaporación es alta. Por lo contrario, el agua menos salada se encuentra cerca del ecuador y regiones carcanas a las costas donde desembocan grandes ríos así como en zonas polares donde al ocurrir derretimiento de casquetes disminuye la

concentración de sal. La zona de rápido aumento de salinidad se conoce como haloclina, en la figura 2.20 se observa la curva de salinidad respecto a la profundidad, la haloclina se encuentra en los 65 m de profundidad aproximadamente, estos datos corresponden a un CTD que recabó datos durante la campaña M67-2a.

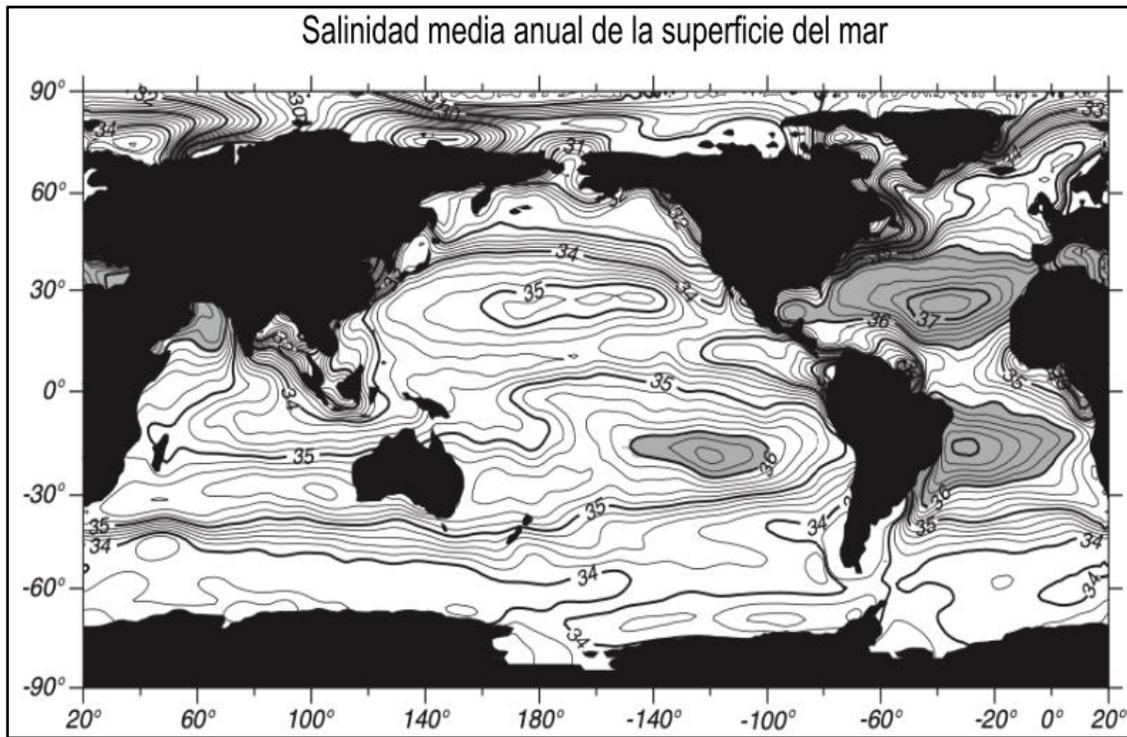


Figura 2.19. Salinidad promedio en la superficie del mar con intervalos de 0.25, las zonas sombreadas sobrepasan una salinidad de 36 [Stewart, 2008].

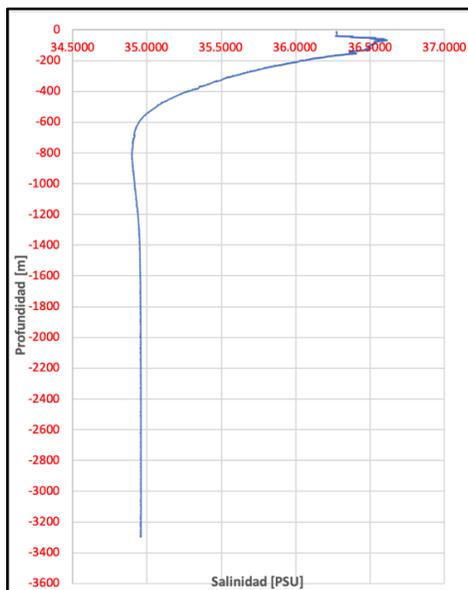


Figura 2.20. Curva de salinidad con datos de CTD de la campaña M67-2a.

La temperatura varía esencialmente por la penetración de la energía solar en la columna de agua, otros fenómenos que pueden alterar la temperatura de manera local son los fenómenos geotérmicos, las corrientes marinas y las mareas. La distribución de la temperatura en la superficie del mar es independiente de la longitud, cerca del Ecuador la temperatura es mayor y en los polos es menor (figura 2.21). Las anomalías de la temperatura de la superficie del mar tienen, en promedio, desviaciones menores a 1.5°C. A medida que aumenta la profundidad disminuye la temperatura después de los 1000m se estabiliza a 4°C aproximadamente.

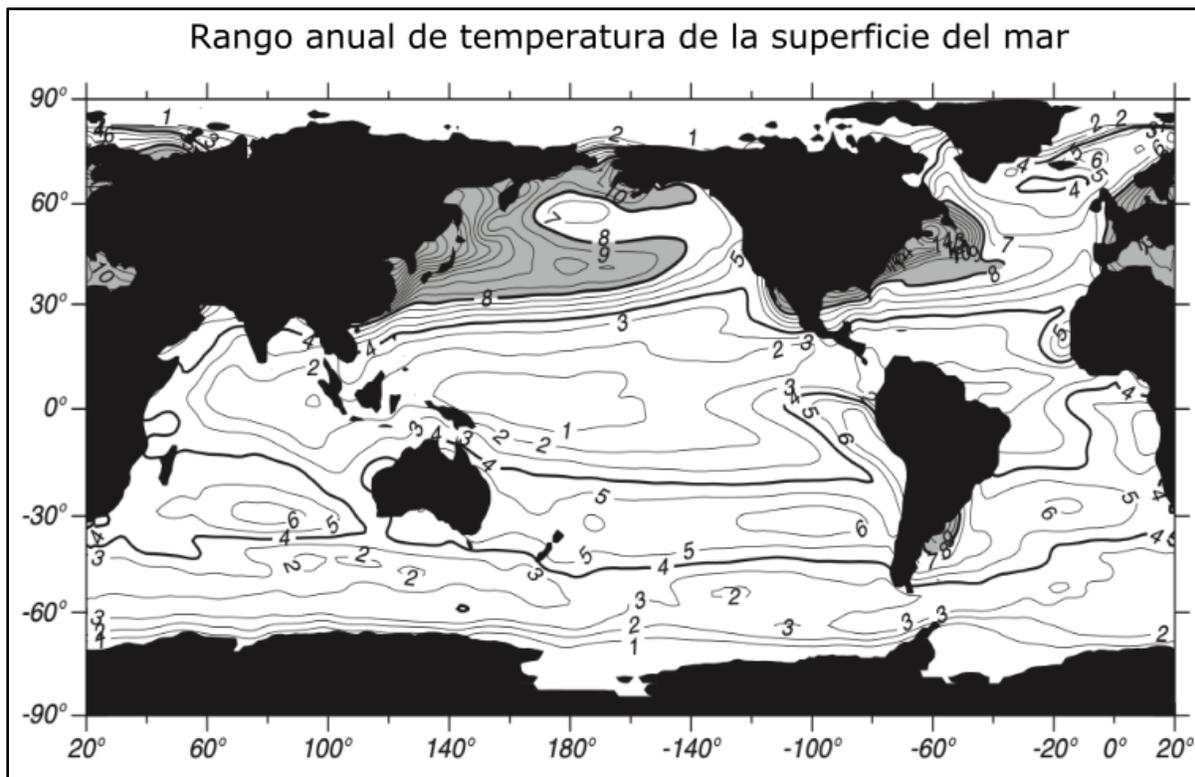


Figura 2.21. Rango anual de temperatura de la superficie del mar. Cada intervalo de contorno representa 1°C, los contornos gruesos representan 4°C y 8°C. Las áreas sombreadas representan temperaturas mayores a 8°C [Stewart, 2008].

En la superficie del océano se crea una capa mezclada debida al viento, en la mayoría de las corrientes tropicales y latitudes medias tiene un espesor de 10 a 200 m pero puede llegar a los 500 m, en esta capa la temperatura y la salinidad varían de manera mínima dependiendo de la estacionalidad.

Por debajo de la capa mixta, la temperatura del agua disminuye rápidamente con la profundidad, excepto en latitudes altas. La termoclina es donde el gradiente de temperatura

es considerablemente alto, se encuentra a profundidades de entre 50 m y 1500 m y su forma varía ligeramente con las estaciones. Asociado con la termoclina, se presenta un gradiente de densidad, donde este gradiente es mayor se le conoce como picnoclina.

La figura 2.22 presenta las curvas de temperatura y densidad respecto a la profundidad, del lado izquierdo se encuentran el perfil de temperatura *in situ* t y temperatura potencial θ (la cual se calcula adiabáticamente y a partir de la temperatura *in situ*). Del lado derecho se observa el perfil de anomalía densidad (σ_t) la cual se calcula considerando una presión atmosférica, y el perfil de densidad potencial (σ_θ) que representa la densidad medida adiabáticamente de una muestra de agua sin considerar cambios en la salinidad [Stewart, 2008].

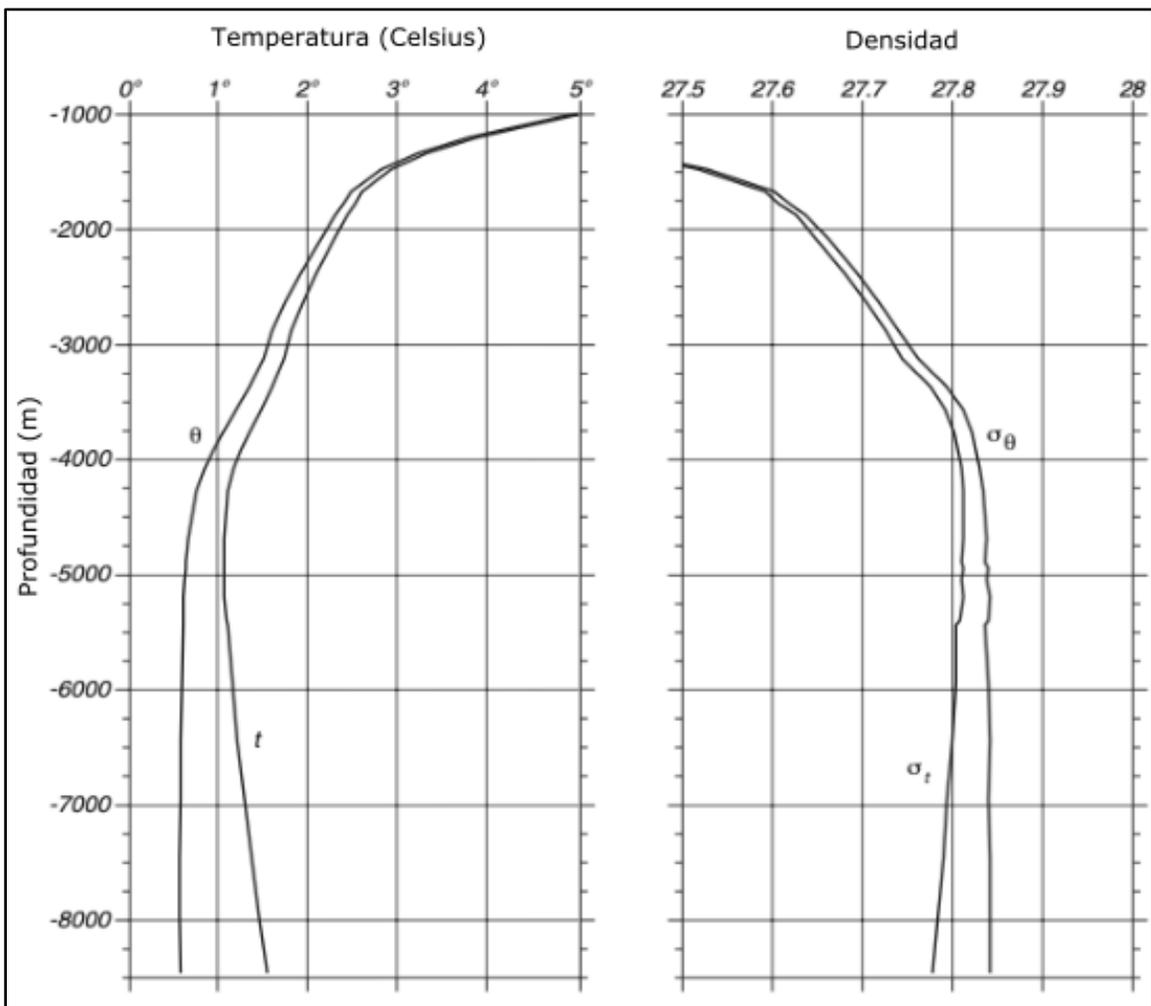


Figura 2.22. Curvas de temperatura y densidad respecto a la profundidad. Izquierda: Perfiles de temperatura (t) y potencial (θ). Derecha: Perfiles de anomalía de densidad (σ_t) y densidad potencial (σ_θ) [Stewart, 2008].

La presión incrementa de manera lineal conforme incrementa la profundidad, en la figura 2.23 se observan datos de presión respecto a la profundidad tomados con un CTD durante la campaña M67-2a. El valor máximo de presión es de 3342 db y se encuentra a una profundidad de 3331 m.

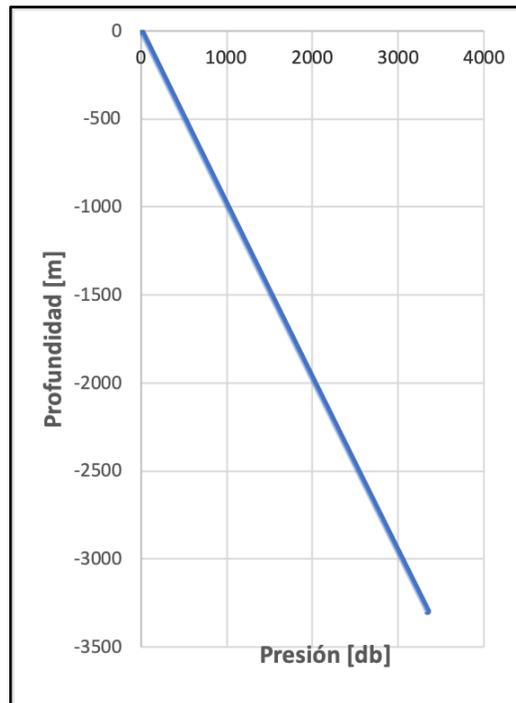


Figura 2.23. Curva de presión respecto a la profundidad con datos de CTD de la campaña M67-2a.

2.9.3. Distribución de velocidad

El océano abierto puede considerarse un medio estratificado cuyas características varían con la profundidad y no presentan cambios significativos en dirección horizontal. La velocidad del sonido es función de la temperatura, salinidad y presión, se puede calcular mediante la ecuación de Mackenzie (MacKenzie, 1981; Munk *et al.*, 1995).

La velocidad varía entre 1400 m/s y 1600 m/s, los principales factores que afectan su distribución vertical son la temperatura y profundidad. En la figura 2.24 se muestra la distribución vertical de la salinidad y temperatura así como el comportamiento típico de la velocidad del sonido. Se observa que la velocidad acústica tiene un mínimo alrededor de los 1000 m, este valor mínimo determina el eje del canal acústico el cual puede encontrarse entre 50 m y hasta 1200 m dependiendo del área geográfica. Cuando la temperatura y la salinidad

son constantes, la velocidad del sonido aumenta únicamente por efecto del incremento en la presión hidrostática.

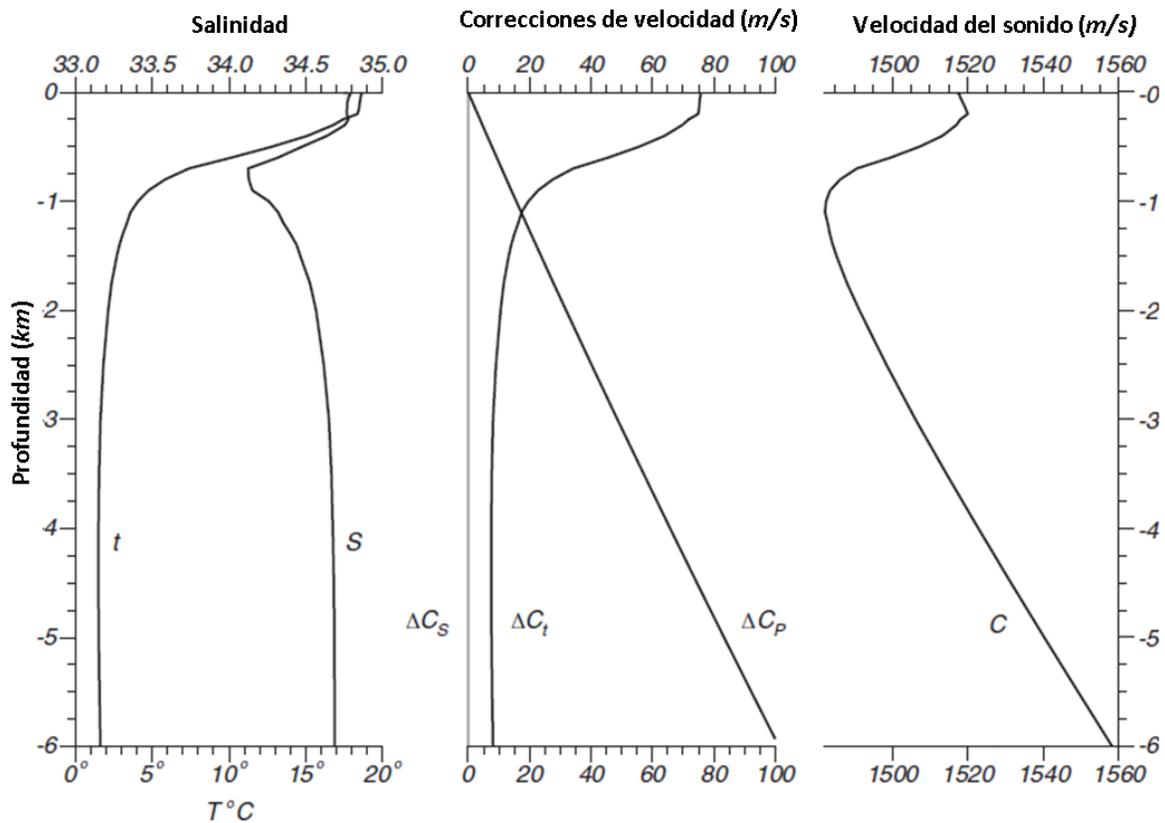


Figura 2.24. Distribución de la velocidad del sonido en función de de la tempertura, salinidad y profundidad. Izquierda: Temperatura (T) y salinidad (S) en función de la profundidad. Centro: Variación de la velocidad del sonido en función de los cambios de temperatura, salinidad y profundidad. Derecha: Perfil de velocidad del sonido en la columna de agua. [modificada de Stewart, 2008].

2.9.4. Refracción del sonido

El fenómeno de refracción consiste en una alteración de la dirección de propagación de la onda acústica debido a un cambio en la velocidad del medio. Recordando que el océano se considera un medio estratificado se presenta curvatura en la trayectoria de la onda acústica que es función de la diferencia de velocidad del sonido (índice de refracción) entre cada capa que atraviesa.

Empleando la Ley de Snell se consideran dos medios con velocidades diferentes, c_1 y c_2 , si c_1 es mayor que c_2 , la dirección de propagación de la onda acústica es modificada y el ángulo de transmisión será menor que el ángulo de incidencia; por otro lado, si c_1 es menor que c_2 , el ángulo de transmisión será mayor que el ángulo de incidencia y la dirección de

propagación de la onda acústica es alterada. Es decir, si la velocidad aumenta de un medio a otro, el ángulo incrementa, y si la velocidad disminuye, el ángulo se reduce. La trayectoria del rayo se puede obtener con la relación del seno del ángulo y la velocidad del medio (figura 2.25).

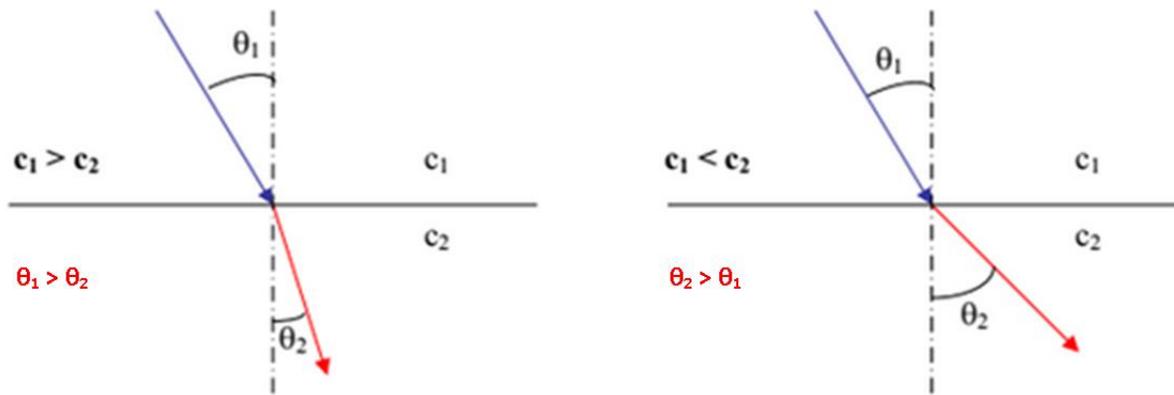


Figura 2.25. Ley de Snell para refracción [modificada de OHI, 2005].

2.9.5. Retrodispersión acústica

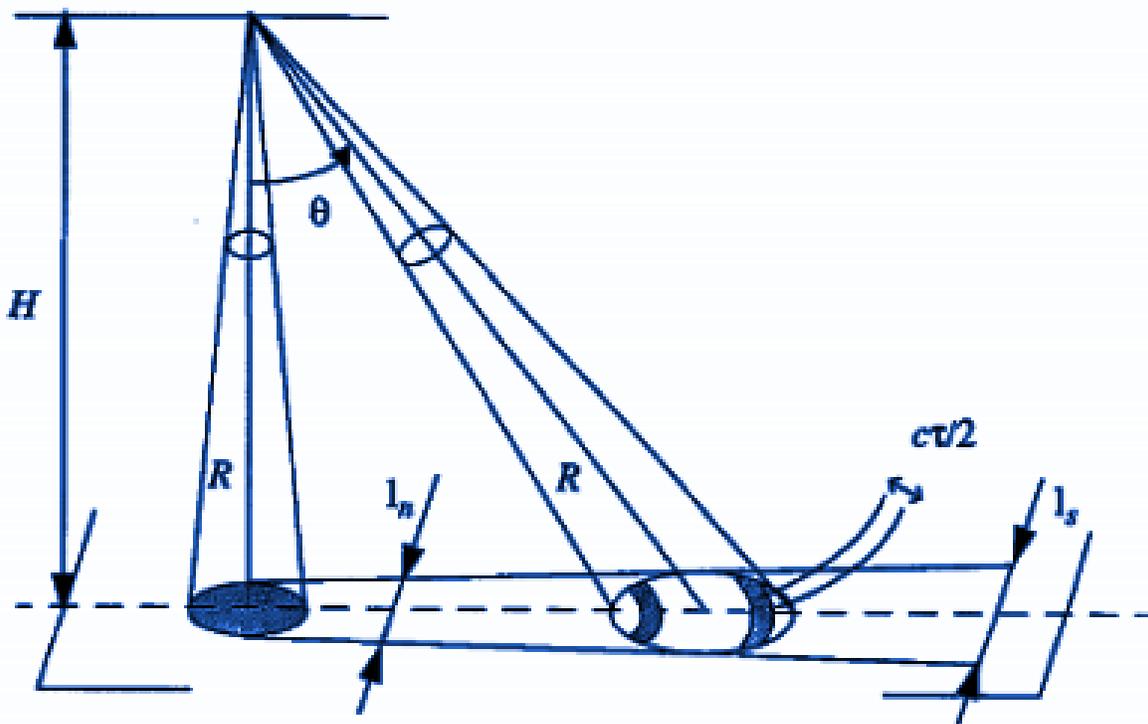
La propagación de un frente de onda acústico implica distintos fenómenos al interactuar con el lecho marino. Gran parte la energía se refleja siguiendo la ley de Snell, otra se transmite en el segundo medio (fondo marino), y una más se dispersa por interacción con la superficie o material dentro de los primeros centímetros del sedimento. La retrodispersión acústica es el fenómeno en el cual parte de la energía acústica emitida principalmente dispersada vuelve por el mismo trayecto de propagación.

Con el análisis de la retrodispersión acústica también conocido como *Backscatter*, se pueden distinguir sedimentos en términos cualitativos ya que en la señal se reflejan cambios ocasionados tanto a la rugosidad del fondo marino como a variaciones en su composición.

El fenómeno de retrodispersión acústica es función del ángulo de incidencia local para el área ensonificada, la longitud de onda acústica y las propiedades del lecho marino. La contribución de cada una de estas propiedades al campo retrodispersado dependen, a su vez, del ángulo de incidencia y de la longitud de onda acústica [de Moustier, 1992].

Área ensonificada

Si se considera que el fondo marino es plano, el área vista por la ecosonda dependerá principalmente de la longitud del pulso, la geometría y la dirección de los haces (figura 2.26). La onda esférica ilumina inicialmente debajo del buque y progresivamente en dirección transversal.



H : Profundidad

θ : ángulo del haz

c : velocidad del sonido

τ : longitud del pulso

l_n : Longitud de la huella en el nadir

l_s : Longitud de la huella para haces externos

Figura 2.26. Señal recibida por un haz [Modificada de Augustin, 1995].

El área entonces se puede distinguir de dos maneras: la primera es alrededor de la incidencia vertical donde la longitud del pulso es suficiente para iluminar la intersección del patrón del haz con un plano:

$$A = \theta_t \theta_R R^2 / \cos \theta \quad \text{ec. (6)}$$

Por lo contrario, en el segundo caso, la longitud del pulso es demasiado corto para abarcar toda la huella acústica al mismo tiempo entonces se tiene un área en “corrimiento” que será delimitada por el ancho de del haz del transmisor y la longitud del pulso τ .

$$A \sim c\tau\theta_t R/2 \sin \theta \quad \text{ec. (7)}$$

donde θ_t y θ_R son los anchos de haz transmisión y receptor respectivamente, R es el rango en metros, θ es el ángulo de incidencia, c es la velocidad del sonido y τ es la longitud del pulso.

La intensidad de retrodispersión (*backscattering strength*) se define como la relación entre la intensidad de onda retrodispersada y la intensidad de la onda incidente, la onda incidente se considera plana, y la onda dispersada es esférica desde el área sondeada; la intensidad de este último se relaciona con la intensidad de referencia, medida a la distancia convencional de 1 m del objetivo [Urlick, 1983].

La intensidad de retrodispersión varía en función del ángulo de incidencia del pulso acústico. La expresión general está dada en dBm-2 y es:

$$BS = 10 \log \left(\frac{I_i}{I_s(R=1m)} \right) \quad \text{ec. (8)}$$

Prácticamente el modelo puede aproximarse (siempre que el ángulo de incidencia no sea demasiado grande) por:

$$BS_V = BS_0 + 10 \log (\cos \theta) \quad \text{ec. (9)}$$

Donde BS_0 es una constante dependiente del tipo de fondo marino.

La propagación de una onda desde la fuente corresponde a la difusión de la energía emitida en una superficie en crecimiento, por lo que la disminución de la intensidad de la señal es proporcional también a la superficie. En un medio homogéneo, la pérdida entre dos puntos separados por una distancia R es como resultado $\frac{1}{R^2}$, o en notación logarítmica $-20 \log R$.

Los efectos geométricos y las pérdidas de propagación se corrigen sistemáticamente mediante el proceso interno del sistema de sonar (asumiendo: dispersión esférica y fondo

horizontal plano) para obtener medidas de intensidad de retrodispersión que no dependen de la profundidad del agua [Augustin, 1995].

La figura 2.27 muestra una curva típica de intensidad de retrodispersión (inferior) y el comportamiento de las contribuciones superficiales y de volumen (superior), en función del ángulo de incidencia. Parte de la energía acústica incidente se retrodispersará en la interfaz del fondo marino debido a la rugosidad local y el contraste de impedancia, mientras que una segunda parte penetrará dentro del sedimento y será retrodispersada por heterogeneidades o anomalías enterradas o capas sedimentarias [Augustin, 1995].

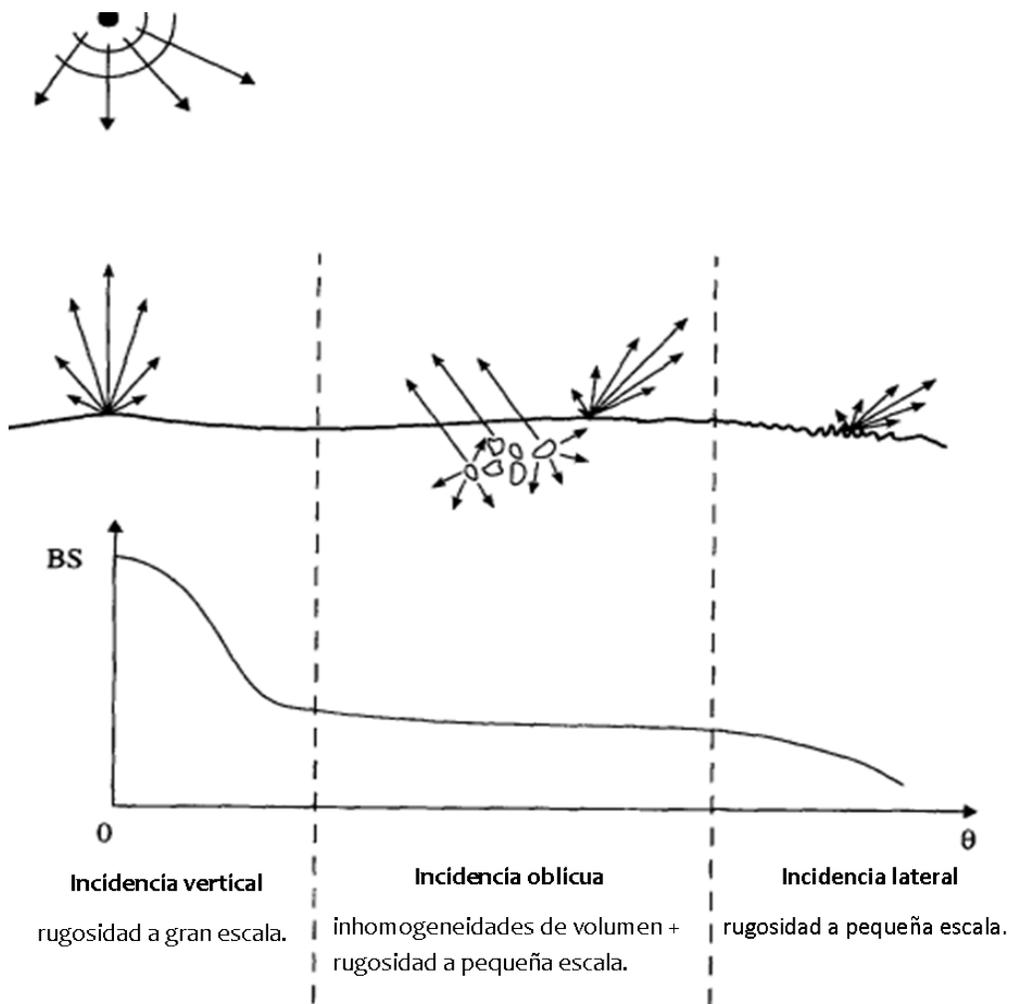


Figura 2.27. Fuerza de retrodispersión para incidencia vertical y lateral [Modificada de Augustin, 1995].

El análisis que se realiza es estadístico con un conjunto de muestras que representan porciones esonificadas por cada ping. Las estadísticas del campo sonoro retrodispersado y las características del fondo marino se pueden relacionar mediante dos enfoques teóricos: el

primero consiste en incorporar las estadísticas de la superficie a la formulación de Helmholtz-kirchhoff (de la teoría de dispersión, generalmente un proceso Gaussiano); el segundo enfoque describe la superficie rugosa como una distribución aleatoria de dispersores independientes del tiempo, sin embargo, no existe relación entre las estadísticas de los dispersores y las de la superficie rugosa [deMoustier, 1985].

Uno de los principales usos del análisis de la fuerza de retrodispersión acústica, es desarrollar herramientas de clasificación del fondo marino que manejen funciones de dependencia angular de retrodispersión, las cuales distingan los diferentes tipos de fondo marino.

Ecuación del sonar

La ecuación del sonar es una forma sistemática de evaluar las relaciones entre la señal y ruido para los sistemas de sonar, dicha relación señal-ruido estima si la señal podrá ser detectada por la ecosonda en presencia de ruido del fondo oceánico. La ecuación toma en cuenta la potencia de la fuente (*source level*, SL), la propagación y la atenuación del sonido a medida que el pulso de sonido viaja desde el sonar hasta el objetivo, es decir, pérdida de transmisión (*transmission loss*, TL), la cantidad de sonido reflejada hacia el sonar por el objetivo (*target strength*, TS), ruido de fondo (*noise level*, NL) y características del receptor (*array gain*, AG).

Está definida como:

$$SNR = SL - 2TL + TS - (NL - AG) \quad \text{ec. (10)}$$

Donde SNR es la relación señal-ruido en dB.

La potencia de la fuente SL es la intensidad o cantidad de potencia del sonido transmitido a una distancia de 1 metro de la fuente, está dada en decibelios; la pérdida de transmisión TL es disminución de la intensidad acústica a medida que la onda se transmite bajo el agua. La pérdida de transmisión consta de dos partes, una debido a la divergencia esférica de la señal y la otra debido a la pérdida de absorción (conversión de energía sonora en térmica) en el agua; la intensidad del objetivo TS es la cantidad de sonido reflejada hacia el sonar por un objetivo, dependerá tanto de la propiedad reflectiva del fondo marino como de la extensión del fondo que contribuye a la señal.

La intensidad del eco se define entonces como:

$$\text{Intensidad del eco} = (SL - TL) \quad \text{ec. (11)}$$

Al momento en el que la onda toca el fondo u objetivo entonces se agrega la componente TS:

$$\text{Intensidad del eco} = (SL - TL) + TS \quad \text{ec. (12)}$$

A medida que la señal reflejada viaja de regreso al sonar, la intensidad de la señal se reduce de nuevo debido a la pérdida de transmisión TL. La intensidad de la señal devuelta en el receptor es entonces:

$$\text{Intensidad de la señal devuelta} = (SL - TL) + TS - TL \quad \text{ec. (13)}$$

Puede simplificarse en:

$$\text{Intensidad de la señal devuelta} = SL - 2TL + TS \quad \text{ec. (14)}$$

Se considera también el nivel de ruido NL en el receptor, como es una señal que no se desea registrar debe sustraerse. Entonces la relación entre el nivel de señal y el nivel de ruido en el receptor, llamada relación señal-ruido (SNR), es:

$$SNR = SL - 2TL + TS - NL \quad \text{ec. (15)}$$

Los receptores pueden mirar en una dirección específica y rechazar el ruido de todas las demás direcciones. El nivel de ruido efectivo se reduce luego por la ganancia de la matriz (arreglo) AG, dada en decibelios, y se aumenta la SNR:

$$SNR = SL - 2TL + TS - (NL - AG) \quad \text{ec. (16)}$$

$$\text{Potencia de la fuente } SL: 10\log \left[\frac{\text{intensidad de fuente}}{\text{intensidad de referencia}} \right]$$

Referencia: A 1m desde la fuente sobre su eje acústico.

$$\text{Pérdida de transmisión } TL: 10\log \left[\frac{\text{intensidad de la señal a 1m}}{\text{intensidad de señal en el objeto}} \right]$$

Referencia: A 1m desde la fuente y el objetivo o receptor.

$$\text{Intensidad del objetivo } TS: 10\log \left[\frac{\text{intensidad del eco a 1 m del objeto}}{\text{intensidad incidente}} \right]$$

Referencia: A 1m del centro acústico del objetivo.

$$\text{Nivel/Potencia de ruido NL: } 10 \log \left[\frac{\text{intensidad de ruido}}{\text{intensidad de referencia}} \right]$$

Referencia: En la ubicación del hidrófono

$$\text{Índice de directividad de recepción: } 10 \log \left[\frac{\text{potencia de ruido generada por un hidrófono no direccional equivalente}}{\text{potencia de ruido generada por un hidrófono real}} \right]$$

Referencia: En las terminales del hidrófono.

$$\text{Umbral de detección: } 10 \log \left[\frac{\text{señal de potencia para solo realizar una cierta función}}{\text{potencia de ruido en el hidrófono}} \right]$$

Referencia: En las terminales del hidrófono.

* La intensidad de referencia es la de una onda plana con rms de $1\mu\text{Pa}$ *

2.9.6. Campaña M67-2 a

La campaña M67-2a se realizó del 20 al 31 de marzo del 2006 a cargo de investigadores de la Universidad de Bremen a bordo del buque alemán FS Meteor, forma parte de la campaña M67 que inició en las costas de Chile y continuó hacia el sur del Golfo de México. Se realizaron los métodos geofísicos sísmica multicanal de alta resolución y sonar de barrido lateral, los cuales se combinaron con muestreo de núcleo de gravedad y observación de video del fondo marino para realizar la exploración de filtraciones de hidrocarburos a través del lecho marino.

Las investigaciones se enfocaron en las filtraciones de hidrocarburos en los domos de Campeche en el sur del Golfo de México. El principal objetivo de la expedición fue cartografiar la batimetría de los Knolls de Campeche con el fin de revelar si dichos montículos presentan potencial de ocurrencia de asfalto en su superficie. Otros objetivos de la campaña fueron: determinar las extensiones de los flujos; investigar qué hay debajo de las estructuras; determinar las circunstancias en las que se desarrollan los flujos de asfalto; evaluar la relación de los organismos quimiosintéticos con los asfaltos y otras filtraciones de hidrocarburos.

Los siguientes equipos se utilizaron durante la campaña: Ecosonda KONGSBERG EM 120 que fue utilizada para el registro de batimetría multihaz y datos de retrodispersión acústica; sonar de barrido lateral DTS-1, es un sonar de doble frecuencia que trabaja con

frecuencias centrales de 75 y 410 KHz, este equipo se utilizó para obtener imágenes de las elevaciones del lecho marino relacionadas con la tectónica salina y el flujo ascendente rico en hidrocarburos y asfaltenos; equipo sísmico multicanal de alta resolución GeoB, como fuente sísmica se utilizó una pistola de aire Soder Generator-Injector (GI) con volumen de cámara extendida; sonda de sedimentos PARASOUND; equipos TV-S y TV-MUC para observar y muestrear los sitios de filtración en el lecho marino.

El levantamiento batimétrico fue realizado con una ecosonda KONGSBERG EM120, la cual tiene una frecuencia nominal de 12 kHz con un sector angular de cobertura de hasta 150 grados y 191 haces por ping con angostura de 1 grado. La cobertura del swath alcanzable en un fondo plano normalmente alcanza hasta 5,5 veces la profundidad del agua. La tasa de ping está limitada principalmente por el tiempo de viaje de ida y vuelta en el agua, y para una profundidad de 3000 m se emite 1 ping cada 5 segundos. En el Anexo 1 se describen las características de la ecosonda EM120.

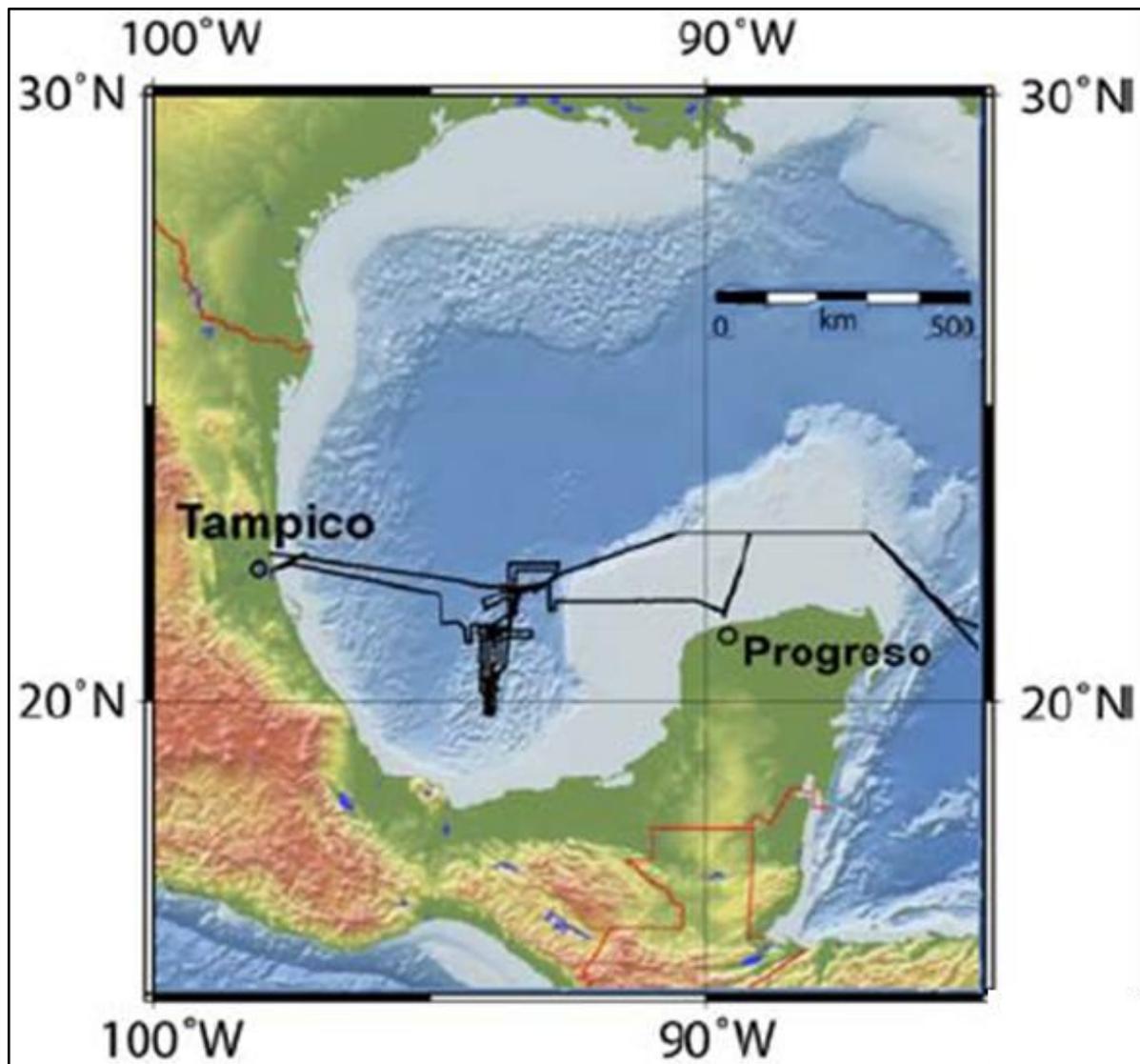


Figura 2.28. Levantamiento Campaña M67-2a [Weinrebe, W., Bohrmann, G., Spiess, V., 2010].

3. Metodología

3.1. Datos de ecosonda multihaz del crucero M67-2a

Los datos utilizados para obtener la carta batimétrica de alta resolución corresponden a las adquisiciones de los días 20 al 31 de marzo del 2006. En la figura 3.1 se presenta el total de líneas que se procesaron y se observa que las líneas de navegación de mayor longitud son las que tienen dirección N-S (entre 10 km y 142 km) y E-W (entre 10 km y 89 km). En el norte y centro del área de estudio sobresalen dos conjuntos de líneas paralelas con orientación NW-SE, el primero tiene una longitud total de 76.7 km y el segundo 118.3 km.

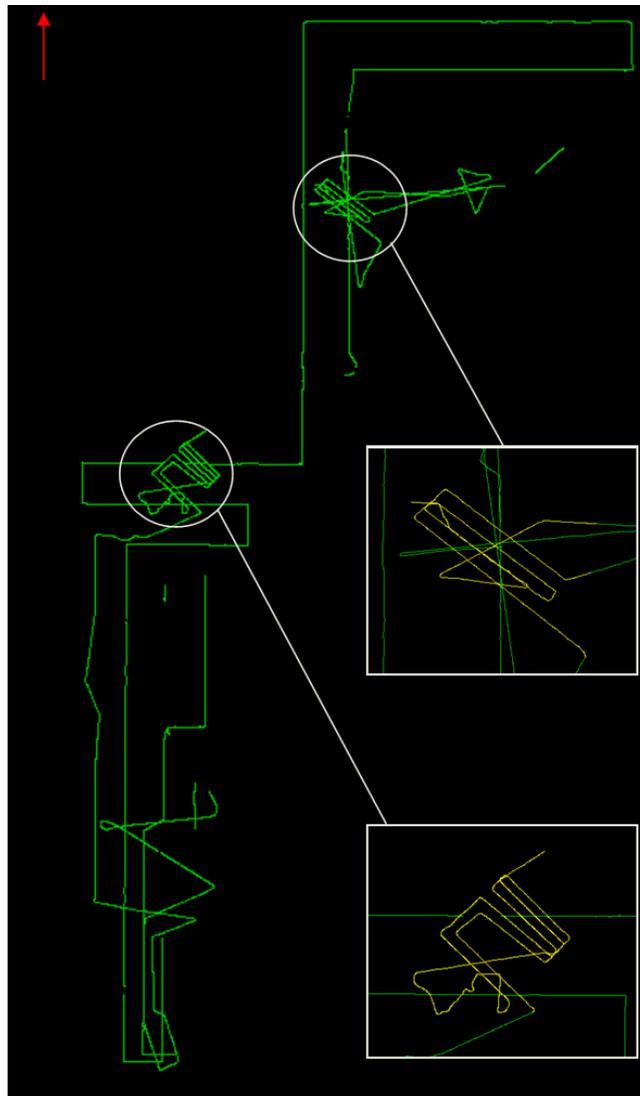


Figura 3.1. Líneas de navegación utilizadas para el procesamiento de datos batimétricos y retrodispersión acústica de la campaña M67-2a (2006), en blanco se señalan los dos conjuntos de líneas particulares.

Se realizó un análisis con el posicionamiento y tiempo de los haces (*beams*) centrales de cada *ping* obteniendo un *ping-rate* de 18 segundos y una distancia de 100 m en promedio entre cada haz, el tamaño del *swath* es de 15 km. Los criterios de discriminación consistieron en descartar datos de deriva, datos de estación y de tránsito.

3.2. Procesamiento de Datos Multihaz: Batimetría

El procesamiento de datos multihaz tiene como objetivo la generación de una carta batimétrica de alta resolución que represente el relieve marino y un mosaico de imágenes de las propiedades acústicas del fondo marino las cuales son representativas de la litología y rugosidad del lecho. La metodología empleada para el procesamiento requiere de varias etapas para llegar al objetivo, los datos de batimetría multihaz son post-procesados para corregir errores sistemáticos incluidos durante la adquisición, después es necesario realizar un filtrado para finalizar con un modelo digital del terreno.

3.2.1. Diagrama de Procesamiento de Datos en Caris

El procesamiento de datos batimétricos de alta resolución se realizó con el software Caris HIPS and SIPS 7.0. El esquema en la figura 3.2 representa el flujo de trabajo con el que se conduce el software. El anexo 3 habla sobre las etapas del flujo utilizadas para el procesamiento, sin embargo, determinados procesos requieren un análisis minucioso al momento de efectuarse, por ejemplo: la marea, corrección de la velocidad del sonido y creación de superficies base.

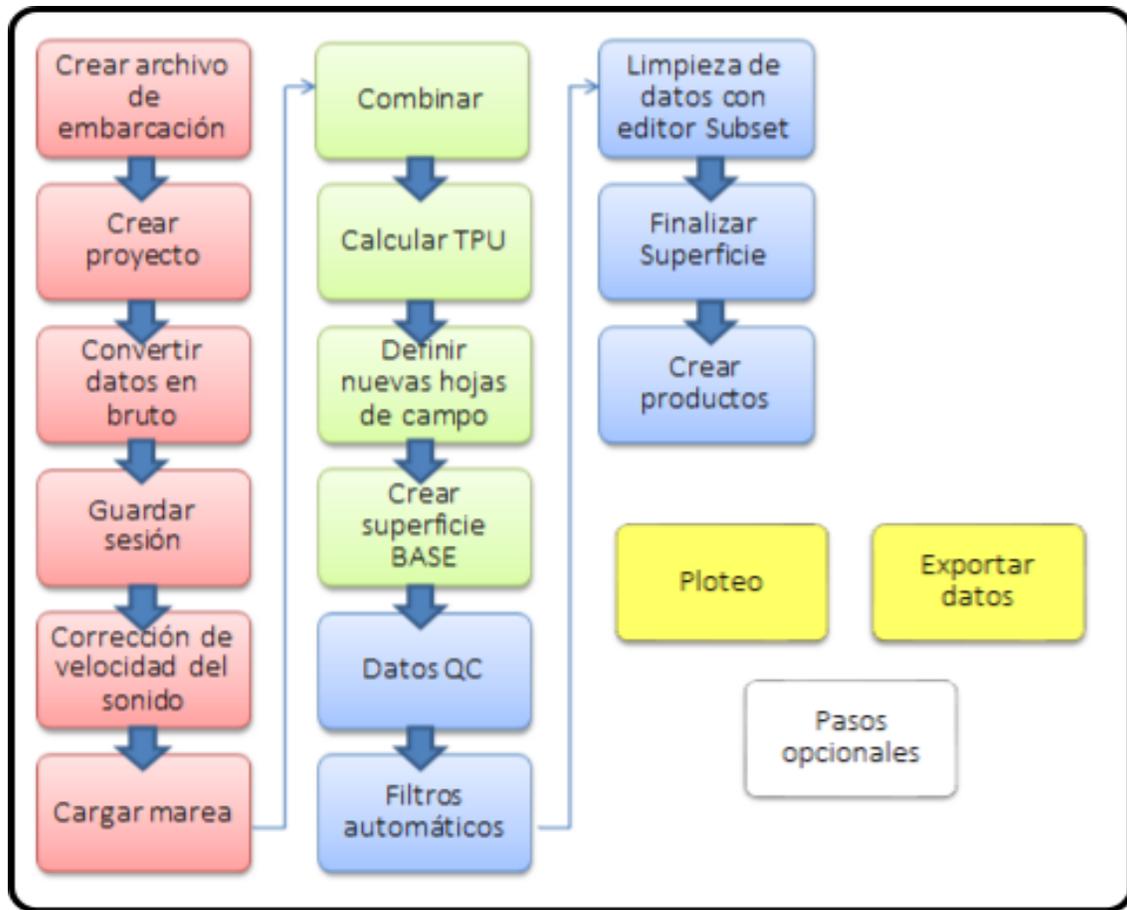


Figura 3.2. Flujo de trabajo en HIPS and SIPS para datos multihaz [Modificada de Caris Hips and Sips, 2009].

3.2.2. Efectos por Marea

Durante la adquisición de los datos se presenta el efecto de la marea que influye en los valores de profundidad calculados. Para evaluar este efecto se descargaron datos de marea correspondiente a los días de la campaña M67-2a de la base de datos validados del Servicio Mareográfico Nacional. La figura 3.3 presenta el registro de la marea medida en la estación Veracruz (19°12' N, -96°80' W) durante los días 20 al 31 de marzo del 2006, se observa que los valores no superan el metro de diferencia entre ellos durante las 24hrs del día.

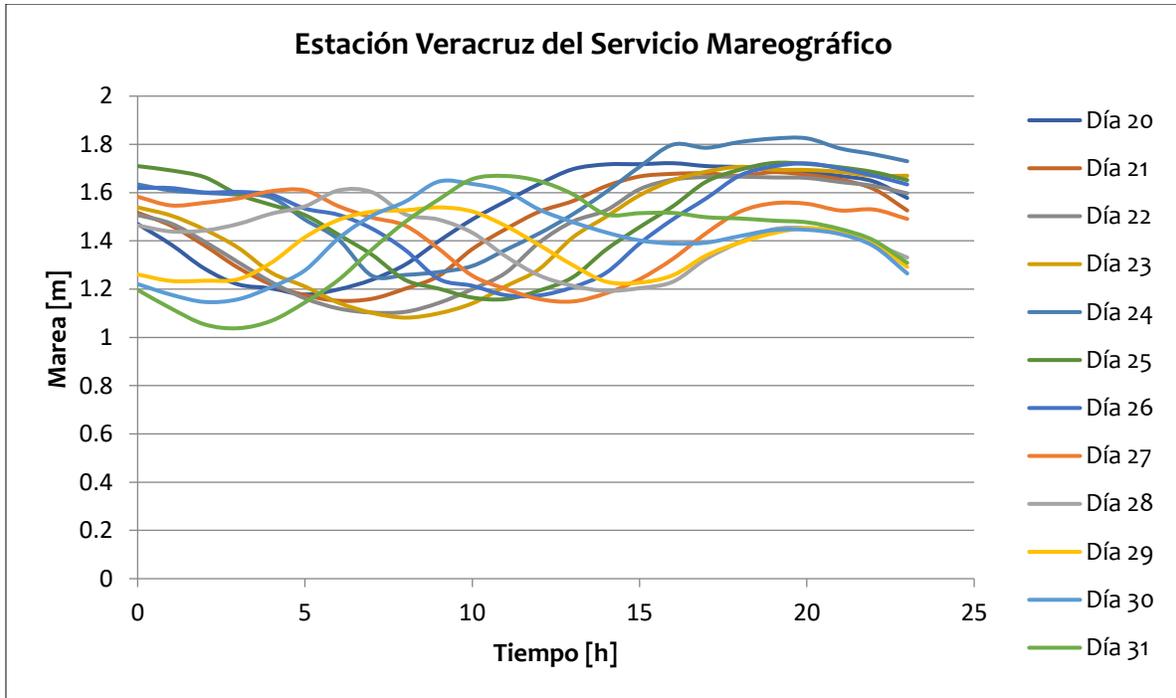


Figura 3.3. Marea registrada en la Estación Veracruz del Servicio Mareográfico Nacional durante los días 20 al 31 de marzo del 2006 [<http://www.mareografico.unam.mx/portal/index.php?page=Estaciones>].

La figura 3.4 presenta la precisión con la que opera la ecosonda EM120 de acuerdo a la profundidad y a la distancia *across-track*, se observa que para profundidades de 1,000 m a 5,000 m la precisión es de 2 m a 4 m; considerando que la marea máxima es de un metro el efecto de la marea pasa desapercibido dentro de la precisión de los sondajes. En nuestro caso se utilizó un archivo de marea cero.

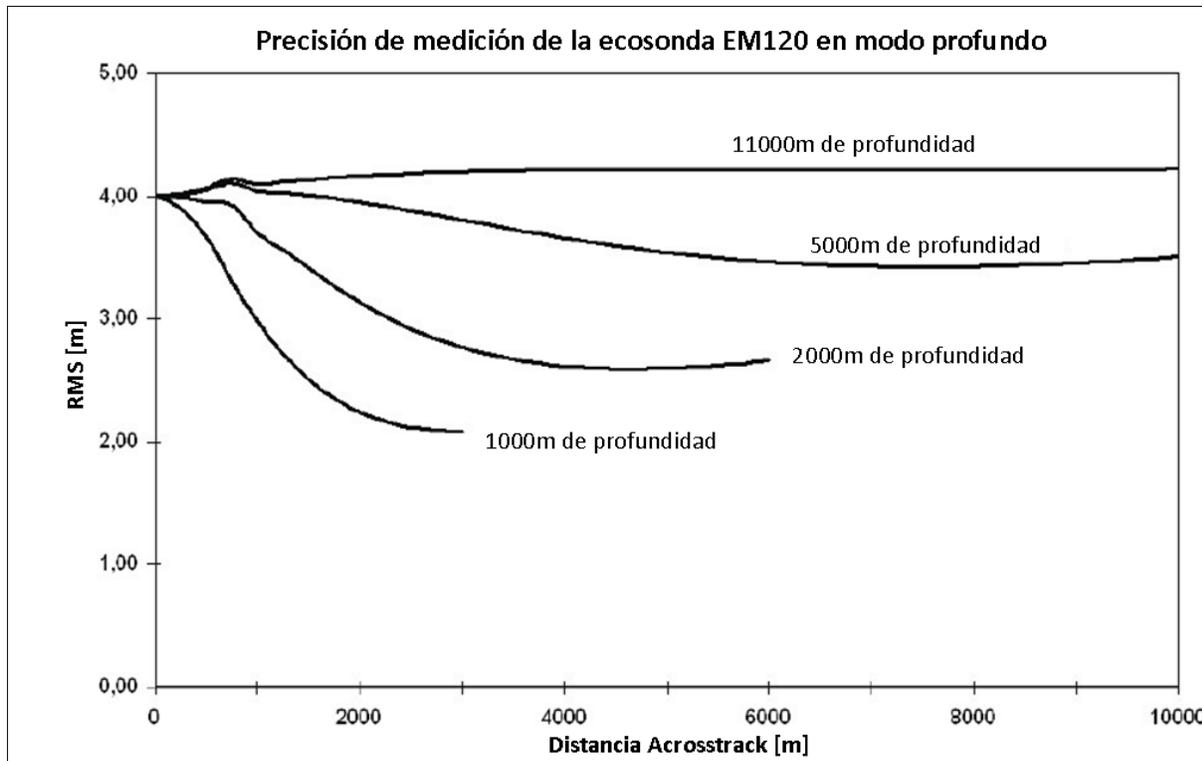


Figura 3.4. Precisión de medición de la ecosonda EM120 respecto a profundidad y distancia *across-track* en modo profundo [Modificada de Kongsberg, 2005].

3.2.3. Corrección de velocidad del sonido (SVC)

El proceso de corrección de velocidad del sonido juega un papel muy importante, pues conociendo el tiempo de viaje bidireccional y ángulo de lanzamiento se calcula la distancia recorrida y ruta de la onda sonora a través de la columna de agua para cada haz. Para llevar a cabo la corrección, se requiere contar con dos elementos:

- La configuración y posición relativa del transductor al sistema de referencia, y sus desviaciones angulares del montaje.
- La velocidad acústica de la columna de agua, la cual presenta como un perfil de velocidad acústica contra profundidad (SVP)

Tomando en cuenta el ángulo de salida/arribo del pulso acústico, el tiempo de viaje y el perfil de velocidad acústica, el proceso de corrección usa un algoritmo de trazado de rayos para calcular nuevamente la posición del eco en el lecho marino (figura 3.5).

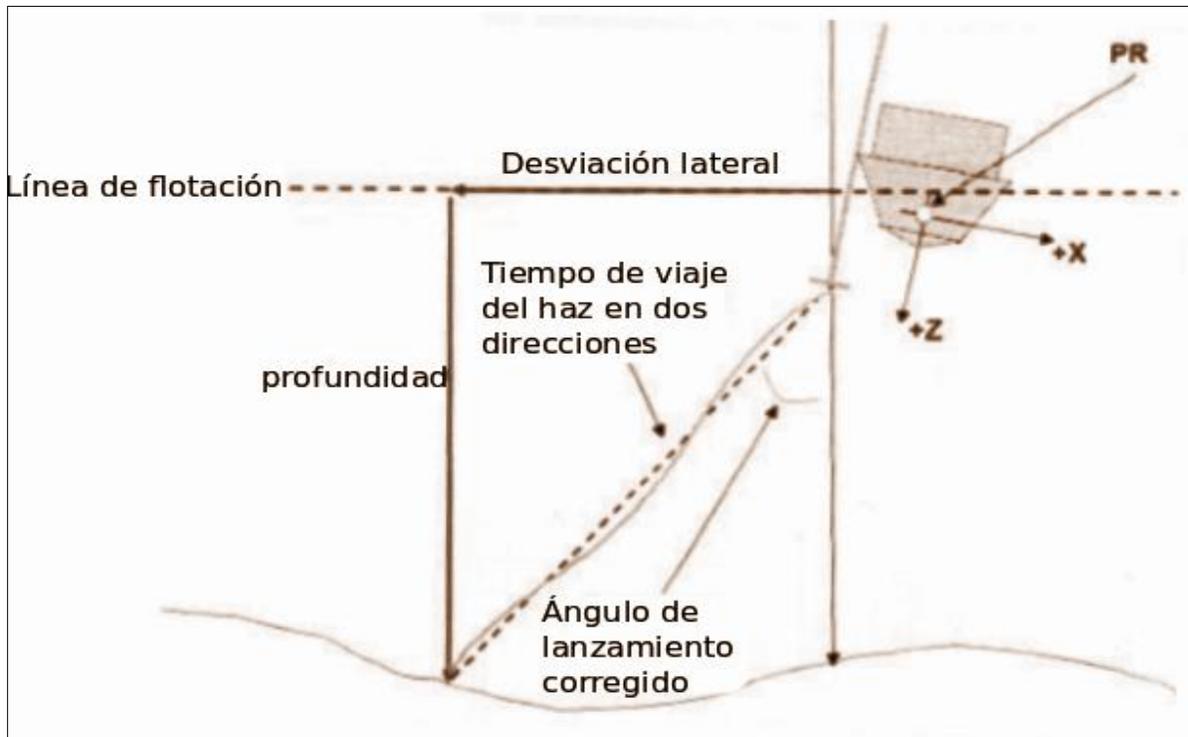
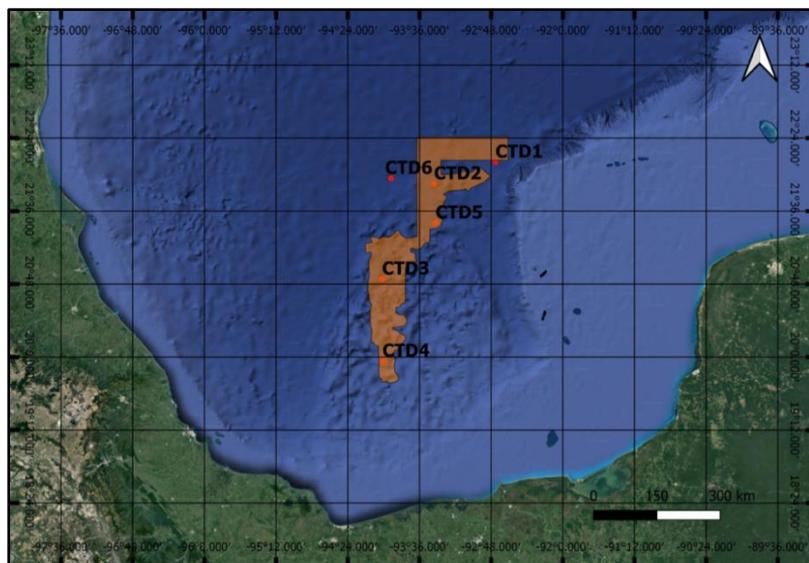


Figura 3.5. Corrección de velocidad del sonido [Modificada de Caris HIPS and SIPS, 2009].

3.2.4. Perfil de Velocidad del Sonido para Datos Multihaz

Un perfil de velocidad del sonido contiene datos sobre la velocidad acústica en la columna de agua, sirve para definir la geometría del trazado de rayos y así ubicar con precisión las posiciones del eco sobre el fondo marino.

Durante la campaña M67-2a se registraron datos de diferentes propiedades del agua (salinidad, conductividad, temperatura, presión, etc) con una sonda de conductividad, temperatura y profundidad (CTD) de la marca Sea Bird. Estos perfiles se adquirieron en seis zonas distintas del área de estudio (figura 3.6). Para cada cala de CTD se calculó la velocidad del sonido por tres fórmulas distintas: Chen-Millero, Delgrosso y Wilson. Finalmente, se eligió la velocidad calculada mediante la fórmula de Wilson.



CTD1	22°08.19" N 92°45.10" W
CTD2	21°53.96" N 93°26.27" W
CTD3	20°51.35" N 94°01.08" W
CTD4	19°57.31" N 94°00.80" W
CTD5	21°28.23" N 93°25.27" W
CTD6	21°57.55" N 93°55.03" W

Figura 3.6. Mapa con la ubicación donde fueron tomados los datos con CTD.

3.2.5. Fórmula de Wilson calcular el SVP

Se decidió utilizar la columna de valores de velocidad del sonido obtenidos mediante la fórmula de Wilson para crear el perfil ya que contempla intervalos de validez más amplios ($-4^{\circ}\text{C} < T < 30^{\circ}\text{C}$ para temperatura, $1 \text{ kg/cm}^2 < P < 1000 \text{ kg/cm}^2$ para presión, y $0^{\circ}/\text{oo} < S < 37^{\circ}/\text{oo}$) establecidos por Wilson [Wilson, 1960] en su ecuación (Ecuación 17).

$$\begin{aligned}
 VSTP = & (S - 35)(-1.1244 \times 10^{-2}T + 7.7711 \times 10^{-7}T_2 + 7.7016 \times 10^{-5}P - 1.2943 \times 10^{-7}P_2 + \\
 & 3.1580 \times 10^{-8}PT + 1.5790 \times 10^{-9}PT_2) + P(-1.8607 \times 10^{-4}T + 7.4812 \times 10^{-6}T_2 + \\
 & 4.5283 \times 10^{-8}T_3) + P_2(-2.5294 \times 10^{-7}T + 1.8563 \times 10^{-9}T_2) + P_3(-1.9646 \times 10^{-10}T)
 \end{aligned}$$

ec. (17)

Donde:

S= salinidad [ppm]

T= temperatura [°C]

P= presión [at]

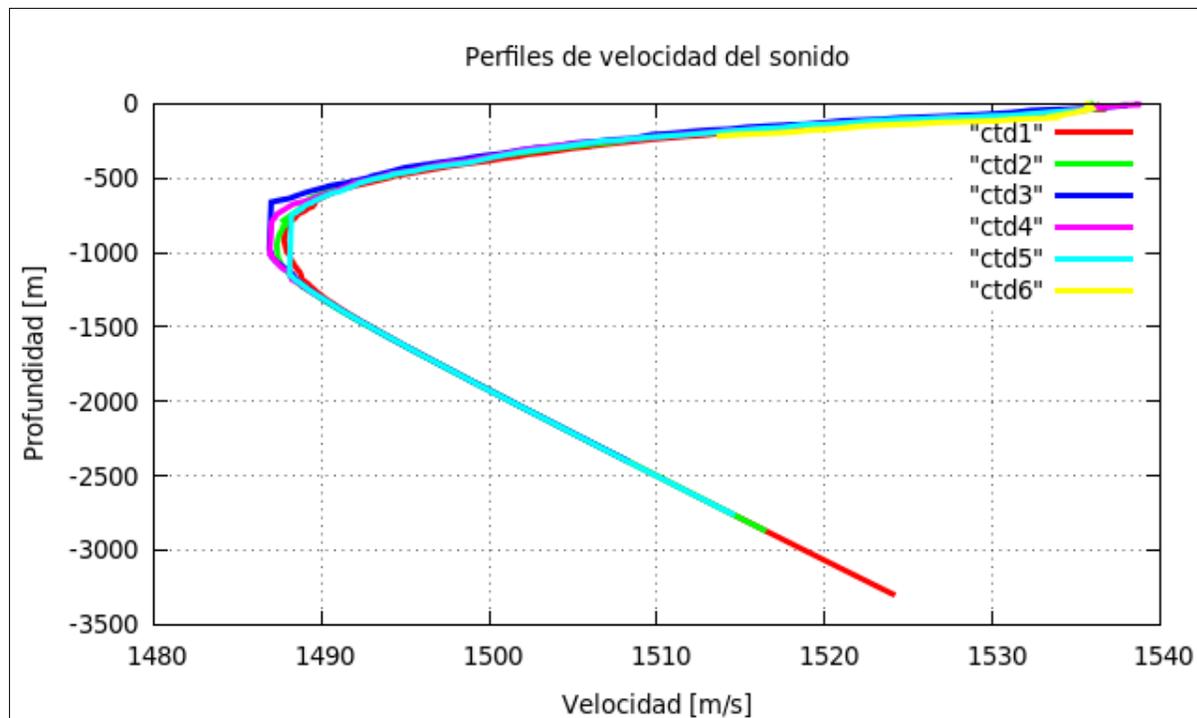


Figura 3.7. Perfiles de velocidad tomados durante la campaña M67-2a.

La figura 3.7 muestra los seis perfiles de velocidad del sonido obtenidos de las calas de CTD; se observa que sus valores no presentan gran variación para cada profundidad y muestran el mismo comportamiento en la curva de distribución de velocidad. Se decidió por ocupar el perfil: CTD1 (figura 3.8), para las correcciones de velocidad. Por la capacidad del programa de procesamiento los datos fueron filtrados y remuestreados para reducir el número de puntos de 3331 a 502. Se conservaron aquellos niveles cuyas velocidades tuvieran diferencias de 0.1, 0.09 y 0.11, y mayor que 1, respecto del anterior. Para la corrección se eligió el método Nearest in time (más cercano en tiempo) y se corrigieron los ángulos de salida para incorporar la velocidad acústica superficial, obtenida del nuevo perfil.

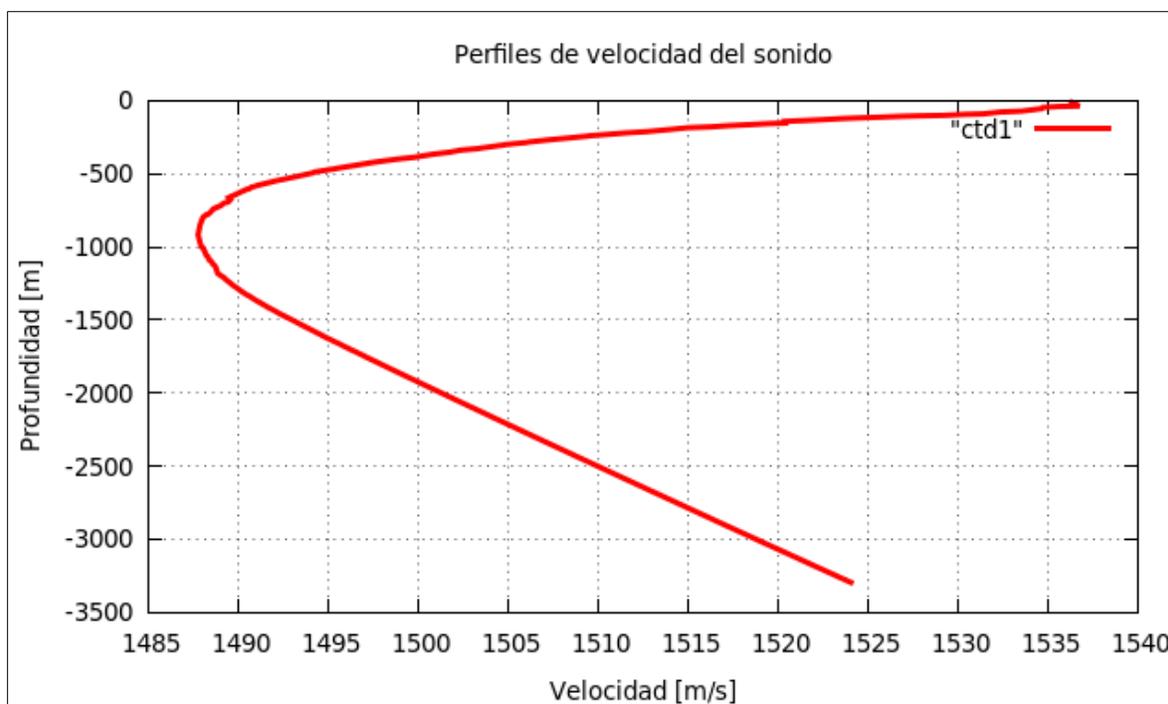


Figura 3.8. Perfil utilizado para el proceso de corrección de velocidad del sonido.

3.2.6. Creación de superficies base

Una superficie BASE (Bathymetry Associated with Statistical Error) es una imagen georeferenciada de una superficie batimétrica que puede contener otros atributos. Esta superficie puede utilizarse para distintos propósitos como: ayuda visual del lecho marino para limpiar datos, exportar datos en distintos formatos (TIFF, XYZ, archivo de texto, etc.) con el fin de importarlos a otro software y obtener otros productos, por ejemplo, un modelo digital del terreno, mapas con sondeos o contornos, construir perfiles u otras capas de datos.

En Caris se puede crear tres tipos de superficie BASE: Superficie de incertidumbre (*Uncertainty*), superficie de ángulo de barrido (*Swath angle*) y superficie CUBE (*Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator*). Para calcular la superficie BASE de los datos del crucero M67-2a se empleó el esquema de pesos por ángulo de barrido, ya que realiza una ponderación basada en el ángulo de intersección del haz con el lecho marino y la geometría actual del sistema de sonar.

Ponderación por ángulo de barrido

El peso del ángulo de incidencia asegura que se dé un mayor peso a los haces desde la parte interior del *swath* que a los haces externos, ya que a mayor distancia al transductor el error aumenta. En la figura 3.9 se muestra la función de peso contra ángulo de incidencia, los haces con un ángulo de incidencia entre 90 y 75 grados tienen un peso de 1.0. El peso disminuye linealmente a 0.01 a medida que el ángulo con el fondo del mar disminuye a 15 grados.

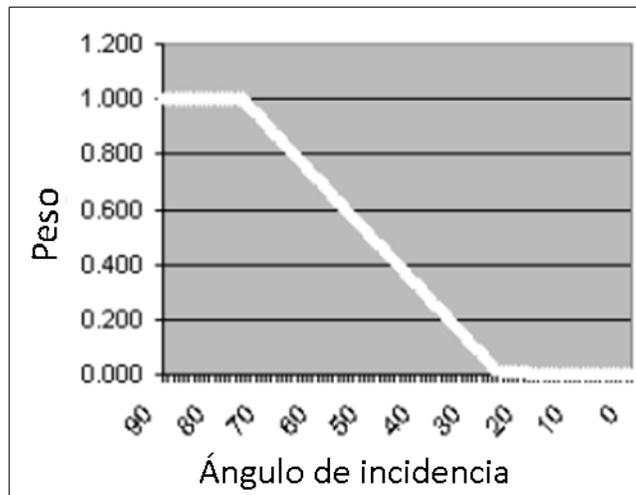


Figura 3.9. Ponderación en función del ángulo de incidencia con el lecho marino [Modificada de Caris Hips and Sips, 2009].

Ponderación de rango (Distancia)

Adicionalmente a la ponderación de ángulo de barrido CARIS implementa una segunda ponderación por distancia. La influencia de cada sondaje disminuye con la distancia desde el transductor. Esto reduce el efecto que los sondajes más alejados del transductor tendrán sobre la superficie BASE. La cantidad de nodos a los que se aplica cada sondaje depende del tamaño de la huella del haz. La huella del haz se calcula utilizando la profundidad, el ancho del haz del sonar y el ángulo de incidencia (figura 3.10).

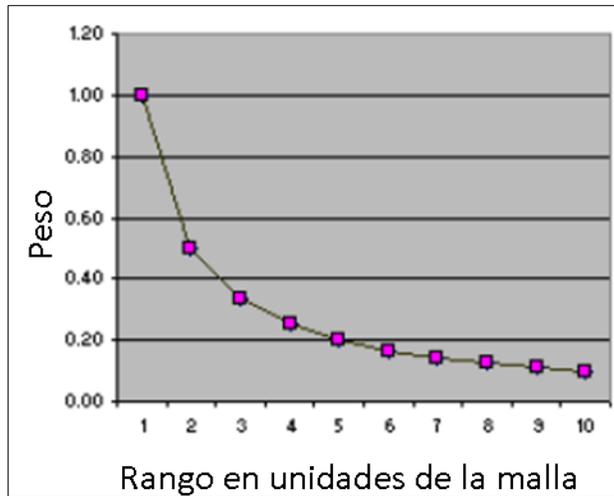


Figura 3.10. Ponderación en función de las unidades de la malla [Modificada de Caris Hips and Sips, 2009].

Resolución acústica del lecho marino

El área radiada acústicamente por cada haz aumenta con la profundidad y el ángulo de inclinación; por lo tanto, la resolución disminuye conforme aumenta la profundidad y hacia los extremos del *swath*. Cada sondeo representa un promedio acústico de la porción del lecho marino que queda dentro del área ensonificada. La resolución espacial es limitada principalmente al tamaño de la huella acústica del haz en el lecho marino [Ponce, 2009].

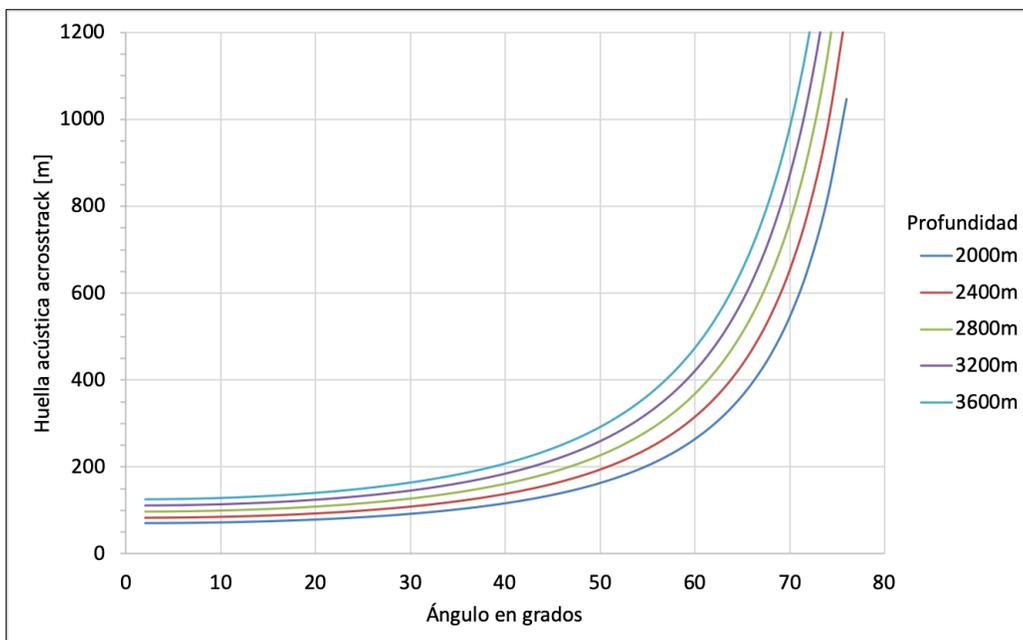


Figura 3.11. Gráfico del análisis de la huella acústica en relación al ángulo y a la profundidad.

Con base en este análisis se determinó que un tamaño de celda adecuado es de 200 m ya que refleja el área ensonificada, el tamaño del *swath* y el intervalo entre *swaths*. La figura 3.11 muestra la relación entre el tamaño de la huella acústica y el ángulo de apertura para la transmisión de haces. Se observa que para distintas profundidades la mayor concentración de información se encuentra por debajo de 200 m para ángulos menores a 40 grados. La figura 3.12 muestra la superficie BASE con los datos batimétricos que han sido recalculados con un nuevo perfil de velocidad acústica.

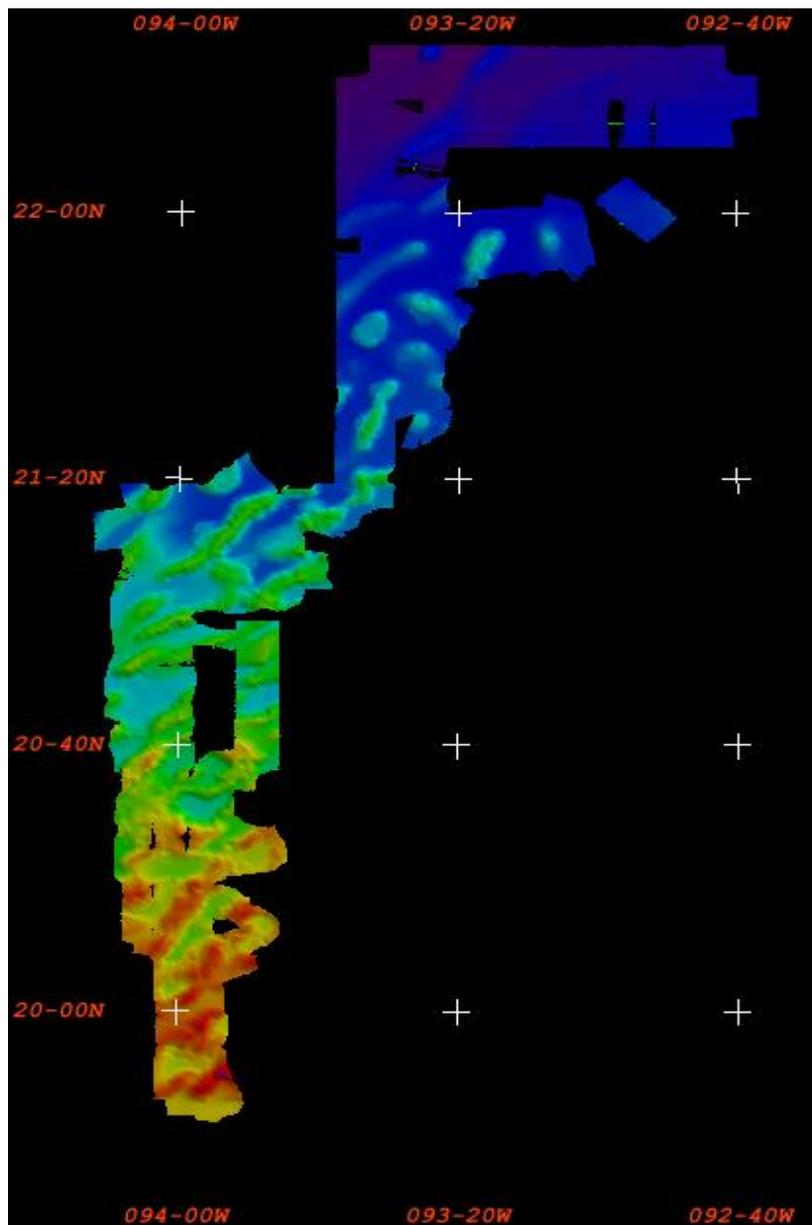


Figura 3.12. Superficie BASE creada con una resolución de 200 m.

3.2.7. Limpieza de datos

La limpieza se llevó a cabo con las herramientas *Subset Editor* y eventualmente *Swath Editor*, se utilizó la superficie BASE como guía para descartar sondajes fuera del patrón de relieve. Fue un proceso manual que permitió observar los datos por secciones de forma práctica, una opción del editor *Subset* es la vista 3D que expone con facilidad los datos erróneos que no coinciden con la tendencia de la morfología (figura 3.13). Este procedimiento es ampliamente usado en las oficinas hidrográficas. Se descartó un algoritmo automático por la presencia del relieve, ya que podría descartar las pendientes abruptas por su alta variabilidad. En el anexo 4 se explica con más detalle las herramientas utilizadas.

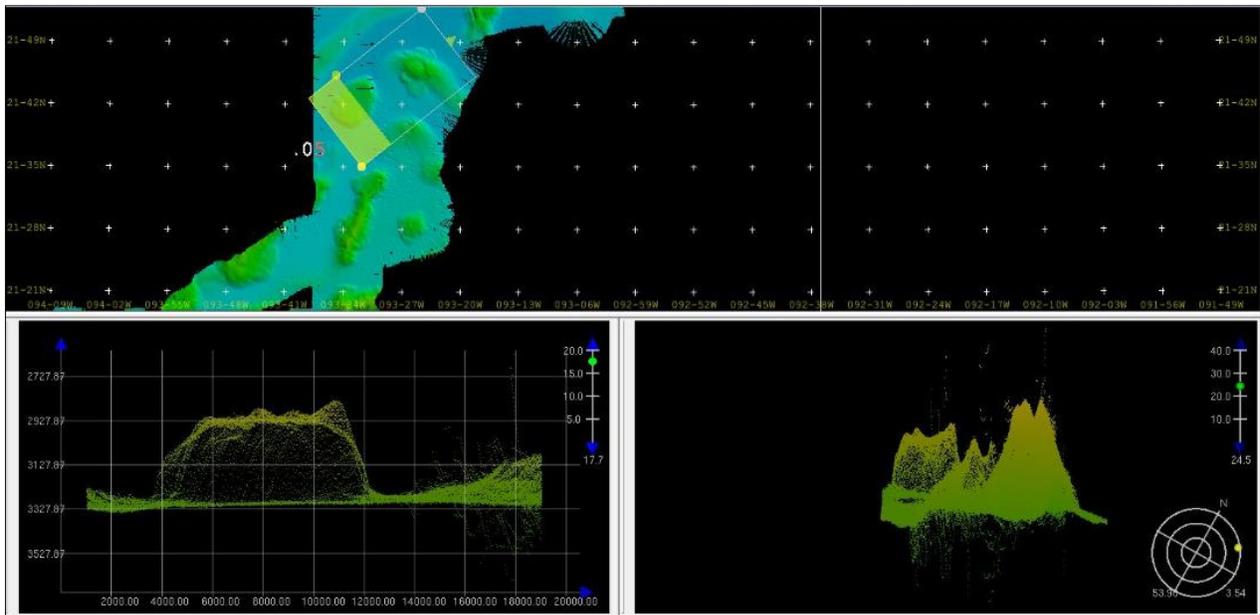


Figura 3.13. Ventanas de la herramienta *Subset Editor* en software *Caris*. En la parte superior se observa sobre la superficie *BASE* la sección enmarcada en blanco para la limpiarse, en la parte inferior izquierda se observa la vista 2D del área sombreada en amarillo, y en la parte inferior derecha se ubica la vista 3D de la sección completa.

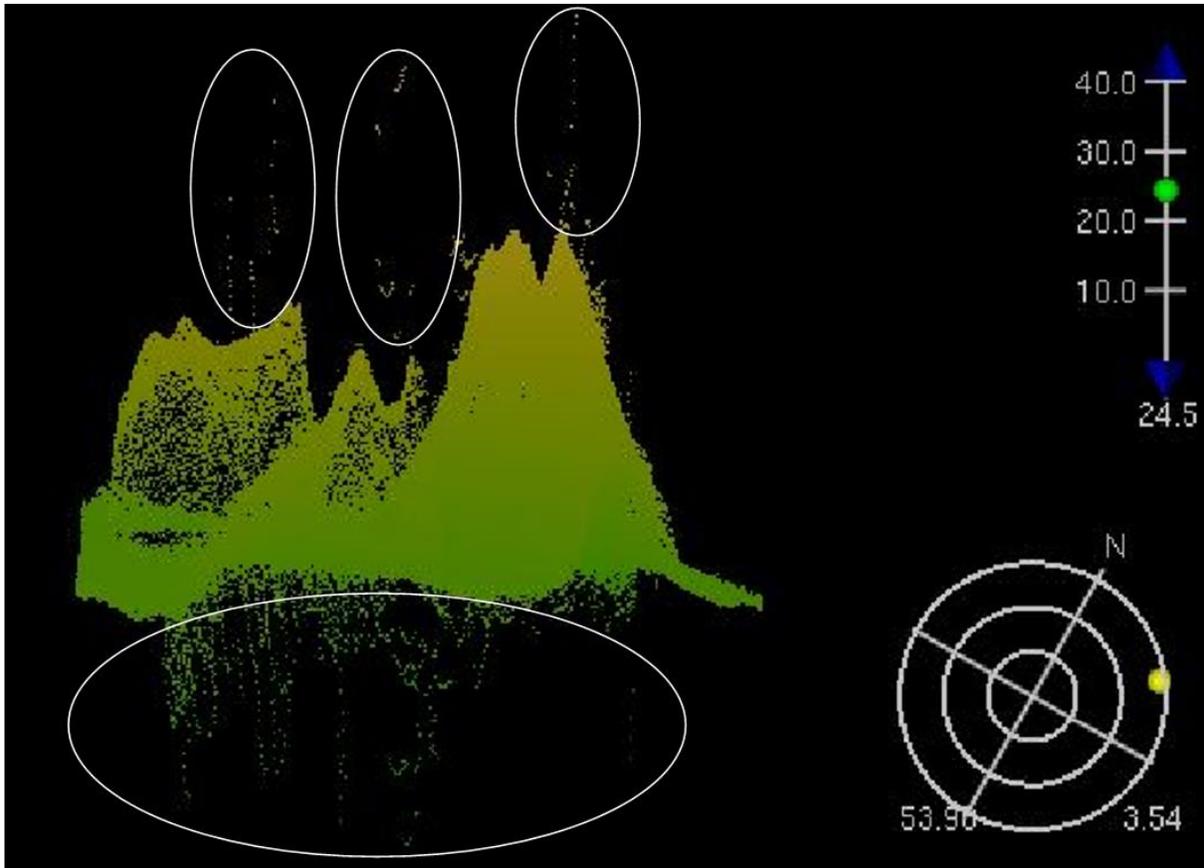


Figura 3.14. Ejemplo de la vista 3D del editor Subset en el cual se señalan con elipses los datos que se descartaron durante la limpieza.

3.3. Procesamiento de Datos Multihaz: Datos de Retrodispersión Acústica

La retrodispersión acústica devuelta a un sonar multihaz es el resultado de una interacción compleja del frente de onda acústico con un fondo marino a menudo áspero e inhomogéneo. El frente de onda intersecta el fondo marino en un ángulo, y está sujeto a dispersión, lo que redistribuye la energía acústica incidente en múltiples direcciones. La energía devuelta al transductor contiene información importante sobre la morfología y las propiedades físicas del fondo marino, que a su vez proporciona información útil que ayuda a la caracterización del fondo marino [Fonseca, 2007].

El procesamiento requerido para creación de mosaicos de *backscatter* consiste en corregir radiométricamente las intensidades de retrodispersión registradas, corregir geométricamente, posicionar cada muestra acústica en un sistema de coordenadas de

proyección e interpolar adecuadamente los valores de intensidad en un mapa de retrodispersión final [Fonseca, 2005].

Para el procesamiento de los datos de *Backscatter* se utilizó la herramienta *Mosaic Editor* en Caris, en el cual se crean, editan y analizan los mosaicos que contienen la información de intensidad de retrodispersión. En la figura 3.15 se muestra el flujo de trabajo para la obtención del mosaico de propiedades acústicas.

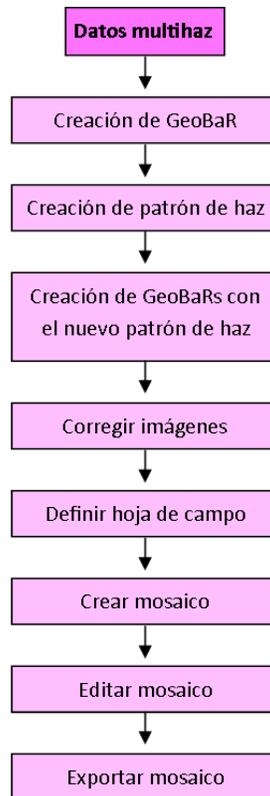


Figura 3.15. Flujo de trabajo para crear mosaicos en Caris 7.0.

Los datos de *backscatter*, para ser procesados, se almacenan en un formato de *Georeferenced Backscatter Raster* (*Raster* de Retrodispersión Georeferenciado o referido como GeoBaR). Varios GeoBaRs pueden unirse para crear un mosaico; éste puede examinarse y editarse. Una vez que se han corregido las imágenes, estas son compiladas en un mosaico de imágenes.

Cada muestra de retrodispersión sin procesar se corrige para eliminar las ganancias de adquisición variables, los niveles de potencia y el ancho de pulso, de acuerdo a las especificaciones del fabricante. La intensidad de retrodispersión se calcula por unidad de

área y por unidad de ángulo sólido, por lo que el tamaño de la huella del haz es indispensable para una reducción geométrica adecuada. La geometría se simplifica al asumir un fondo plano, lo que a su vez permite reducir la dependencia angular de la retrodispersión por medio de la Ley de Lambert aplicada normalmente durante la adquisición.

3.3.1. Creación de GeoBaRs

En Caris el editor de mosaicos tiene dos motores de procesamiento: Geocoder Engine y SIPS Engine. En nuestro caso se utilizó el motor Geocoder, pues su enfoque es mayor en el procesamiento de datos multihaz de retrodispersión, mientras que el motor SIPS Engine cuenta con mayores ventajas al procesar datos de escaneo lateral (*side scan data*).

Los ecosondas multihaz registran la retrodispersión acústica de tres maneras diferentes: a) medición de la intensidad de retrodispersión promedio para cada haz; b) registro de una serie de tiempo de la intensidad de retrodispersión alrededor del punto de detección de cada haz recibido; c) registro de dos series de tiempo largas de la intensidad de retrodispersión (una de estribor y otra de babor) por cada ping recibido.

La herramienta Geocoder acepta cualquiera de las tres diferentes fuentes de registro, y el proceso lo inicia con los datos originales. El algoritmo que utiliza corrige y posiciona geoméricamente cada muestra acústica en un mosaico de retrodispersión final en un sistema de coordenadas de proyección bien definido.

Los GeoBaR se crean usando las opciones seleccionadas en la pestaña Proceso. Hay diferentes opciones disponibles, de acuerdo al motor de procesamiento que se seleccione. Como lo muestra la figura 3.16, es necesario elegir un archivo de corrección del patrón de haz; inicialmente, se utiliza un archivo predeterminado para crear un primer GeobaR, este a su vez se utiliza como base para crear un nuevo archivo de corrección del patrón de haz correspondiente a nuestros datos. El nuevo archivo es el que se emplea para la corrección al crear los GeoBars y mosaicos de interés.

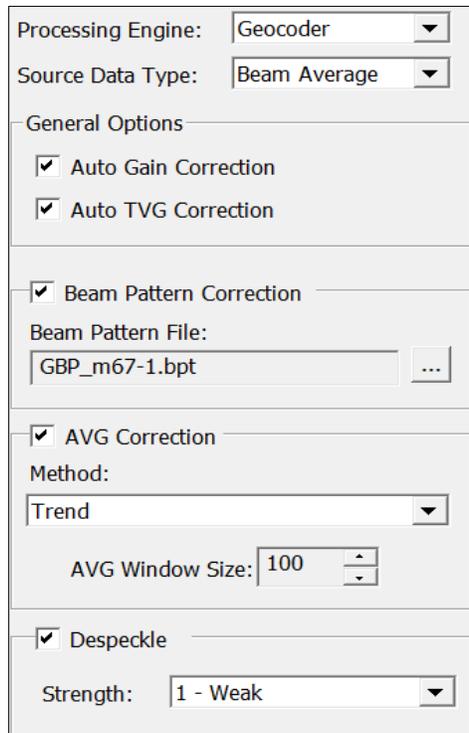


Figura 3.16. Ventana del editor de mosaicos de Caris.

Las demás correcciones que se realizaron en este proceso se mencionan a continuación:

Corrección de ganancia automática (AGC):

El objetivo del control automático de ganancia es suavizar la disminución de la amplitud de la señal causada por la dispersión geométrica y la atenuación a través de la columna de agua. Se establece la amplitud máxima dentro de una ventana de tiempo específica, la ventana de tiempo se mueve automáticamente igualando las amplitudes al valor preestablecido para cada nueva sección. Lo que se obtiene es aproximadamente un mismo rango de amplitud en toda la sección. Al recalcular las amplitudes los valores de *backscatter* se modifican inherentemente.

Corrección de Variación angular (AVG):

Elimina los artefactos de ganancia angular del sedimento, normaliza las intensidades angulares medias considerando los efectos de las propiedades físicas como el tamaño del grano y la densidad del sedimento, lo hace por medio de un filtro *moving average*. En nuestro caso se seleccionó el método *Trend* con una ventana de 100.

Ganancia variable en el tiempo (*Time-Varying Gain*)

La corrección *Time-Varying Gain* (TVG) ajusta la intensidad de la señal aplicando una ganancia no uniforme, dependiente del tiempo. TVG se usa para compensar la atenuación que se produce debido a la absorción y dispersión a medida que el haz del sonar viaja de regreso al receptor. Dado que estos retornos se reciben durante un período de tiempo constante y predecible, se puede usar una curva variable en el tiempo para aumentar la ganancia y compensar el retorno del sonar decaído.

Eliminar (*Despeckle*)

Las imágenes pueden tener píxeles aislados con niveles de intensidad que son inconsistentes con los píxeles vecinos. Es posible filtrar la luz aislada y / o los píxeles oscuros a través del proceso *Despeckle*. Esto producirá imágenes más suavizadas y uniformes. Se utiliza un valor calculado basado en los niveles de intensidad vecinos para reemplazar la intensidad del píxel actual si está fuera del rango especificado. El valor calculado a partir de las intensidades vecinas puede derivarse calculando la media o la mediana.

Un GeoBaR tiene tres capas secundarias:

- Intensidad: muestra la intensidad actual (incluidas las ediciones).
- Intensidad original: muestra la intensidad cuando se creó el GeoBaR (antes de editar en GeoBaR).
- Pesos: muestra los pesos calculados en función de la geometría del sonar. Estos valores se utilizan al compilar un mosaico basado en el método *Auto-Seam*.

Una vez configuradas las opciones de procesamiento en el editor de mosaico, se elige la opción "crear GeoBaR" en la barra de herramientas, en la cual es necesario ingresar el nombre, resolución y escala de color. Todos los GeoBaRs fueron creados con una resolución de 50 m, dando valores más puntuales que se pueden promediar con valores circundantes, considerando que las distancias promedio entre cada *beam* es de 100 m, utilizar una resolución de 50 m resultó más favorable para las imágenes. Se observó que para resoluciones de 100 m, 150 m y 200 m la interpolación afectaba la claridad de la imagen.

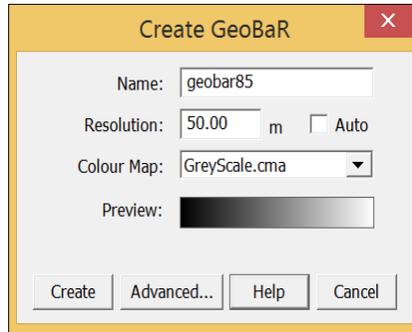


Figura 3.17. Ventana con la que se crean los GeoBaRs.

3.3.2. Corrección del patrón de haz

La corrección del patrón de haz se aplica para eliminar los artefactos de amplitud causados por el equipo: i) las compensaciones de amplitud que el fabricante aplica por pérdidas de propagación; ii) diferencias de frecuencia del pulso transmitido por codificación de sectores. Esta corrección ecualiza la diferencia de intensidad de los píxeles a partir del nadir hacia los rangos exteriores del haz. Para definir esta curva de patrón de haz, se seleccionó una región con un relieve batimétrico plano y que fuera homogénea en su respuesta de intensidad acústica.

La figura 3.18 muestra el área seleccionada para la obtención del patrón de haz en el norte del área de estudio. Mientras que la figura 3.19 muestra el patrón de haz resultante del análisis. En ella se observa que la intensidad de *backscatter* disminuye conforme incrementa el ángulo respecto al nadir. Ese patrón se usó para compensar todos los mosaicos de intensidad de *backscatter*.

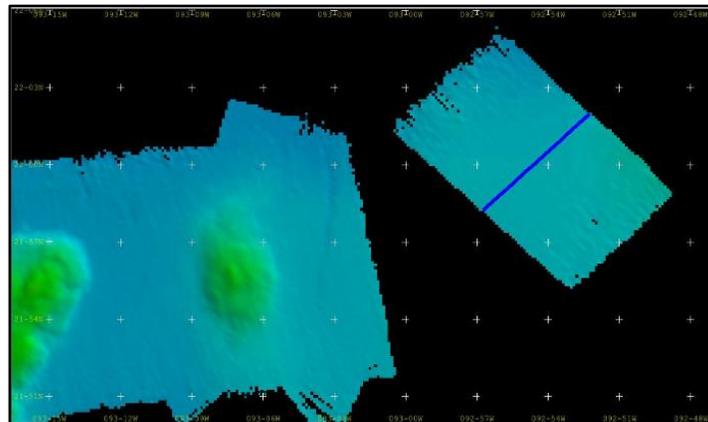


Figura 3.18. La línea azul representa la línea de navegación tomada para crear el archivo de patrón del haz.

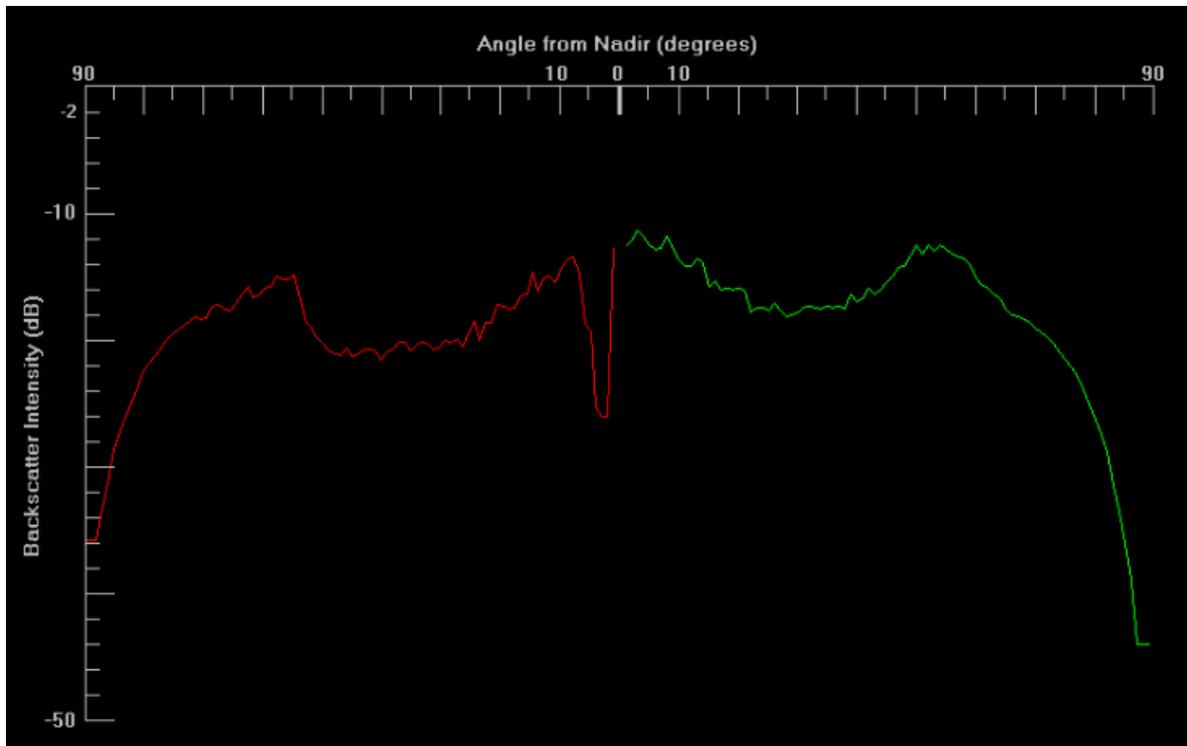


Figura 3.19. Patrón de haz corregido.

3.2.3. Creación de mosaicos

Un mosaico se define como una matriz con celdas de píxeles y valores de *backscatter*. En cada celda se puede almacenar hasta dos muestras, a su vez cada muestra contiene el valor de retrodispersión, la línea de adquisición, y calidad de la misma. Se atribuyen valores de baja calidad a las muestras más lejanas o cercanas al nadir, mientras que a las muestras de rango medio se les atribuyen valores altos de calidad.

Un mosaico se puede componer a partir de dos o más GeoBaRs. Al igual que otras superficies HIPS y SIPS, se crea un mosaico en una hoja de campo. Los mosaicos fueron creados conteniendo los GeoBaRs de las *track-lines* correspondientes a cada survey.

Resultaron cuatro mosaicos creados con el método Auto-Seam, el cual consiste en determinar qué píxeles tienen mayor importancia cuando hay superposición. Utilizando una función de ponderación asigna menor importancia a los píxeles en el borde del *swath* que a los del centro (figura 3.20).

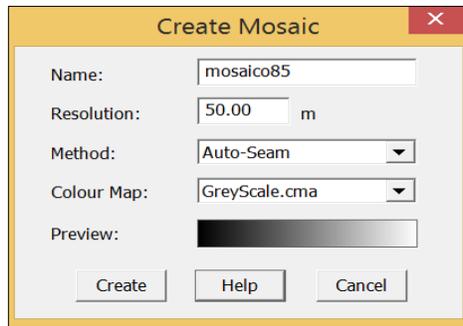


Figura 3.20. Ventana en la que se ingresan los parámetros con los que se desea crear un mosaico.

El proceso de creación de mosaicos no requiere de numerosos pasos una vez que han sido creados los GeoBaRs, ya que como se mencionó anteriormente estos últimos son una base del mosaico que ya contiene las correcciones asignadas. Por lo tanto, en este proceso solo fue necesario asignar un nombre, una resolución de 50 m, usando solo un método (*Auto-Seam*) con una escala de color establecida.

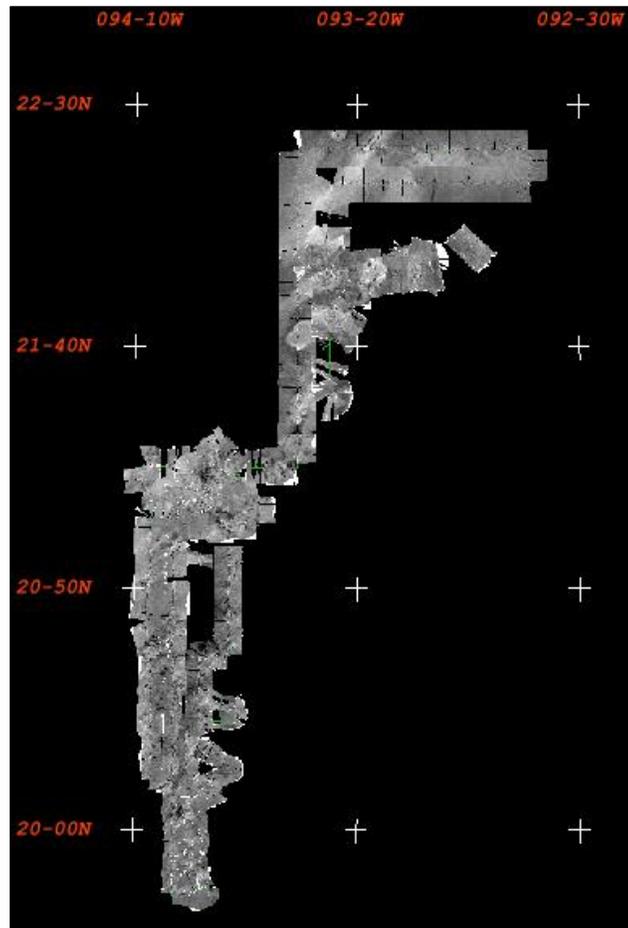


Figura 3.21. Mosaicos en Caris Hips and SIPS.

3.4. Exportar batimetría y mosaicos

Una vez realizada la limpieza de batimetría (figura 3.22) y creados los cuatro mosaicos, se exportaron de Caris con formato .TIFF, pues es el único con el que permite hacer este proceso. La figura 3.23 muestra los mosaicos individuales. Dado que la exportación sólo permite trabajar los datos como imagen, se importaron a un software de georreferenciación para la creación de la carta batimétrica y compilación de los mosaicos en uno solo.

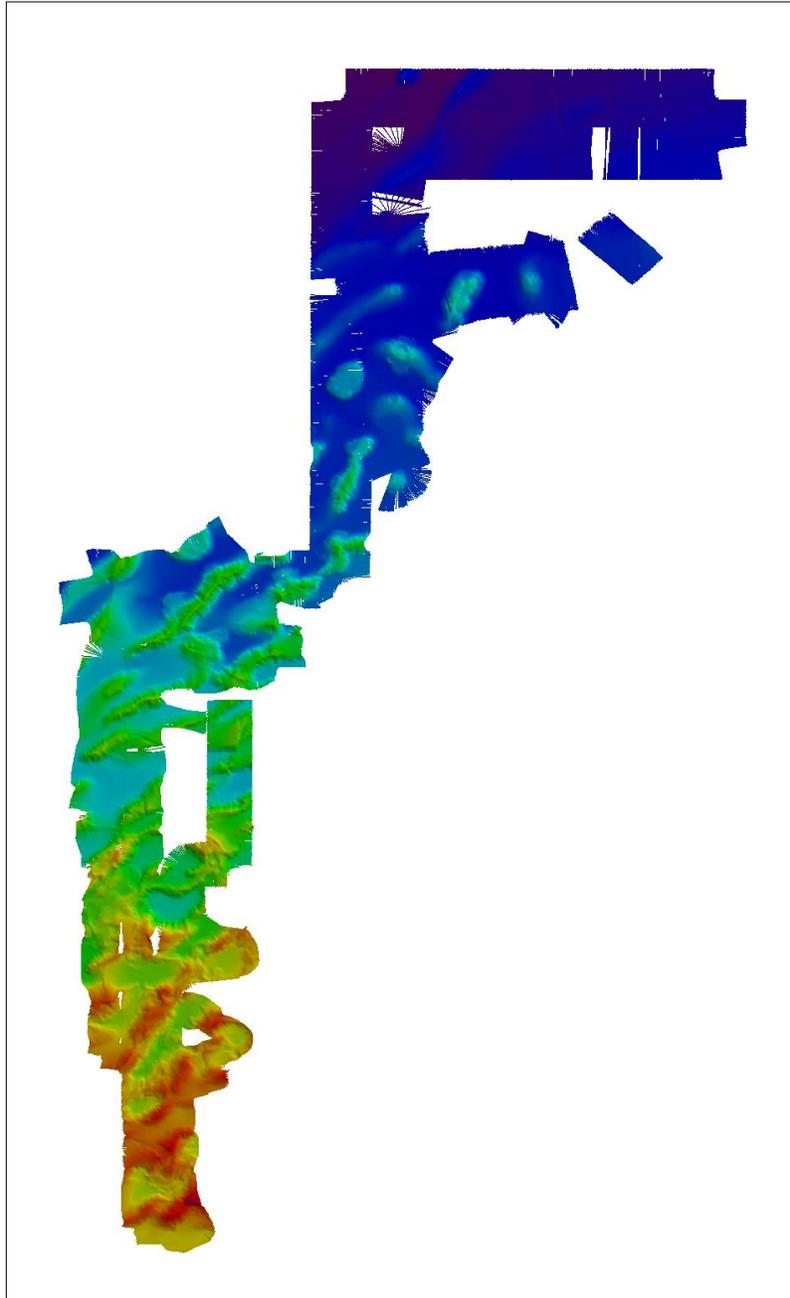
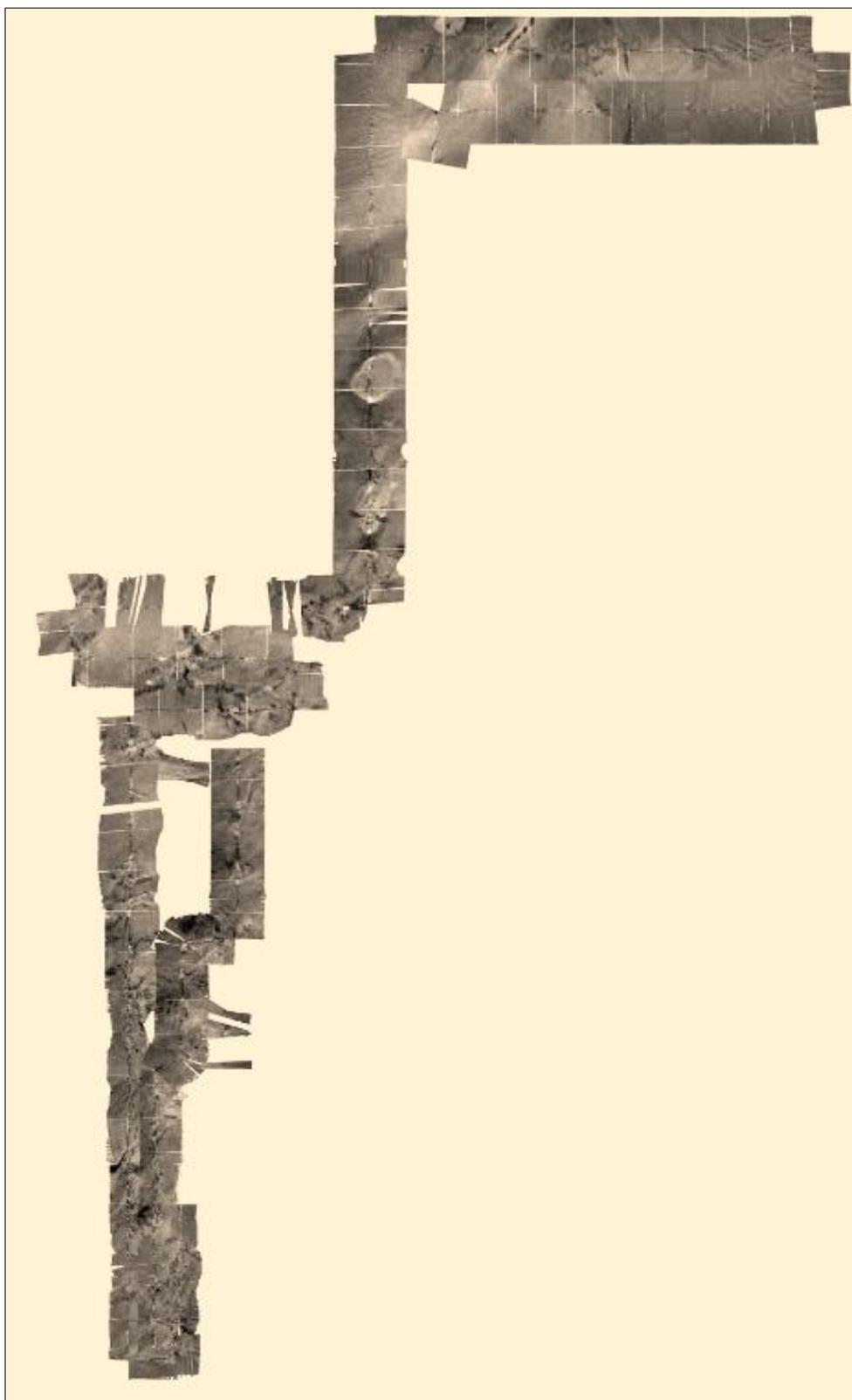


Figura 3.22. Batimetría final exportada desde Caris.

a)



b)

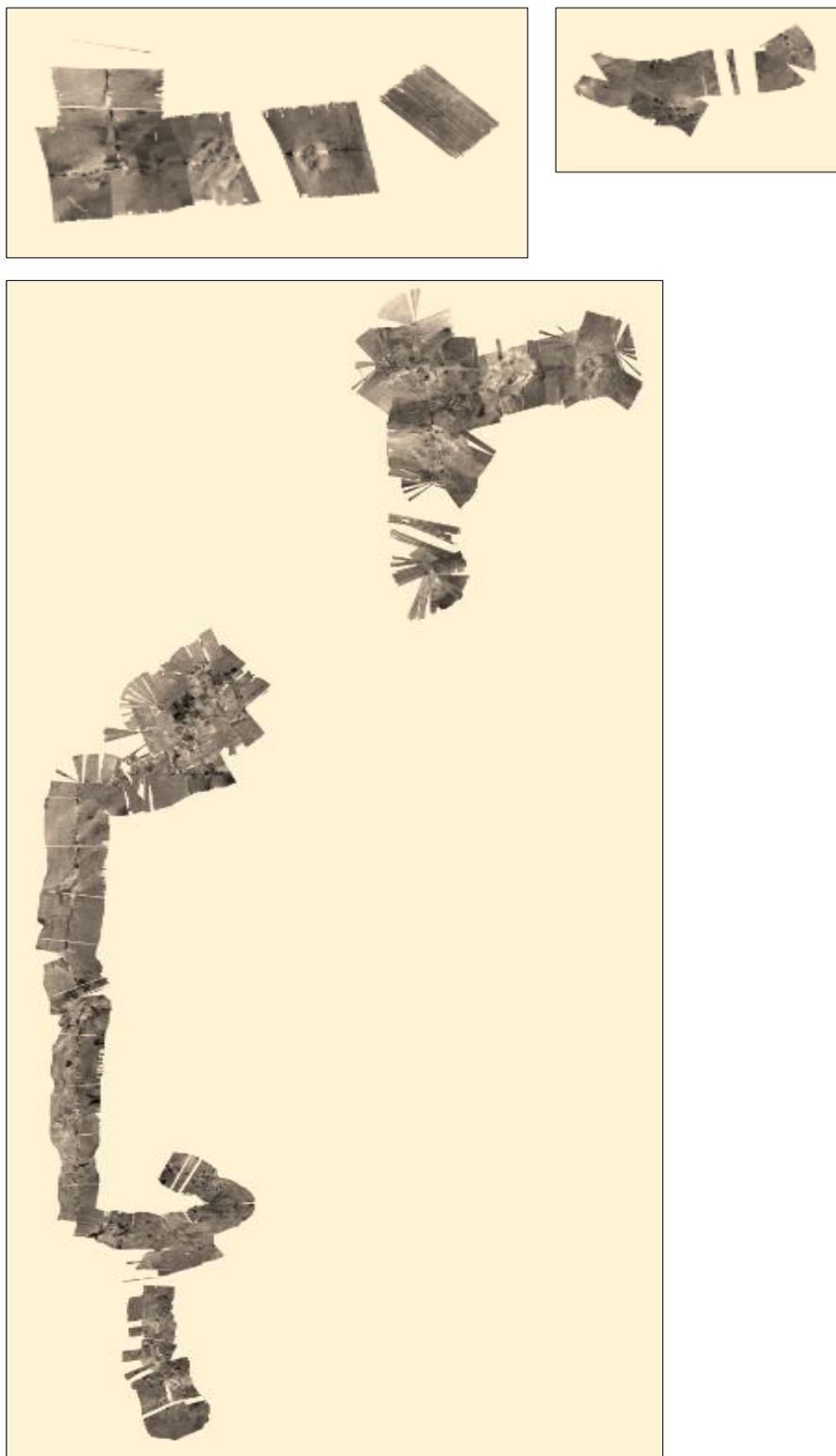


Figura 3.23. a) y b) Mosaicos exportados como imagen desde Caris.

4. Resultados

Los datos de la campaña M67-2a (2006) (batimetría multihaz y *backscatter*) son post-procesados para obtener un modelo digital del terreno de alta resolución y mosaicos de retrodispersión acústica. Como parte del objetivo de esta tesis, los datos de las campañas M67-2a (2006) y S0174-2 (2003) son analizados en conjunto en la batimetría y efecto de la retrodispersión acústica de la zona de estudio. A través de estos resultados, también se comparan las ventajas y desventajas que se presentan al utilizar diferente software para el post-procesamiento.

4.1. Carta Batimétrica

La figura 4.1 muestra la carta batimétrica obtenida con los datos multihaz de la campaña M67-2a. El modelo digital de elevación tiene una resolución de 200 m y cubre una superficie aproximada de 13, 242 Km². La pendiente general del área de estudio tiene dirección norte-sur llevando la mayor profundidad hacia la Planice Sigsbee.

La morfología general del área en la Provincia de los Domos de Campeche es caracterizada por estructuras dómicas y valles entre éstas. Hacia el sur la mayoría se encuentran muy cerca una de la otra formando cordilleras que tienen una orientación hacia el noreste. La distancia entre los domos aumenta de sur a norte.

4.1.2. Compilación cartas batimétricas de las campañas M67-2a y S0174-2a

La carta en la figura 4.2 muestra el modelo digital de elevaciones de los datos multihaz del crucero S0174-2 [Ponce, 2009] y los de la campaña M67-2a. El área total que cubren los modelos de elevación es de aproximadamente 20, 000 km². La zona norte cubre una superficie cubierta es de ~13,400 km².

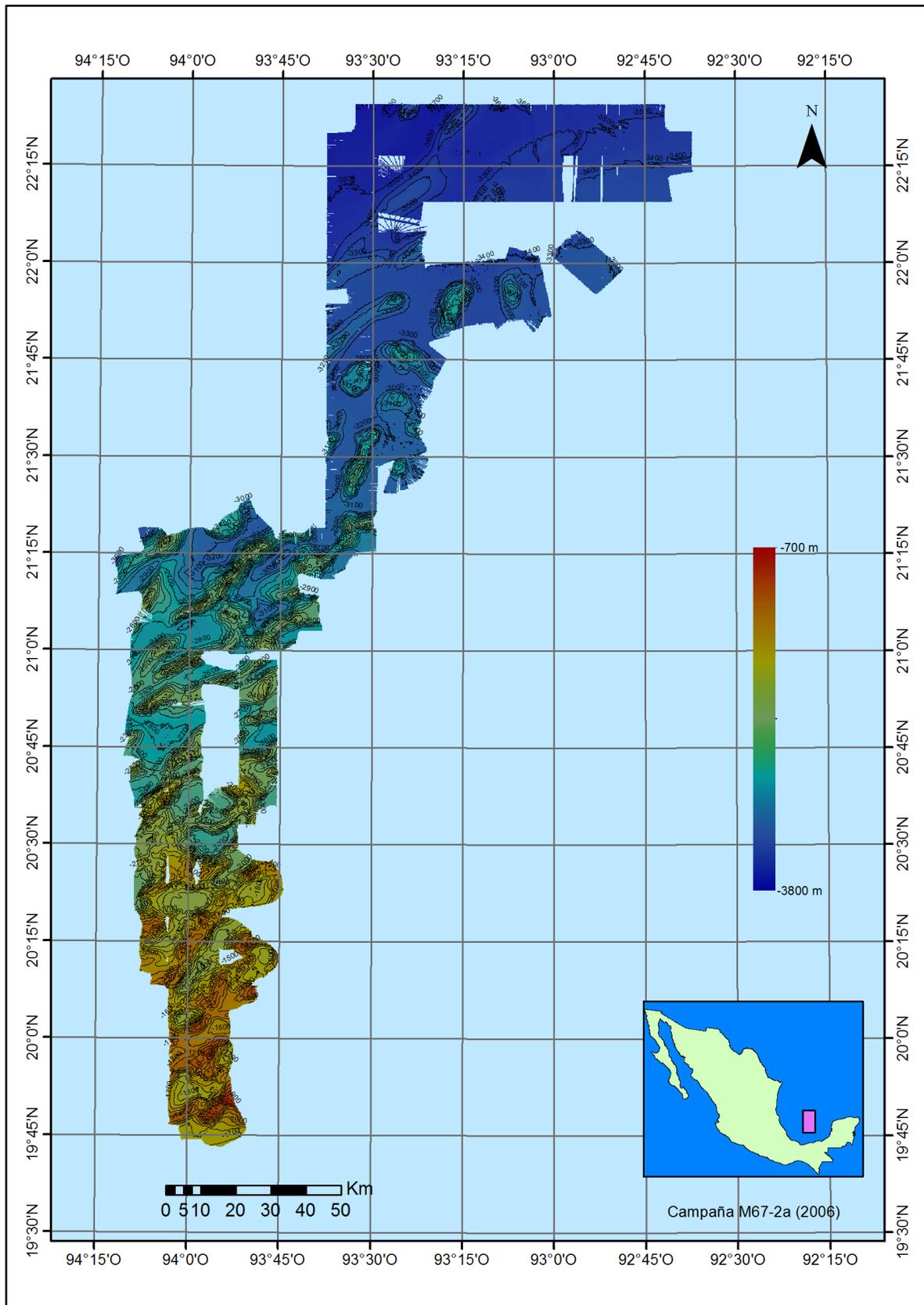


Figura 4.1. Carta batimétrica de alta resolución (200 m), campaña M67-2a (2006).

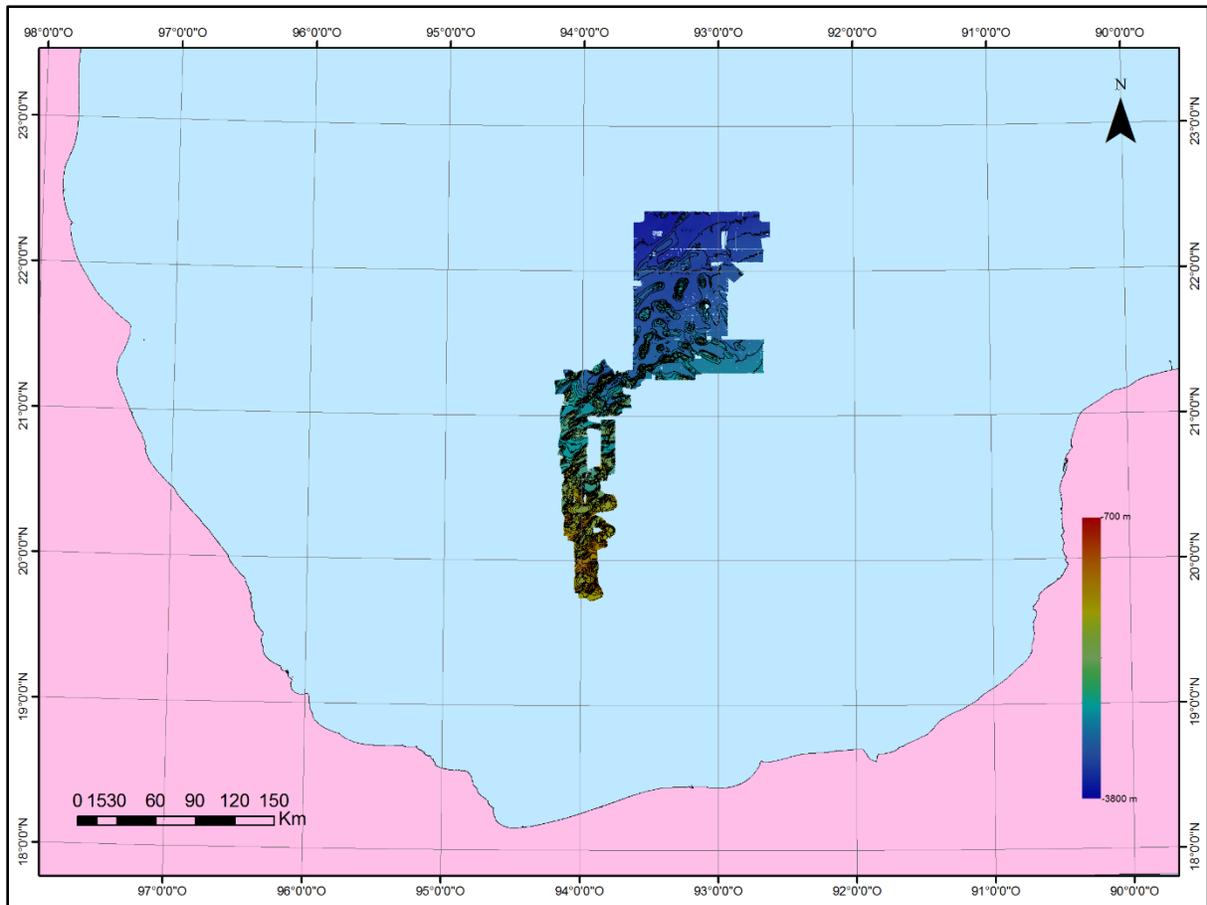


Figura 4.2. Carta batimétrica de alta resolución (200 m) de las campañas M67-2a (2006) y S0174-2 (2003).

La figura 4.3 muestra la región norte del área de estudio donde se compilaron los datos de ambos cruceros. No se observan cambios en el relieve que puedan estar asociados a los límites de ambos modelos de elevación; los resultados conectan el relieve de los domos con buena precisión a través de los diferentes modelos.

La figura 4.4 muestra en detalle el relieve de un domo mapeado por ambos estudios. Su resultado muestra que las curvas de nivel entre un modelo y otro son concordantes. También se observa una separación horizontal de entre 50 m a 180 m.

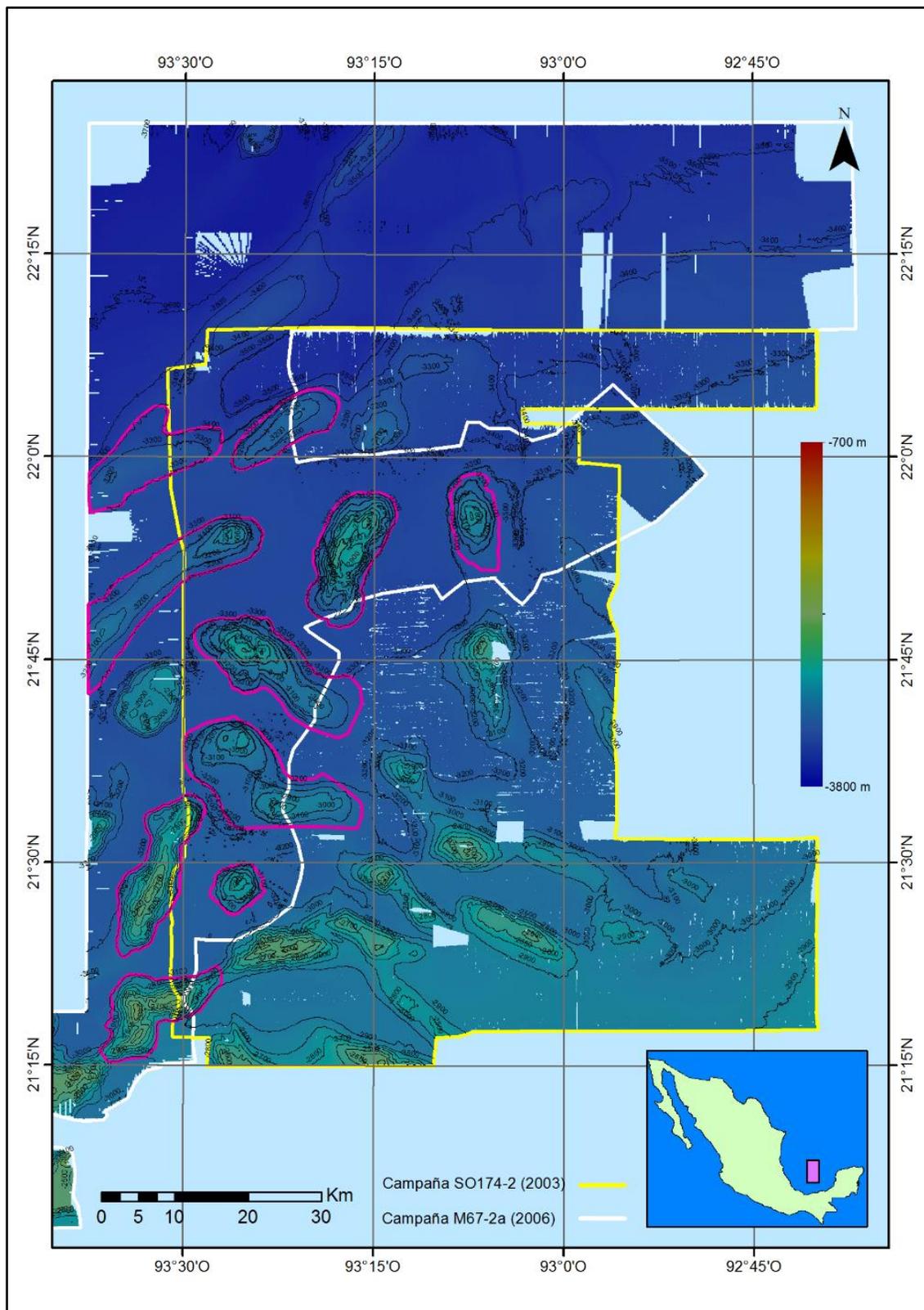


Figura 4.3. Detalle de la zona norte del área de estudio. El polígono blanco y polígono amarillo representan los límites de los modelos batimétricos de las campañas M67-2a y SO174-2 respectivamente, en rosa se indican los domos mapeados por ambos estudios.

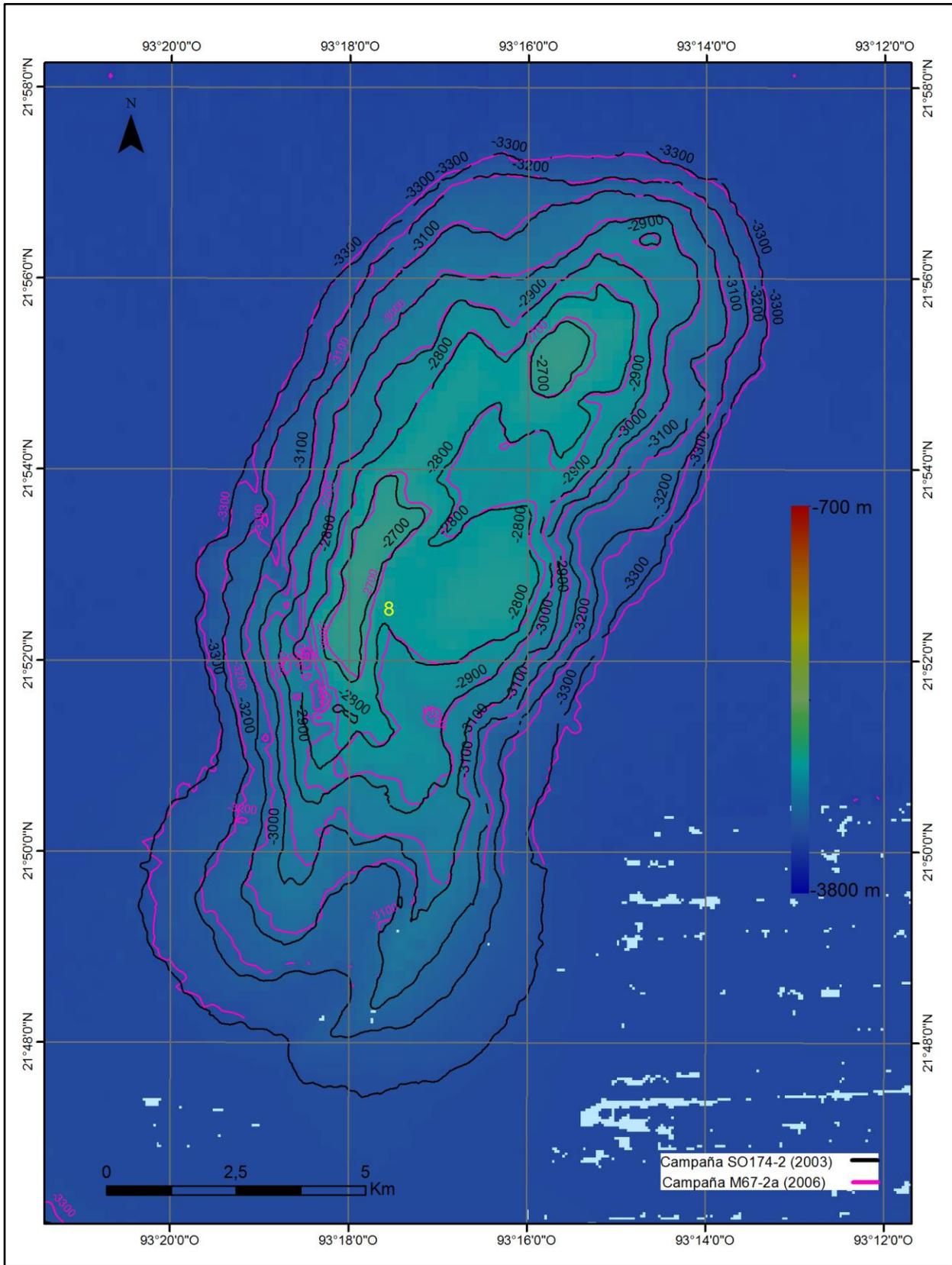


Figura 4.4. Acercamiento a zona donde se aprecia diferencia entre curvas de nivel.

Los domos 7 (el domo llamado “Chapopote”), 8, 9 y 10 fueron mapeados por ambas campañas y son buenos ejemplos para demostrar la constancia de rasgos morfológicos. La carta batimétrica de la campaña M67-2a muestra que el domo 7, conocido como Chapopote, tiene la relevancia de presentar una conexión con otro domo hacia el suroeste; en esta misma dirección se observa que las curvas de nivel no se cierran, sino que continúan, lo que sugiere que la extensión del domo sea aún mayor. Esta conexión no se observa en los datos de Ponce (2009) (figura 4.5). Ambos ejemplos muestran que los resultados obtenidos aquí mantienen los rasgos morfológicos del estudio previo [Ponce, 2009], con lo cual puedo establecer que mis datos y su procesamiento son adecuados.

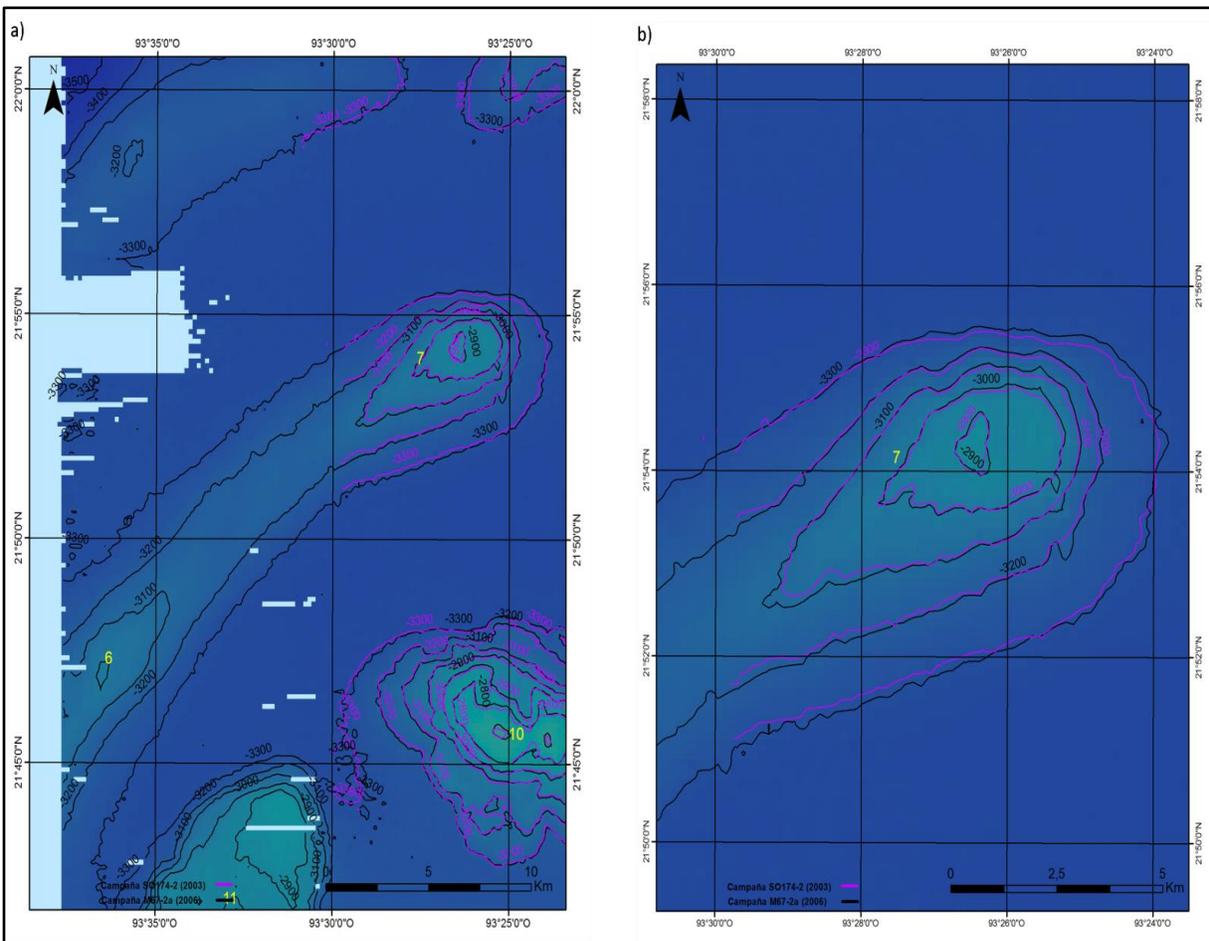


Figura 4.5 Domo el Chapopote mapeado por las campañas, a) M67-2a (2006) y b) SO174-2 (2003).

La figura 4.6 presenta varias vistas del domo Chapopote en 3D; en los cuadros (a) y (c) muestra el relieve del domo mapeado durante de la campaña M67-2a; y en los cuadros (b) y

(d) durante la campaña S0174-2. Las vistas 3D facilitan la visualización de la morfología donde las pendientes se distinguen mejor.

En el anexo 5 se incluyen las imágenes de batimetría 2D y 3D de los domos 8, 9 y 10 con los datos registrados por las campañas M67-2a y S0174.

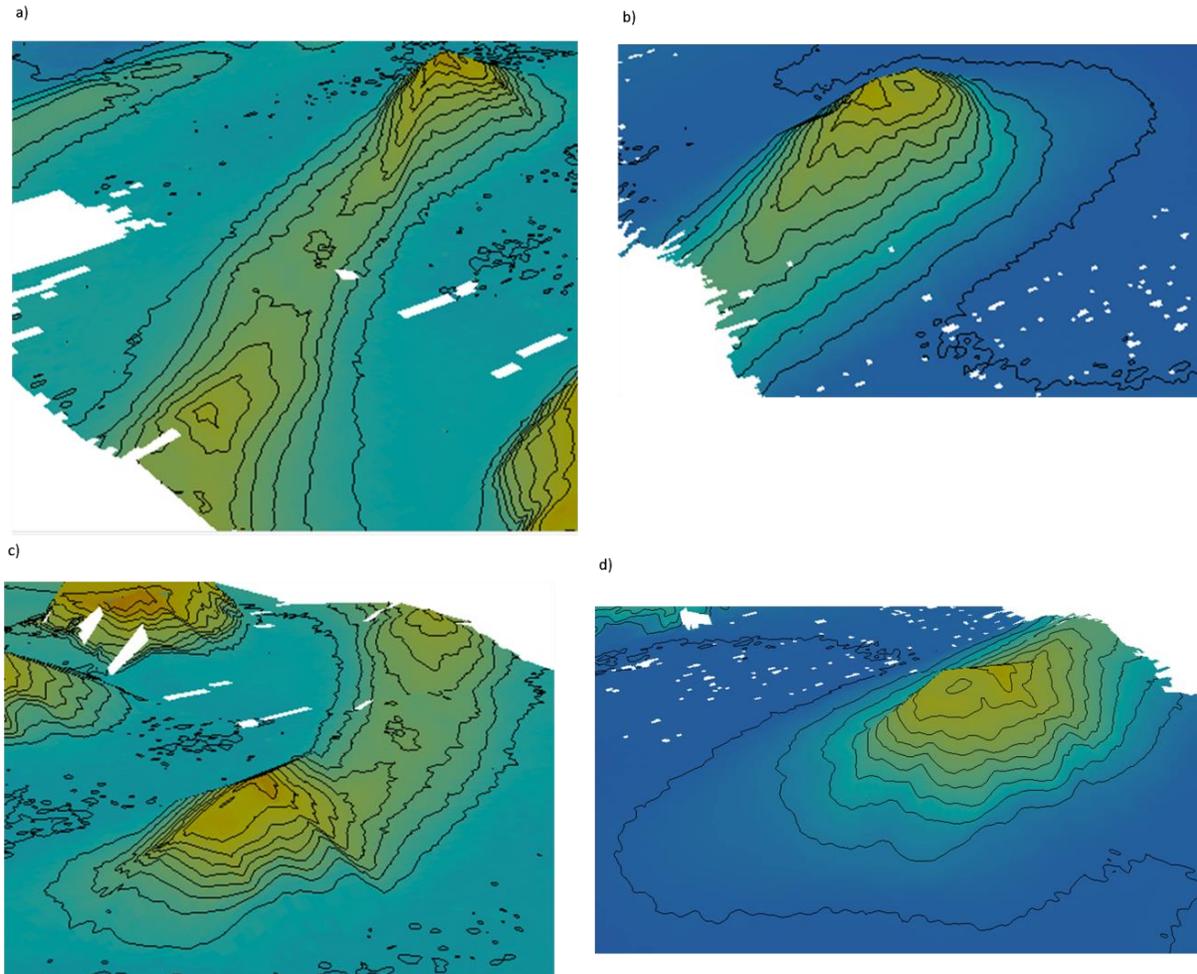


Figura 4.6. Domo chapopote en vista 3D. (a) y (c) muestran el domo mapeado por la campaña M67-2a (2006), y (b) y (d) muestran el domo mapeado por la campaña S0174-2 (2003).

4.2. Mosaico de imágenes de retrodispersión acústica

La figura 4.7 muestra el mosaico de imágenes de retrodispersión acústica de los datos de la campaña M67-2a. Este mosaico tiene la misma extensión que la carta batimétrica (13, 242 km²) y resolución espacial de 50 m. Los valores de mayor intensidad de *backscatter* son representados por los colores más oscuros (-10 dB) y los de menor intensidad por colores más claros (-30 dB).

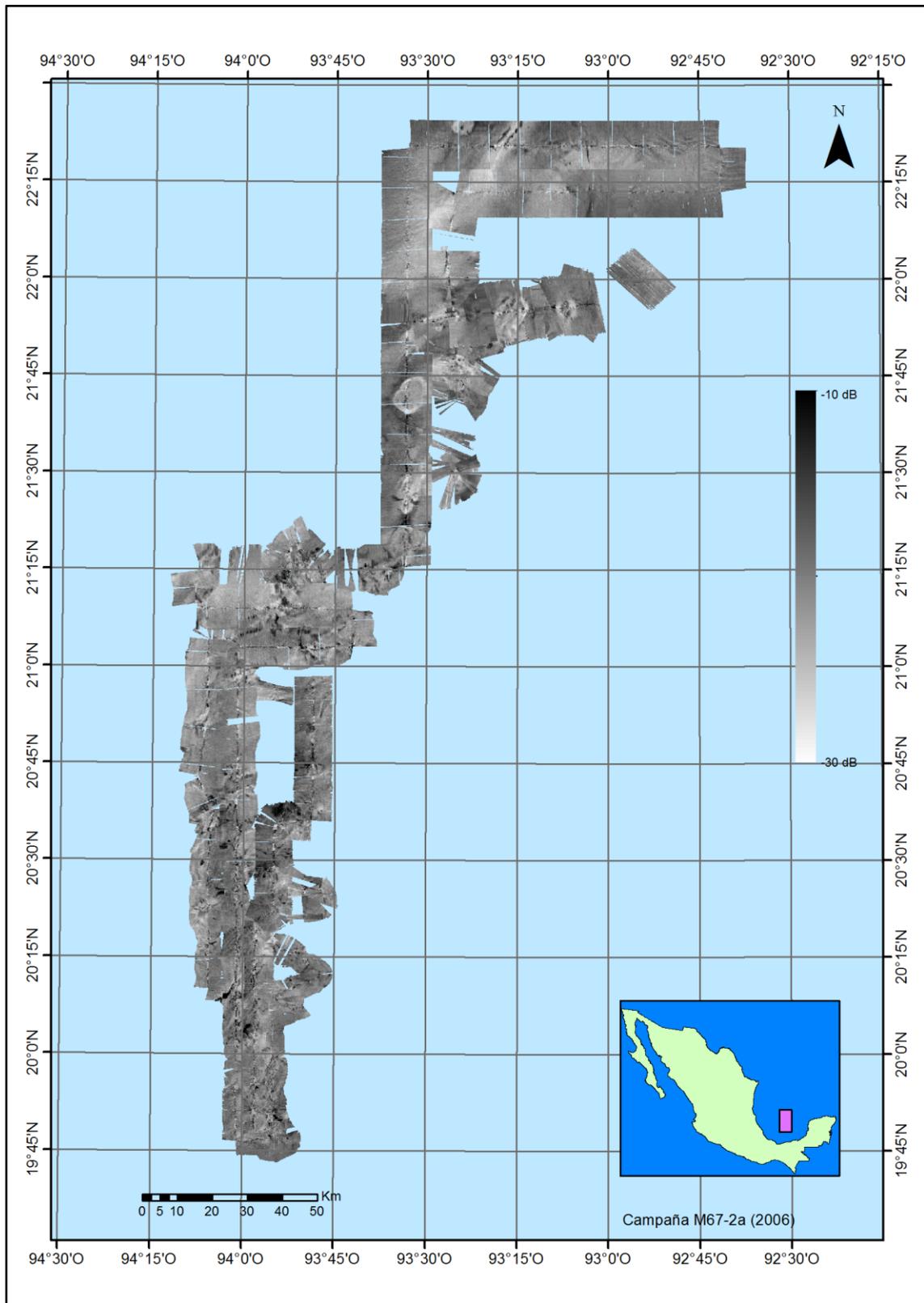


Figura 4.7. Mosaico de imágenes de retrodispersión acústica de la campaña M67-2a (2006) en los Domos de Campeche.

4.2.1. Compilación de mosaicos de imágenes de Backscatter de las campañas M67-2a y S0174-2

La figura 4.8 despliega el mosaico de imágenes acústicas de *backscatter*, integrando ambos conjuntos registrados en las dos campañas. El mosaico de imágenes de retrodispersión de los datos multihaz del crucero S0174-2 [Ponce, 2009] es compilado con el mosaico obtenido en este estudio. El área total que cubren los modelos de elevación es de aproximadamente 20, 000 km². En la zona norte, la superficie cubierta es de ~13,400 km². Los valores de intensidad rondan el conjunto de mosaicos de -10 dB a -30 dB.

Estos resultados muestran diferencias en los mosaicos de las respectivas campañas, que se deben a los diferentes métodos que se utilizaron en el procesamiento de datos de *backscatter*. En el caso del mosaico de la campaña S0174-2, el procesamiento no incluyó la corrección del patrón de haz; en consecuencia, a lo largo de la línea de derrota (nadir) en la parte central del barrido tiene valores altos de intensidad resultado de la incidencia vertical de los haces centrales.

Por otro lado, el software de procesamiento no permite exportar los mosaicos con los valores correspondientes de intensidades, sino como una imagen con paleta de colores. Por lo anterior, esto impidió realizar un análisis cuantitativo de los valores de *backscatter* de la campaña M67-2a con los de la campaña S0174-2.

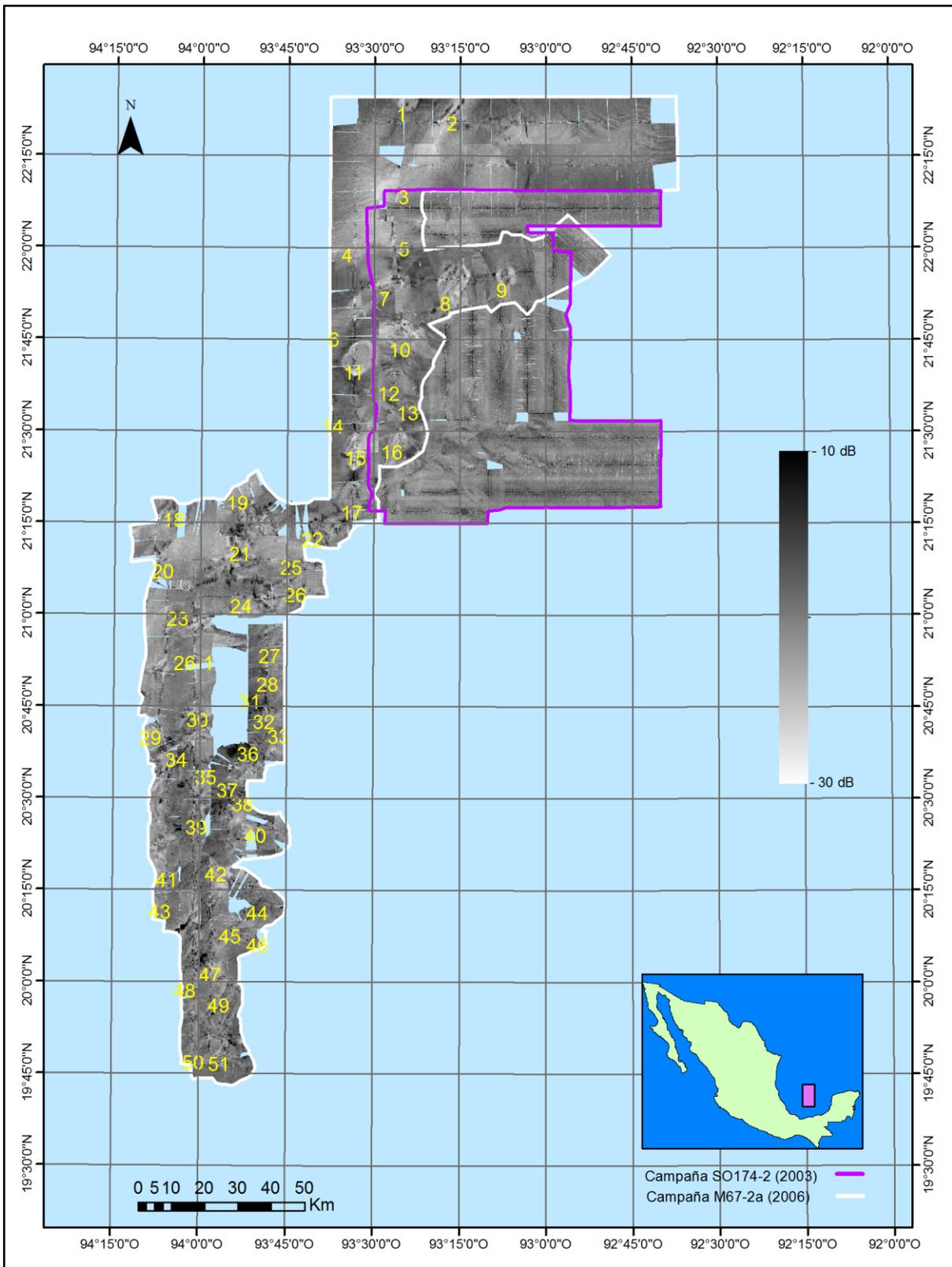


Figura 4.8. Mosaicos de retrodispersión acústica de las campañas S0174-2 (2003) y M67-2a (2006).

Artefactos

La figura 4.9 muestra un detalle de la región norte donde aparecen líneas de color blanco que separan porciones del mosaico en la dirección *across-track*. Esto se debe a eliminación de datos de pings al inicio o final del archivo durante el procesamiento.

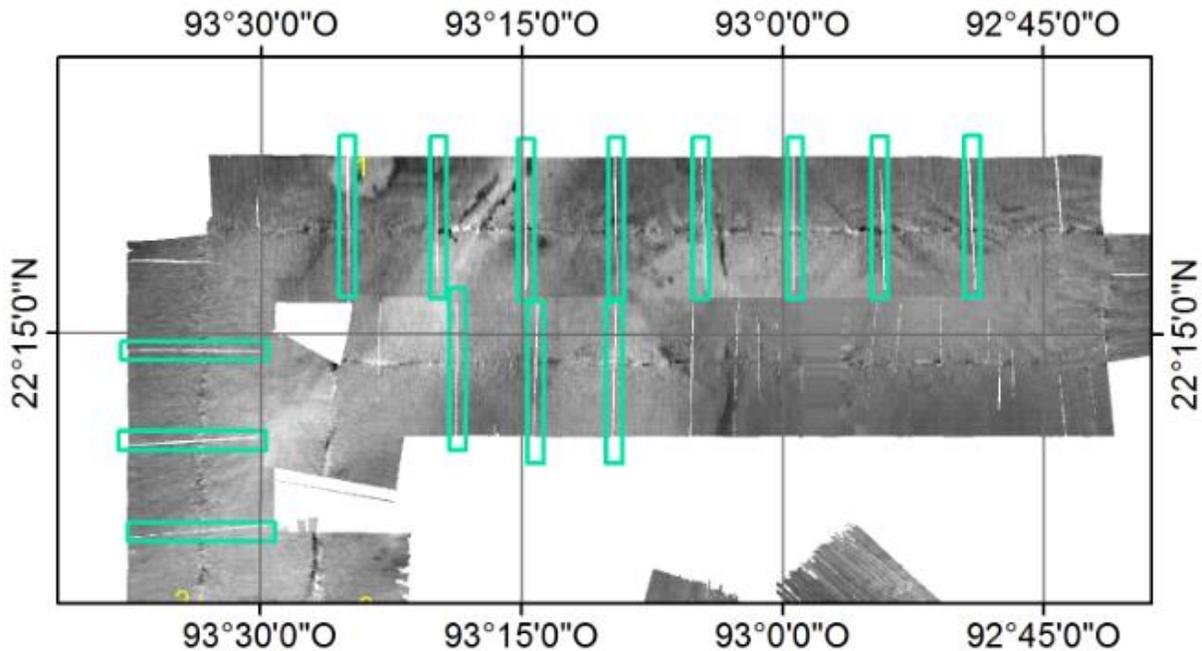


Figura 4.9. Ejemplo del sector N-E donde se indican las discontinuidades evidenciando cada archivo de entrada.

El efecto de nadir está presente en la imagen de *backscatter* del crucero S0174-2; éste también se observa en los mosaicos obtenidos en este estudio, aunque está disminuido por la aplicación de la corrección del patrón de haz. La figura 4.10 muestra un ejemplo de una región donde no se logró disminuir el efecto de alta intensidad a lo largo del nadir.

En el mosaico de la campaña S0174-2 las imágenes muestran un bandeamiento de los valores de *backscatter* que siguen las líneas de navegación. Este efecto es causado por las diferentes ganancias y sectores de transmisión en la adquisición de los datos (figura 4.11). En algunas zonas del mosaico de la campaña M67-2a hay ausencia de datos a pesar de que si exista la batimetría, esta carencia de interferencia puede ser resultado de cierto filtro interno del software que discriminó los datos registrados de *backscatter*. Por ejemplo, la figura 4.12 ilustra algunas zonas sin el despliegado de valores de *backscatter*.

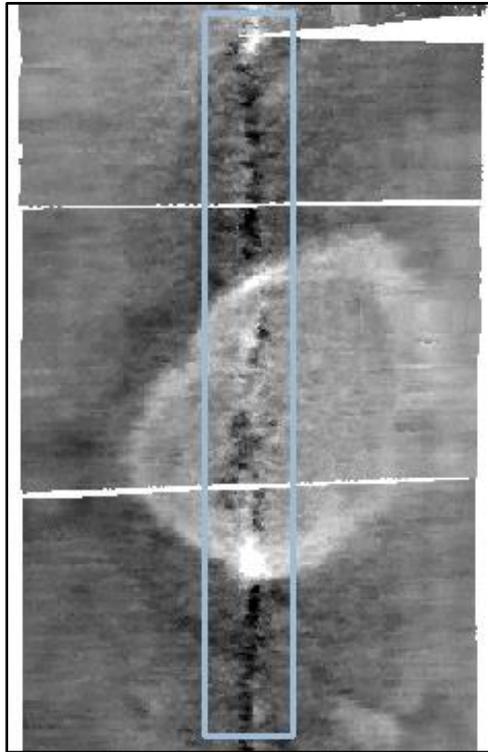


Figura 4.10. Detalle en zona donde se aprecia altas intensidades de retrodispersión acústica a lo largo de la línea del nadir.

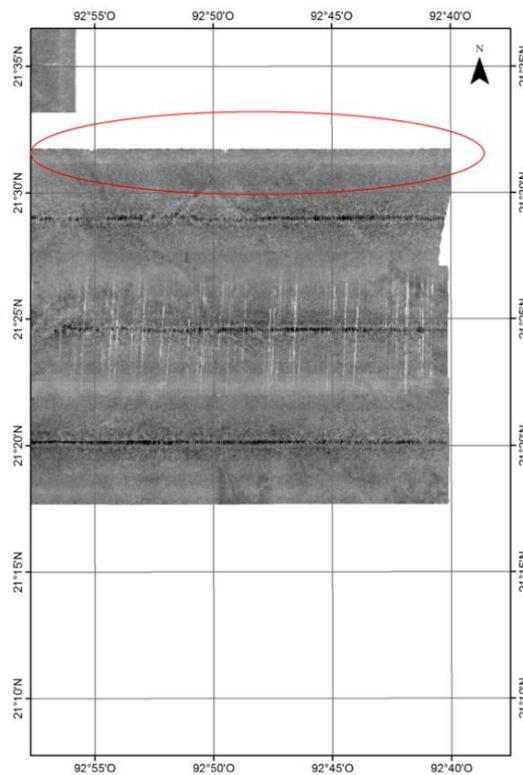


Figura 4.11. Detalle de mosaico de la campaña S0174-2 en donde se observa bandeamiento.

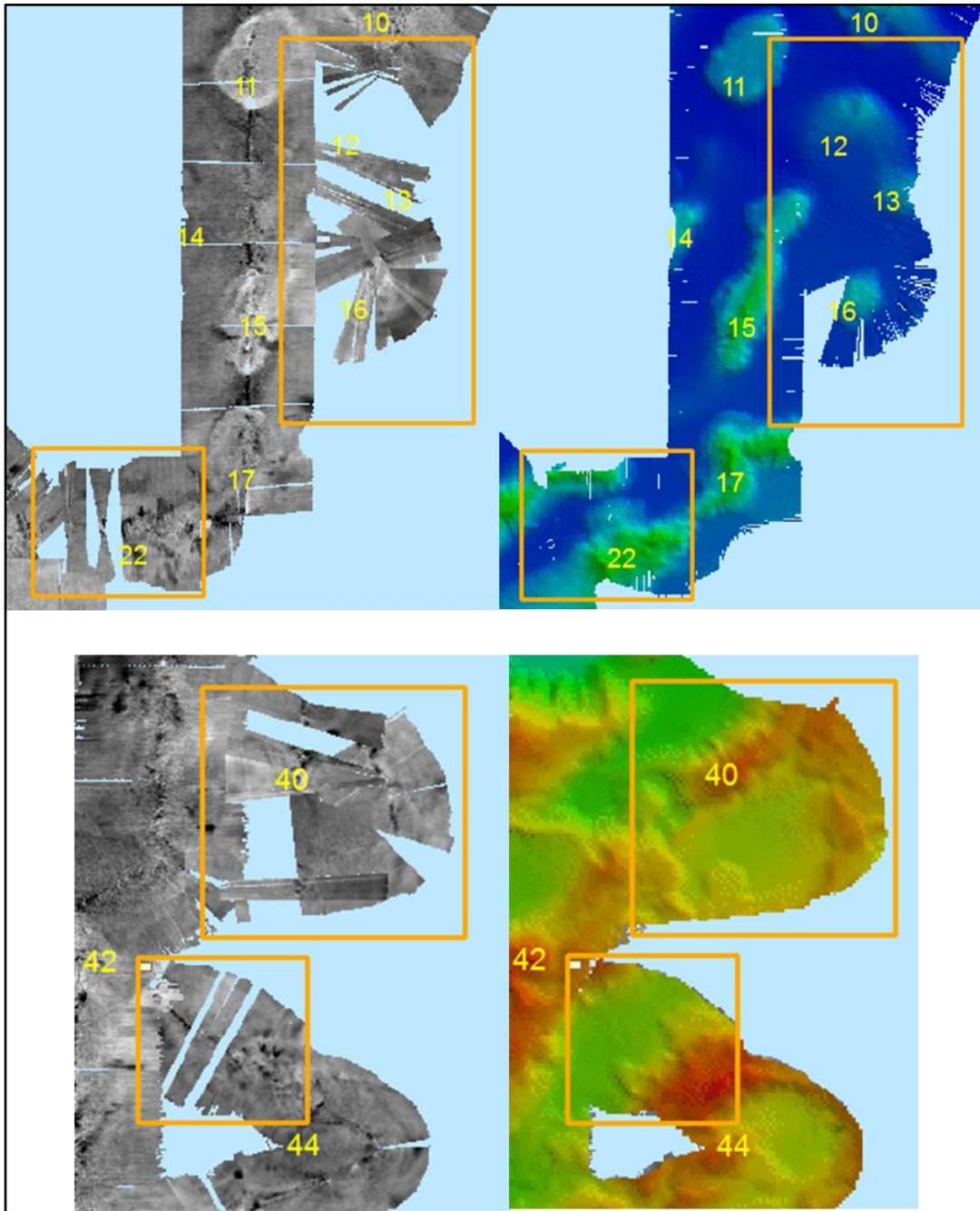


Figura 4.12. Zonas en el área de estudio de la campaña M67-2a en donde se ejemplifica la ausencia de datos en el mosaico de retrodispersión acústica en comparación con la carta batimétrica.

Por último, la figura 4.13 muestra áreas donde el *backscatter* se suprime; este efecto se presenta principalmente donde hay giros del barco, por este motivo se puede pensar que los datos se vieron afectados por la velocidad y ángulo en el que fueron adquiridos. El anexo 7 contiene las cartas batimétricas y los mosaicos de imágenes de retrodispersión acústica de la zona norte y zona sur en tamaño doble carta.

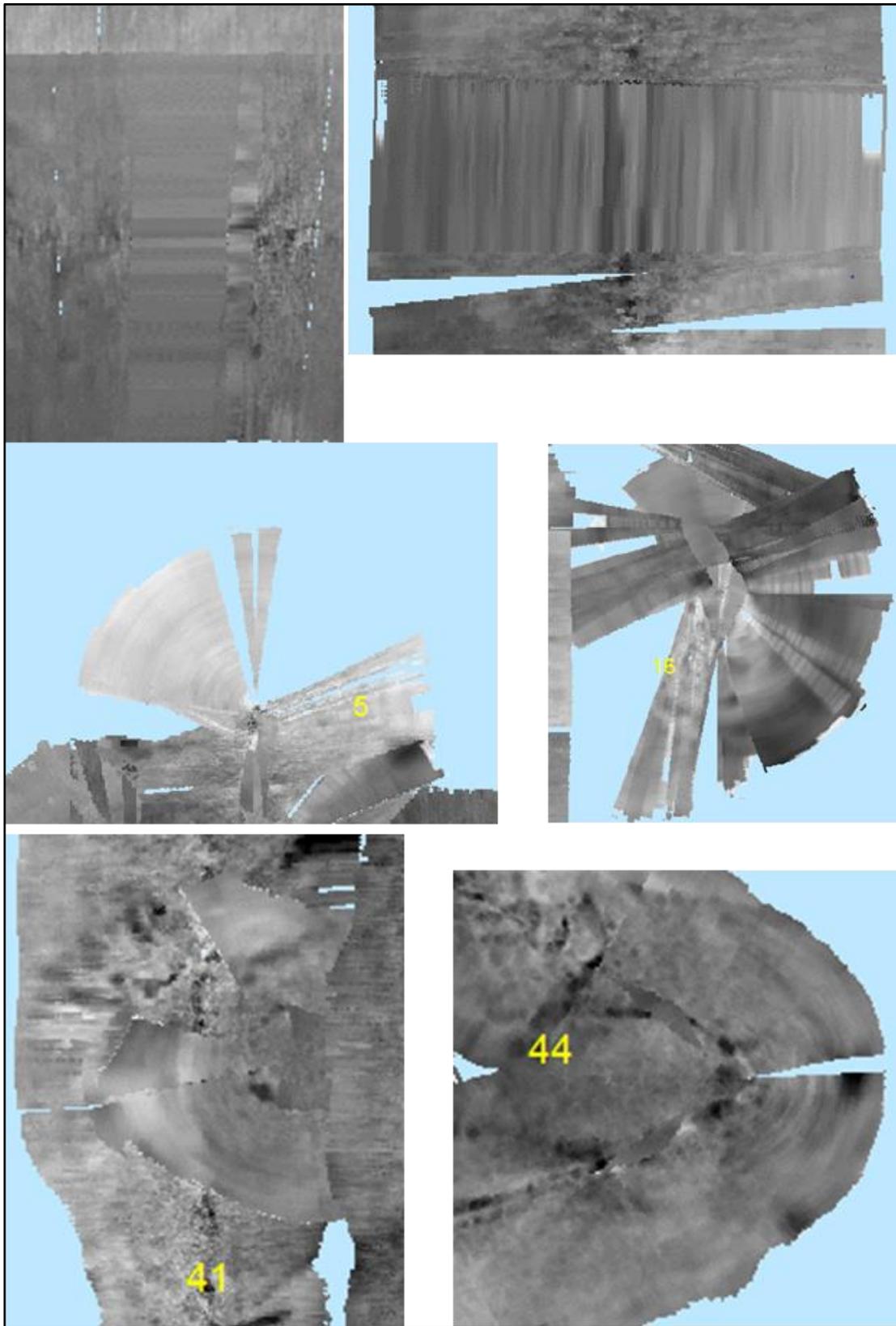


Figura 4.13. Áreas del mosaico de retrodispersión acústica donde se observan zonas difuminadas por los giros en la navegación, campaña M67-2a.

5. Interpretación

5.1. Carta Batimétrica

La carta batimétrica que contiene los datos de las campañas SO174-2 (Ponce, 2009) y M67-2a (2006) se muestra en la figura 5.1. Esta carta abarca profundidades de 787 m a 3742 m, las más profundas hacia el norte y las someras hacia el sur. Se observa mayor densidad de domos hacia el sur, donde se pueden observar más próximos entre ellos en comparación con los que se encuentran en el norte, ocasionando que los valles entre ellos sean más estrechos.

La batimetría expone en los valles entre domos cuatro escalones que definen la profundidad del lecho marino y tienen dirección noroeste (figura 5.1, líneas blancas). El área total que ocupan los domos en la carta batimétrica es de 7,262 km² aproximadamente. Se numeraron los domos de la campaña M67-2a con el objetivo de caracterizar zonas de interés, además se clasificaron de acuerdo a su forma y orientación. Se reconocen 51 domos de los cuales 4 tienen base redondeada y el resto son elongados. Algunos de los domos están muy próximos o unidos a otros formando cordilleras.

Debido a la extensión de la carta, se separó en dos partes para observar con mayor detalle: la zona norte, que incluye los datos de las campañas SO174-2 y M67-2a; y la zona sur, donde únicamente hay datos de la campaña M6-2a.

5.1.1. Área norte

La figura 5.2 muestra la carta batimétrica de la zona norte, ésta tiene una extensión de 11,316.33 km². La pendiente batimétrica general tiene dirección noroeste (figura 5.2 flecha rosa). En esta carta se numeran 17 estructuras dómicas que se observan en los datos de la campaña M67-2a, y los cuales ocupan un área de 2,076 km² aproximadamente. La orientación de los domos está agrupada en dos direcciones: en la zona oeste con preferencia hacia el NE, y en la zona este y sureste hacia el NW.

La densidad de domos disminuye de sur a norte haciendo más extensos los valles entre ellos. Las alturas de los domos respecto a los valles que los rodean se encuentran entre los 200 m y los 800 m. Es notable la ausencia de domos en el oriente de la carta, esto podría

relacionarse con el límite de la provincia de los Domos Salinos con la provincia del Cañón de Campeche.

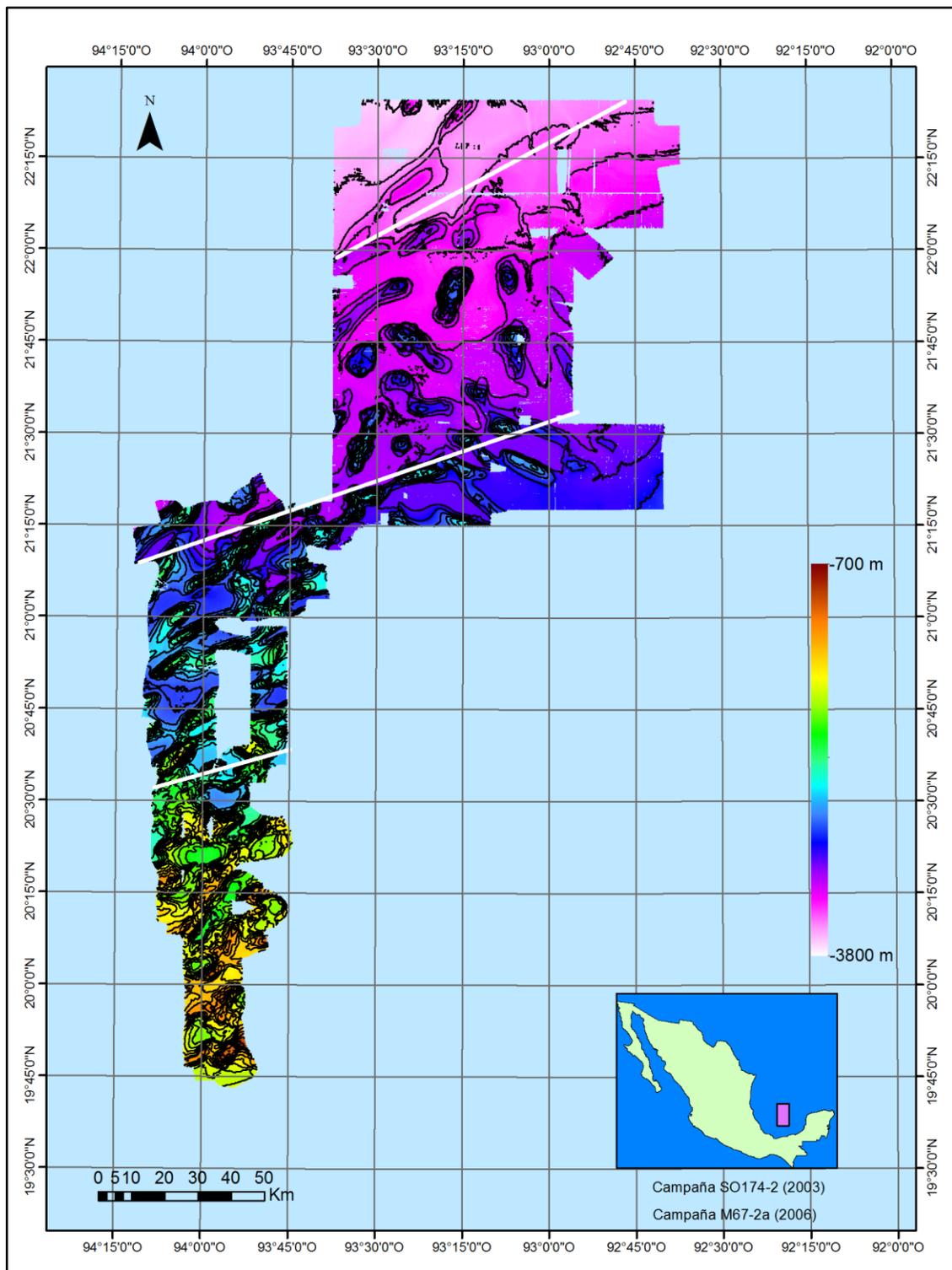


Figura 5.1. Carta batimétrica de las campañas SO174-2 (2003) y M67-2a (2006). Con líneas blancas se señalan los escalones batimétricos conduciendo las mayores profundidades hacia el norte.

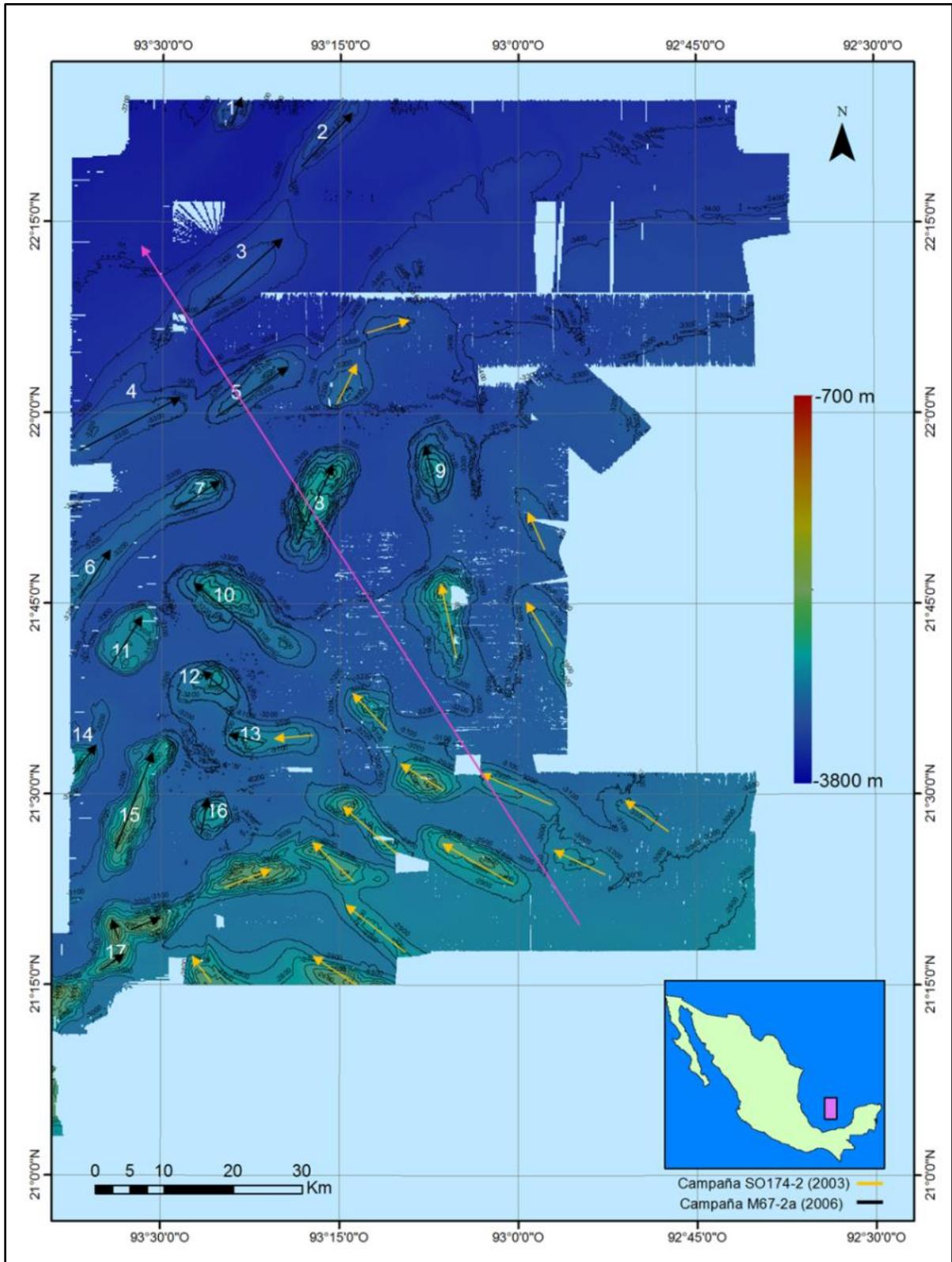


Figura 5.2. Carta batimétrica de la zona norte con ambas campañas señalando orientación de domos. Flechas anaranjadas domos de la campaña SO174-2 (2003), flechas negras domos de la campaña M67-2a (2006). Pendiente general hacia el NW (flecha rosa).

El sector NE del terreno es caracterizado por grandes planicies entre los 3,400 y 3,500 metros de profundidad. En esta área dos estructuras alargadas son observadas en dirección N-S, podrían ser canales submarinos y son señalados dentro de dos elipses en la figura 5.3-a. El canal de la izquierda tiene una longitud aproximada de 17 km mientras que el de la derecha es de 18 km. No obstante, al observar el relieve en un mapa de sombras se nota la prolongación del canal izquierdo hacia el sur (figura 5.2-b), extendiéndose hasta 58 km.

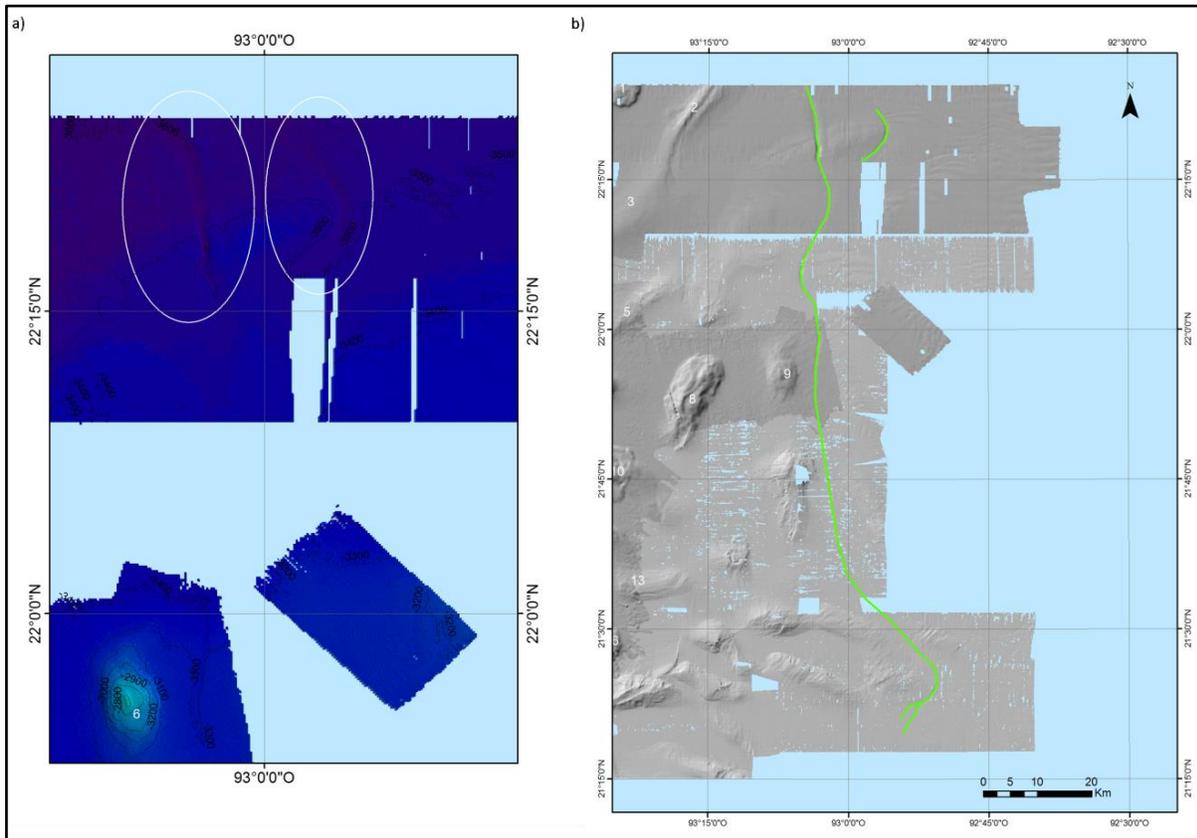


Figura 5.3. Estructuras observadas en el área norte identificadas como canales. (a) Canales sobre la carta batimétrica M67-2a, se observa solo un segmento del canal izquierdo. (b) Canales sobre ambas cartas batimétricas indicado el trayecto con color verde, el canal izquierdo se prolonga desde el sur hacia la planicie Sigsbee.

La figura 5.4 muestra un detalle topográfico en el sector noreste de la carta al este de los domos 3 y 4. En esta zona se observan en el lecho ondulaciones con apariencia de “rizaduras” que tienen dirección este-oeste. Estudios previos (Mendoza, 2000; Arredondo, 2016) han documentado las características morfológicas del Escarpe de Campeche en el cual se ha observado una configuración de cañones submarinos producto de la erosión y transporte de sedimentos o caída de material provenientes de la plataforma continental.

Estas estructuras podrían ser causadas por movimientos de masas de sedimentos descarga provenientes del Escarpe de Campeche y Cañón de Campeche.

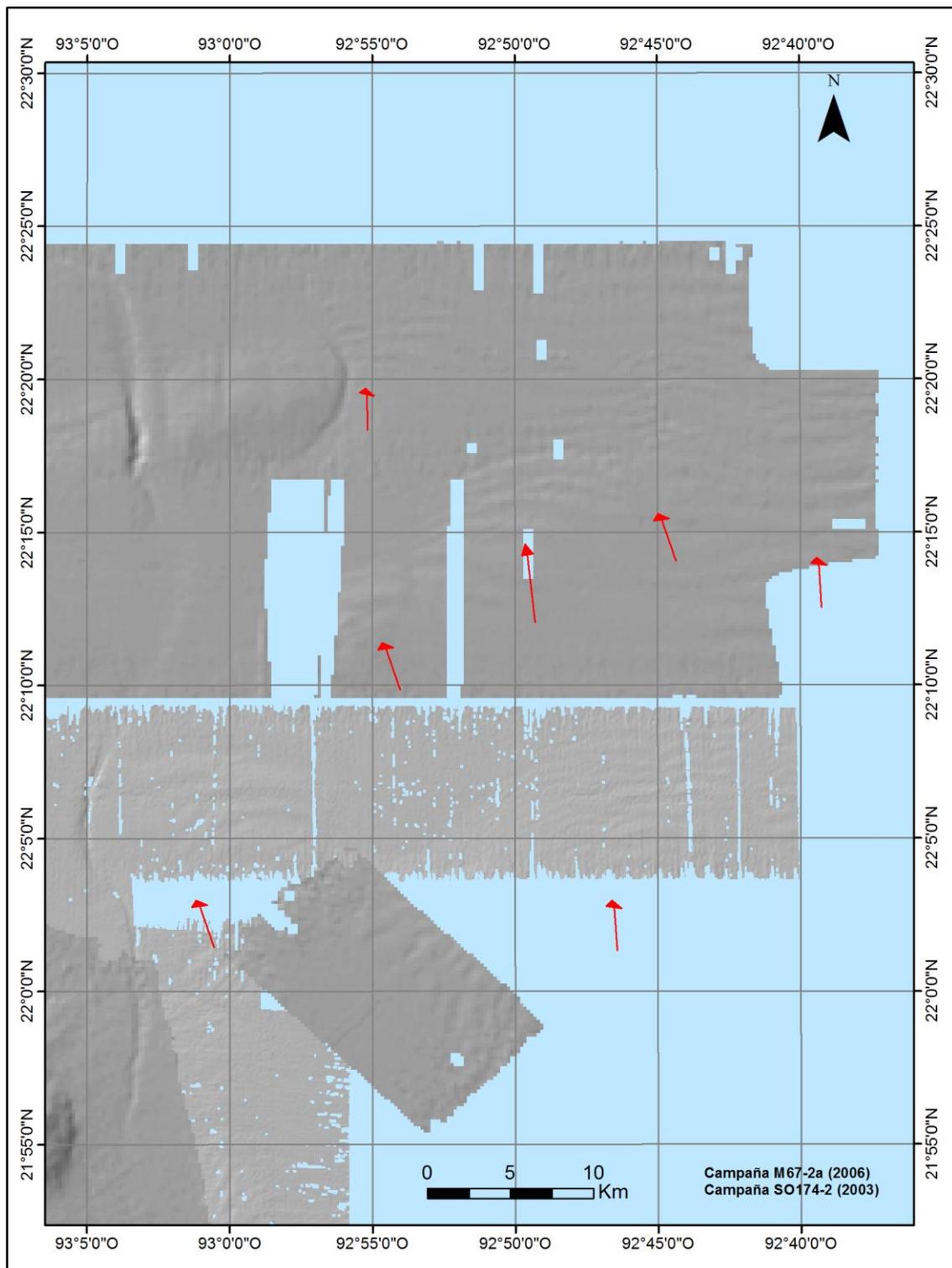


Figura 5.4. Rizaduras vistas en mapa de sombras indicadas con flechas rojas. Campañas M67-2a (2006) y SO174 (2003).

La figura 5.5 muestra estructuras parte de la provincia del Escarpe de Campeche con datos batimétricos tomados durante la campaña Chicxulub II (2015) [Cossío, 2020]. Se observan los cañones con dirección general E-W que caracterizan la provincia, sin embargo, los cañones que se encuentran en el extremo norte de la provincia presentan un cambio de dirección noroeste-sureste y alcanzan los 67° en su pendiente. Esta zona se encuentra a ~ 47 km de las estructuras de rizadura más próximas observadas en la campaña SO174 y a ~ 56 km de las observadas más próximas en la campaña M67-2a.

En la figura 5.6, la morfología del lecho muestra en el sector sureste de la carta que los domos 10, 15, y 17 presentan derrumbes en sus flancos que forman mesetas con geometría semicircular (figura 5.6 círculos claros). Mientras que el domo 17 tiene 3 cimas orientadas en distintas direcciones (una NS y dos al NE), además se conecta en ambos extremos con otras estructuras formando una cordillera en dirección noreste.

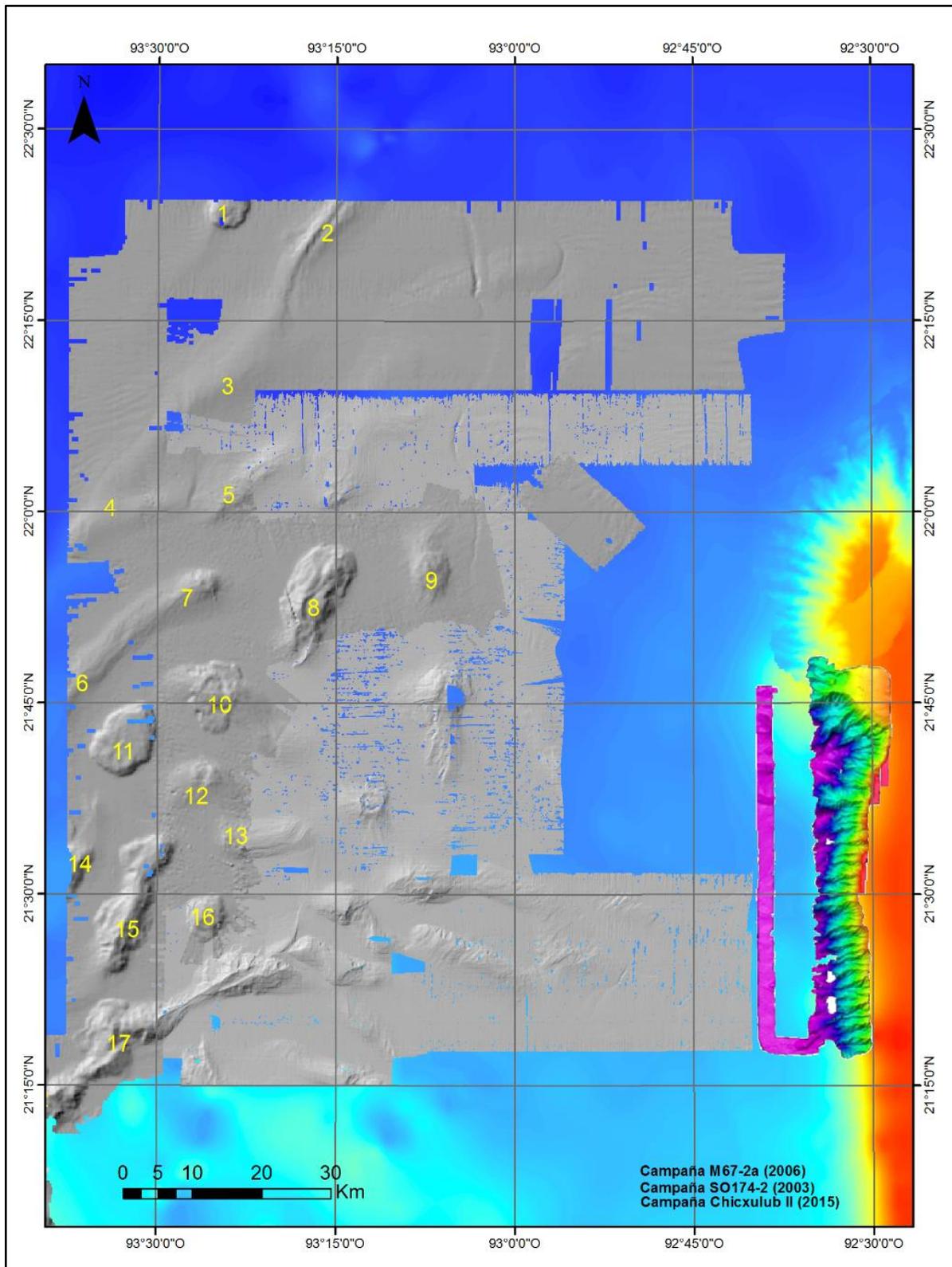


Figura 5.5. Mapa de sombras de las campañas M67-2a (2006) y SO174-2(2003) donde se observan estructuras de rizaduras; batimetría del área norte del Escarpe de Campeche tomados en la campaña Chicxulub II (2015) [Cossío, 2020].

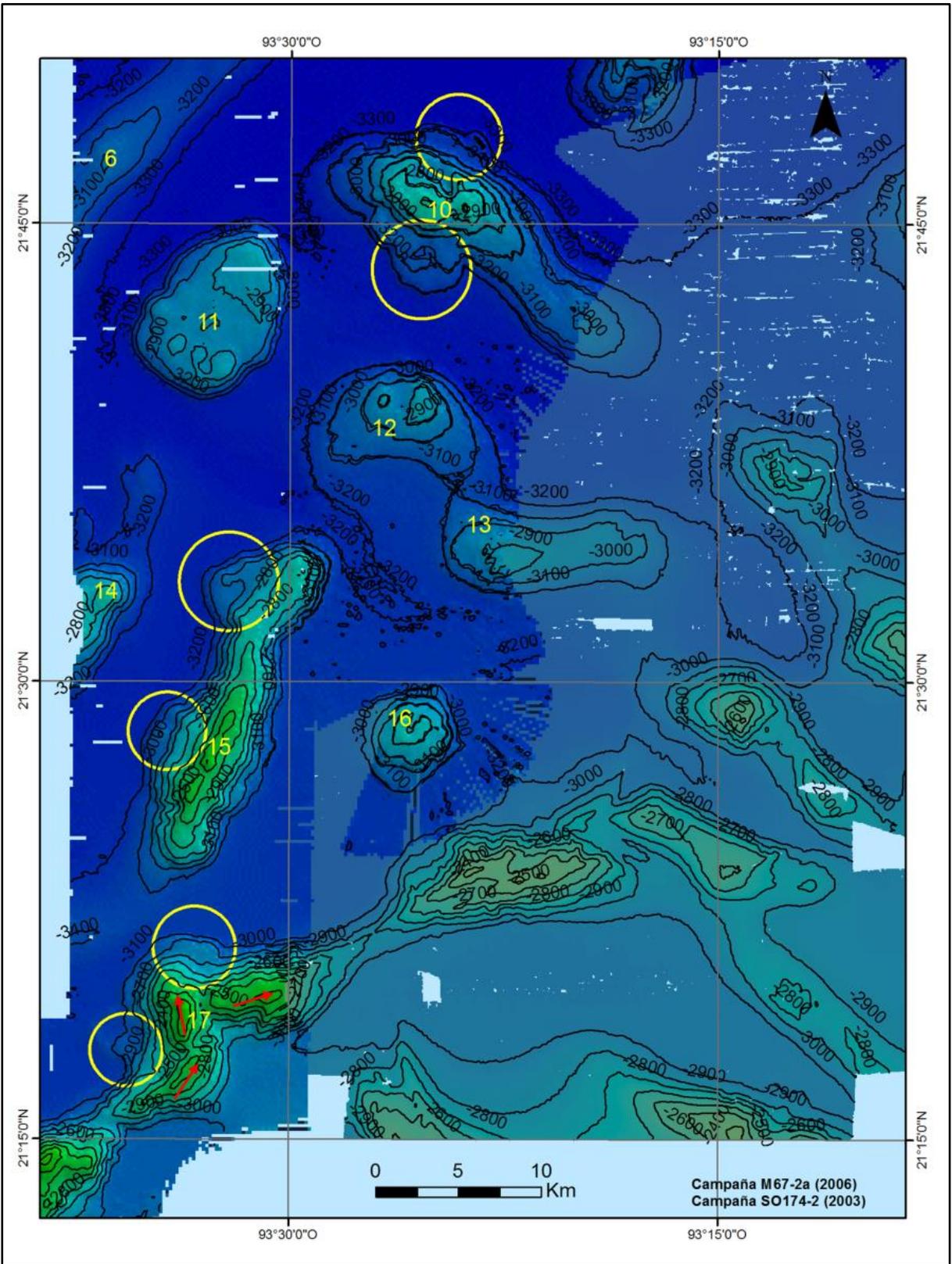


Figura 5.6. Extensiones en los domos 10, 15 y 17 señalados en círculos amarillos.

5.1.2. Área sur

La figura 5.7 muestra la carta batimétrica del área sur, que tiene una extensión de 6,362.82 km² aproximadamente. La pendiente batimétrica general tiene dirección norte-sur. La zona se caracteriza por una morfología dominada por estructuras dómicas que ocupan un área de 5,185.66 km² aproximadamente. Se observa que los domos se encuentran más próximos entre ellos y mayormente conectados, lo que dificulta señalar su forma y delimitación. Como ocurre en la zona norte, la separación entre los domos aumenta de sur a norte extendiendo los valles entre los mismos.

En esta zona la mayoría de los domos presentan forma alargada con una orientación promedio hacia el noreste; en contraste, los domos 19 y uno de los flancos de los domos 24 y 39 se orientan hacia el noroeste (flechas punteadas).

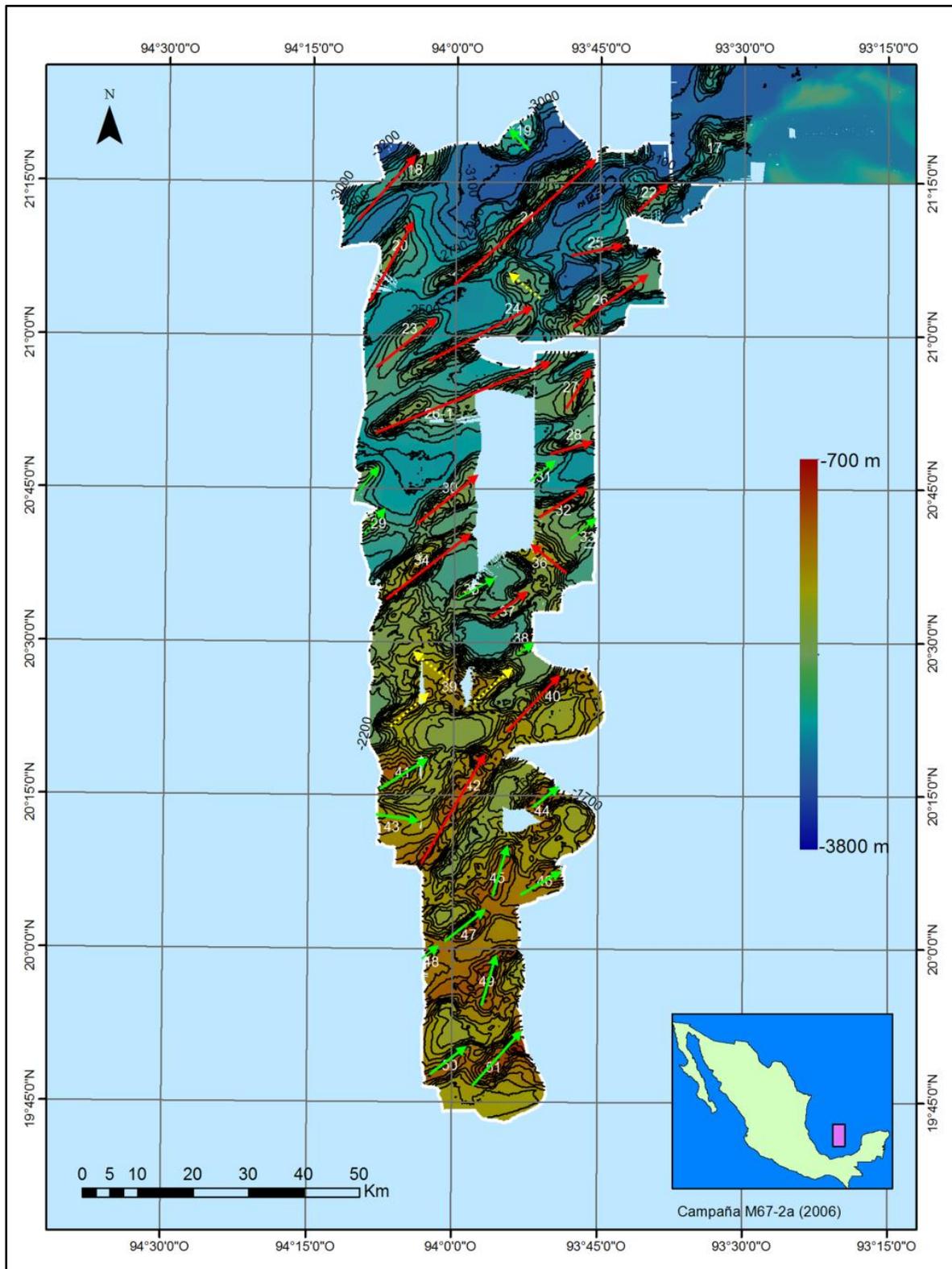


Figura 5.7. Área sur de la carta batimétrica de la campaña M67-2a en donde se señala con flechas verdes la orientación de los domos, con flechas rojas la orientación de las cordilleras y con flechas amarillas punteadas la dirección de los flancos de algunos domos.

Al estar conectados, los domos forman grandes cordilleras en dirección noreste (figura 5.7 marcadas con flechas rojas). Estas cordilleras tienen mayor longitud al conectarse unas con otras alcanzando entre 20 y 40 km.

La mayor densidad de domos en esta zona, y su conexión en largas cordilleras, produce valles de menor extensión que están generalmente cerrados y tienen geometrías irregulares. En la figura 5.8 estos valles cerrados son señalados con elipses blancas, donde también se observa que su extensión disminuye hacia el sur.

En la parte central de la zona sur se observa un área que no cuenta con datos, sin embargo, es posible pensar que los domos 26, 26-1 y 27 se conectan entre sí, al igual que los domos 22 y 25; 30 y 31; 32, 34 y 36 (figura 5.8 marcados con polígonos rosas).

La figura 5.9 muestra un detalle al norte del área sur, donde se señalan posibles derrumbes (círculos) en los flancos de los domos 21(al oeste), 22(al norte) y 24 (al noreste).

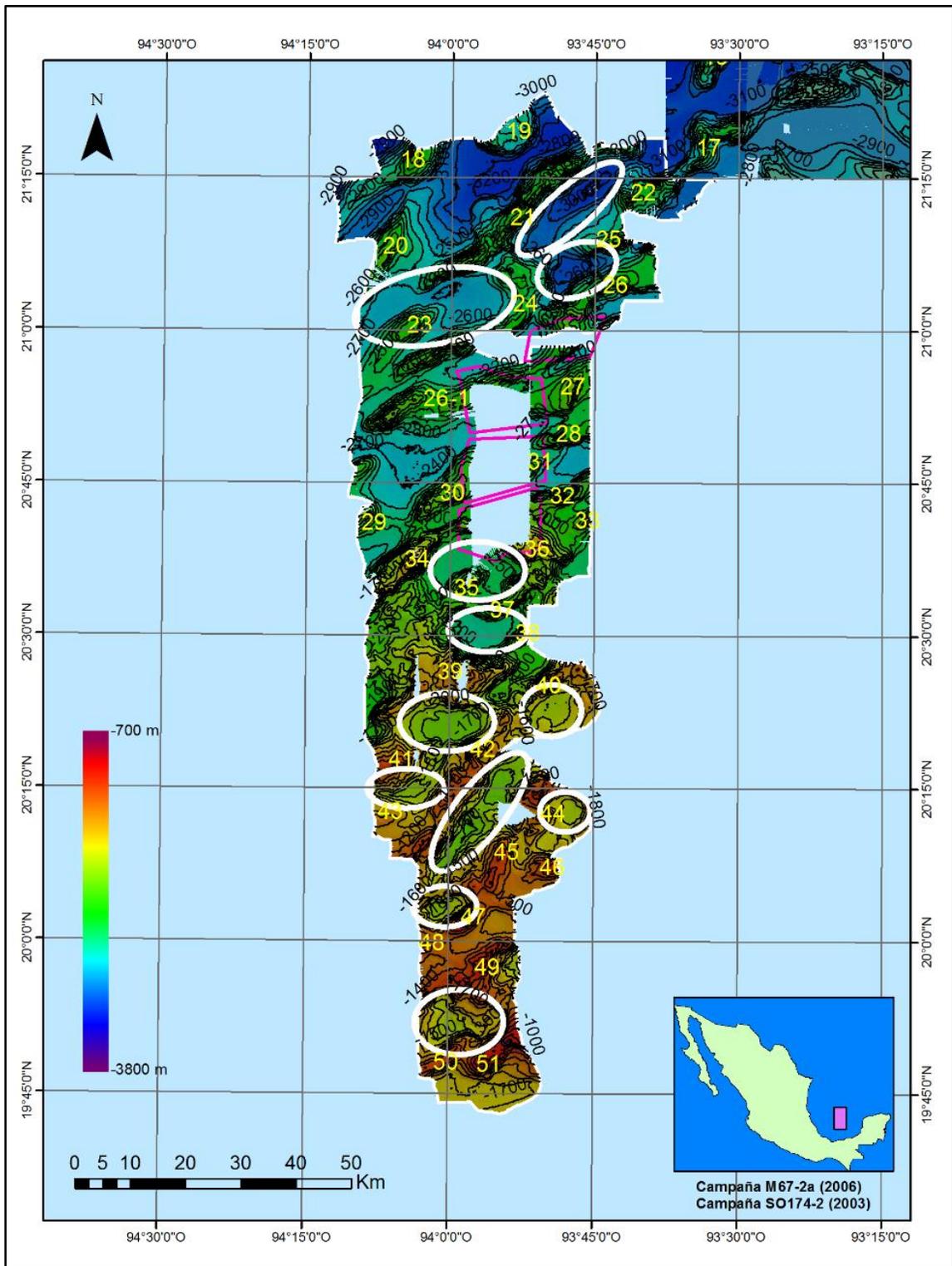


Figura 5.8. Valles cerrados en la zona sur. Elipses blancas: indican valles cerrados. Polígono rosa: posible continuación de cordilleras de domos donde hay ausencia de datos.

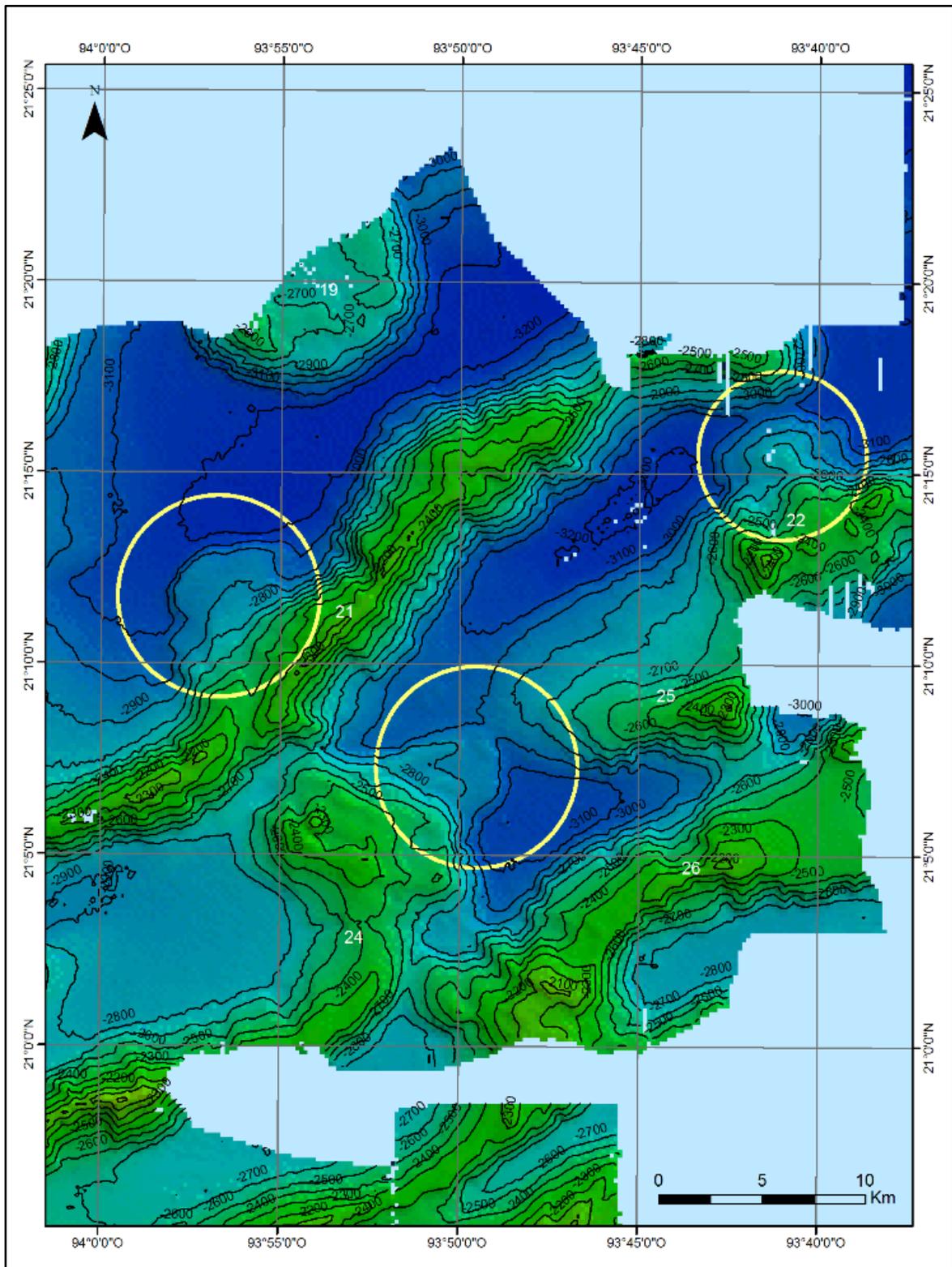


Figura 5.9. Derrumbes en los flancos de los domos al norte de la zona sur. En círculos amarillos se indica los derrumbes en los flancos de los domos 21, 22 y 24.

La figura 5.10 muestra que en la región central de la zona sur, alrededor del domo 39, se encuentra la morfología más compleja del área, se distingue por ser el domo más amplio de toda la carta batimétrica (526.41 km²).

El domo 39 presenta extensiones sobresalientes en los flancos este y oeste, que lo conectan con otras estructuras. Hacia el oeste se presentan dos elementos: i) una meseta que se extiende hacia el norte y oeste, y conecta con los domos 34, 35 y 36; ii) un domo alargado que se despliega hacia el SW. En el este tiene una extensión que se conduce hacia el NE; y al sureste se conecta con otro domo por medio de un puerto de unos 300 m de altura sobre el valle.

Los valles que se forman al norte y sur de este domo (marcados con elipses azules figura 5.10) son cuencas cerradas. La ladera del domo hacia el valle del norte es más abrupta que aquella hacia el valle del sur, y presenta una diferencia de altura de 1,300 m hacia la cima del domo. El valle sur alcanza una profundidad de 2,000 m y se conecta con un valle entre los domos 41 y 42.

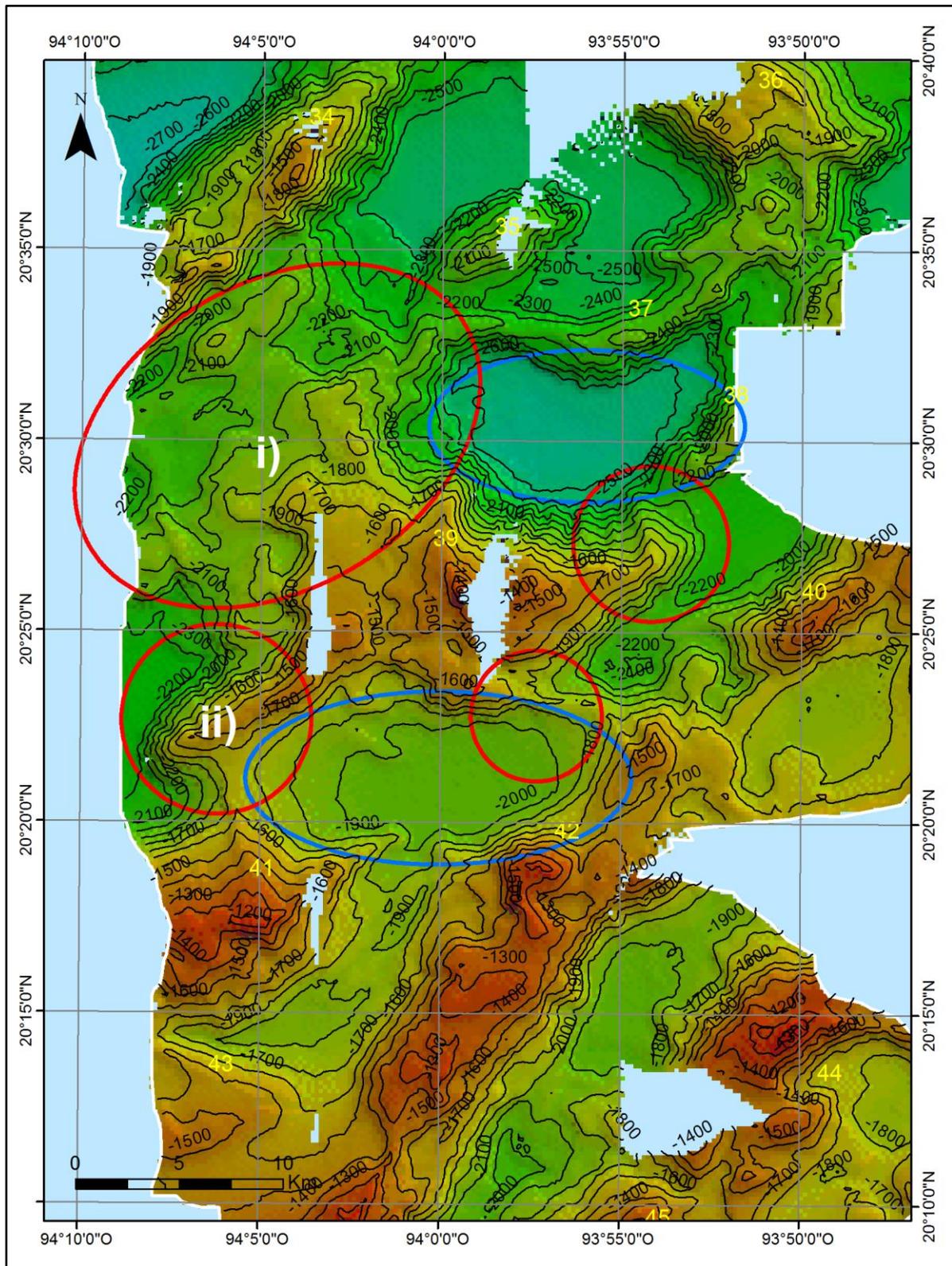


Figura 5.10. Detalles del domo 39. En rojo se señalan las extensiones el este y al oeste [i] Meseta que se extiende hacia el norte y oeste; ii) Domo alargado que se despliega hacia el SW. En azul se indican los valles al norte y sur.

5.2. Mosaicos de Retrodispersión Acústica

El mosaico de retrodispersión acústica contiene los datos de las campañas S0174-2 (2003) y M67-2a (2006) y tiene la misma extensión que la carta batimétrica. Los mosaicos de ambas campañas tienen un tamaño de celda de 50 m. Los valores de intensidad de *backscatter* se encuentran entre -10 dB a -30 db, los valores de alta intensidad se representan en color oscuro y los menos intensos en color claro. En el mosaico se observa que las cimas de los domos son generalmente dominadas por valores bajos de *backscatter*, mientras que en los flancos y en la línea de derrota se concentran valores altos.

Se observan diferencias entre los mosaicos de ambas campañas. Esto se debe a los parámetros empleados para el post-procesamiento, las correcciones aplicadas y el software utilizado. Por ejemplo, en los mosaicos de la campaña M67-2a la línea del nadir no es tan marcada como aquellas del mosaico de la campaña S0174-2. Por otro lado, los datos de retrodispersión acústica de la campaña M67-2a presentan problemas en los giros, donde los mosaicos se fragmentan y la imagen se difumina.

Del mismo modo que se hizo con la carta batimétrica, la compilación de mosaicos de imágenes acústicas se dividió en dos áreas: la zona norte, que incluye los mosaicos de las campañas S0174-2 y M67-2a; y la zona sur, donde únicamente se tienen mosaicos de la campaña M67-2a.

5.2.1. Área norte

El mosaico de imágenes de intensidad acústica (o de *backscatter*) de la zona norte incluye las dos campañas y tiene una extensión de 11,316.33 km² (figura 5.11). Los mosaicos de la campaña M67-2a están superpuestos sobre el mosaico de la campaña S0174-2. Se observa que la línea de derrota es más evidente en el mosaico de Ponce (2009). En la región central se observa que en el mosaico de Ponce (2009) la imagen presenta menos contraste que los mosaicos de este estudio.

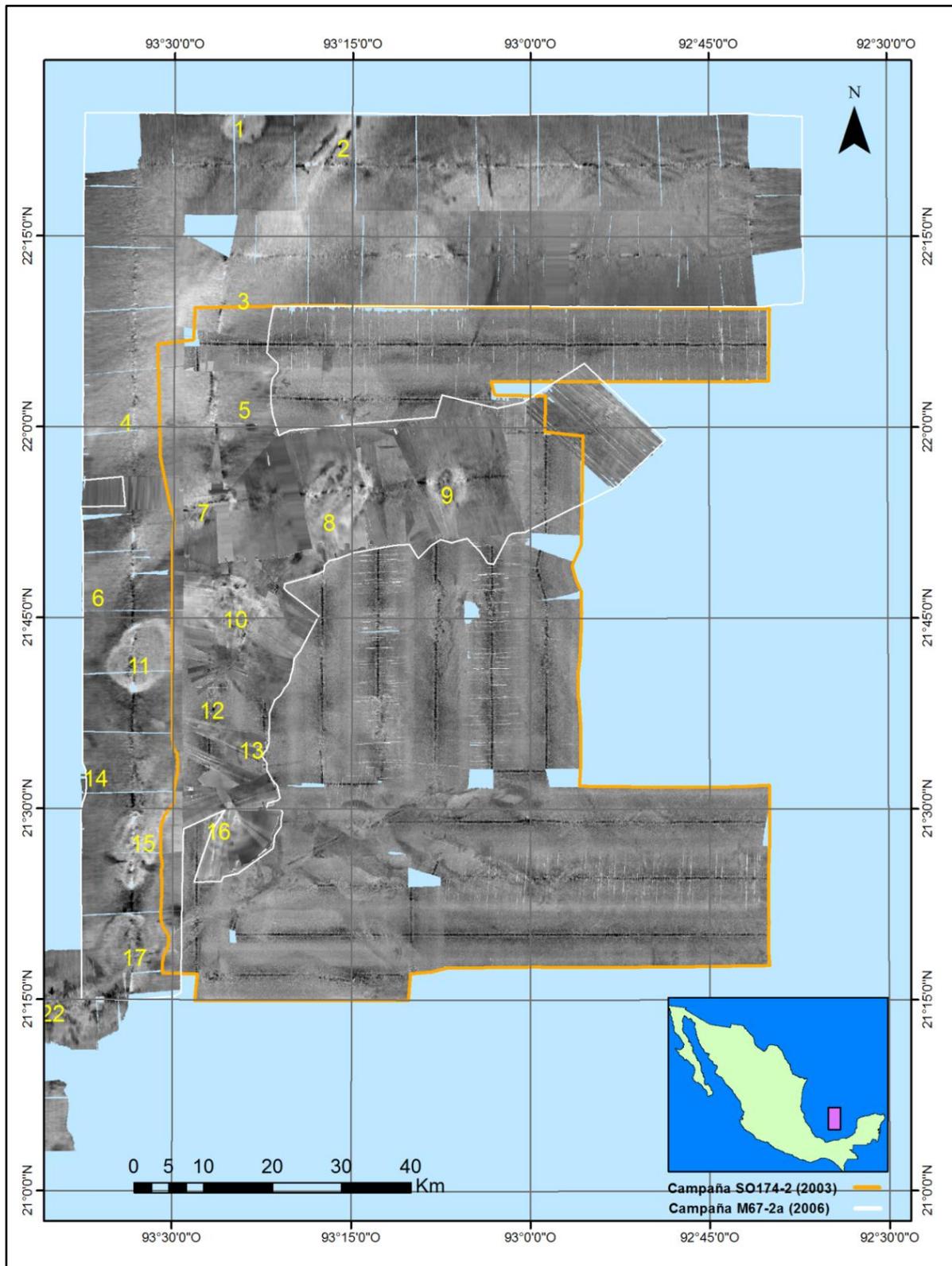


Figura 5.11 Mosaico de retrodispersión acústica de la zona norte. Campañas SO174-2 (2003) y M67-2a (2003).

En el mosaico se observa que la morfología de los domos se refleja en la imagen acústica con valores bajos de intensidad. En contraste, en el mosaico de Ponce (2009) no es tan evidente la presencia de domos. En el mosaico de este estudio, se puede observar claramente las bajas intensidades que corresponden al edificio de los domos 1, 2, 8, 9, 11, 15 y 17 (figura 5.12).

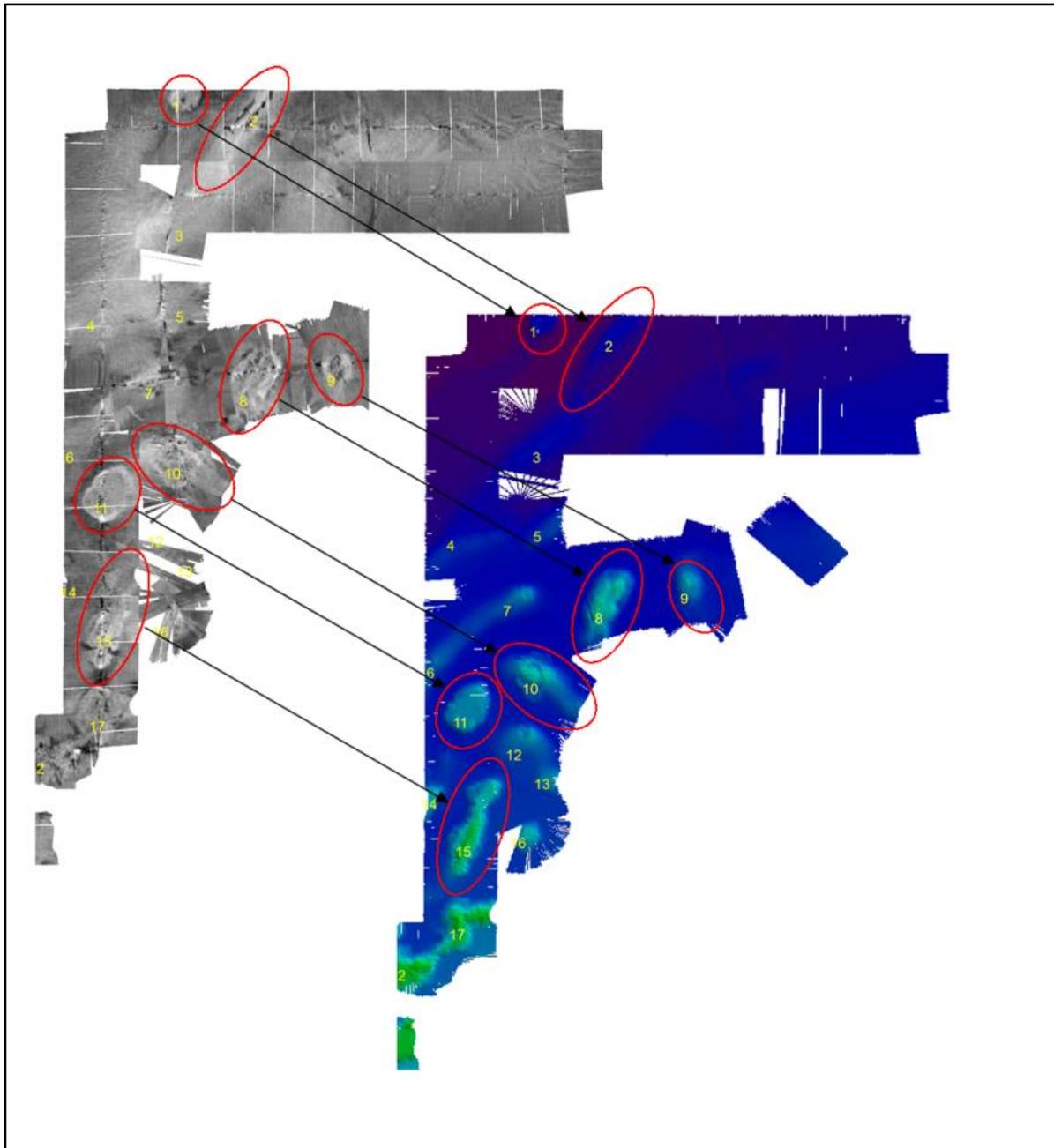


Figura 5.12 Morfología de los domos 1, 2, 8, 9, 10, 11 y 15 expuesta por valores altos de *backscatter*.

Los edificios de los domos se caracterizan por presentar valores bajos de intensidad acústica, sin embargo, algunos presentan parches de alta intensidad como se muestra en la figura 5.13 (polígonos color verde). También se observan zonas de alta intensidad en los flancos y cañones de los domos (figura 5.13, polígonos color rosa). Con elipses azules se señala secciones donde se observan los canales de la zona noreste. Estos canales presentan en general alta intensidad acústica, aunque en algunas partes del mosaico ésta se pierde.

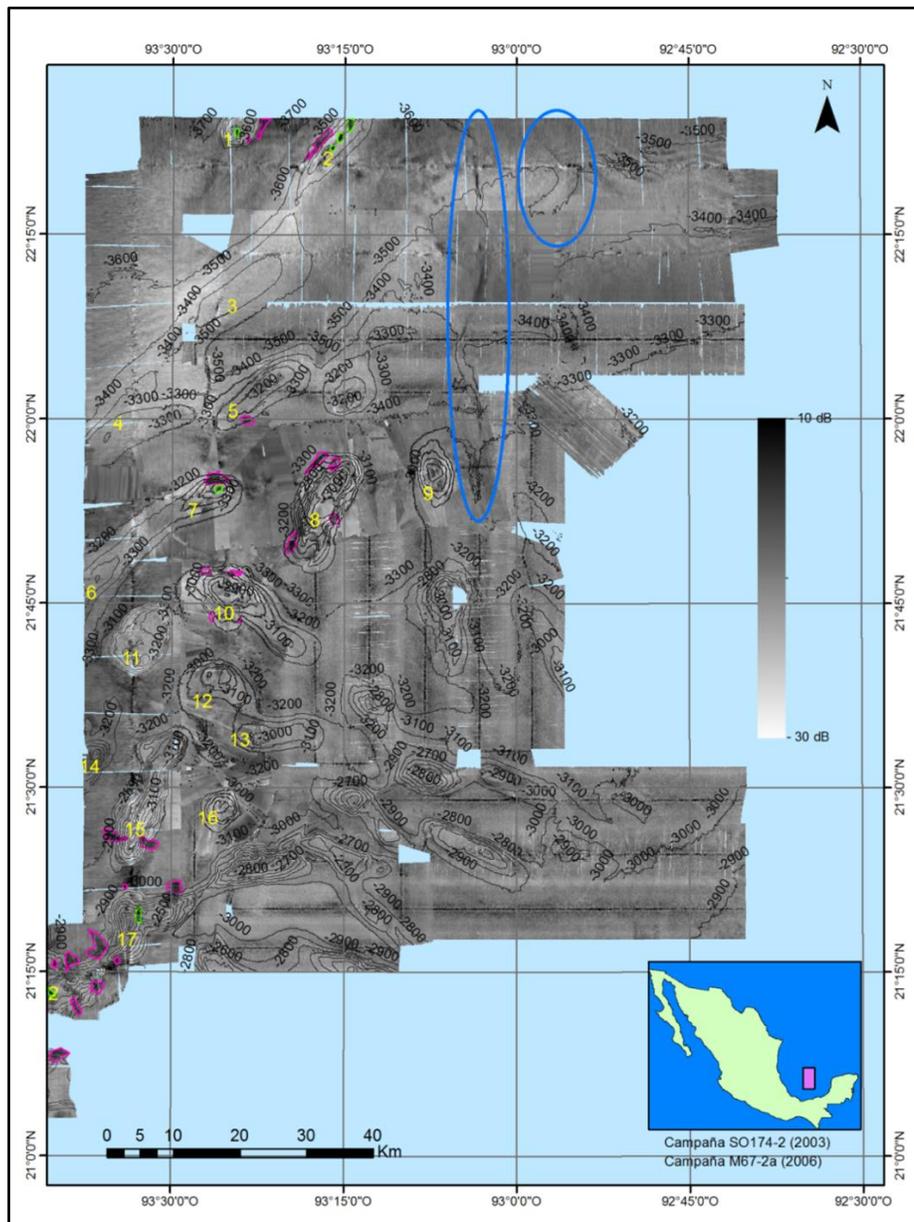


Figura 5.13 Zonas de alta intensidad acústica ubicadas en las cimas (polígonos color verde), y en los flancos y cañones de los domos (polígonos color rosa). En color azul se indican los canales sobre los mosaicos de ambas campañas, se observa que se interrumpen en algunas partes de su trayectoria. Campaña SO174-2 (2003) y M67-2(2006).

La figura 5.14 muestra los mosaicos de ambas campañas sobre el domo Chapopote (número 7), en contornos rosa se indican las altas intensidades en los flancos y en verde las altas intensidades en la cima. En este domo (figura 5.14 (a y c)) se aprecian dos zonas de alto *backscatter*, una ubicada en la cima y otra en el flanco al norte, que coinciden en su ubicación con el mosaico de la campaña S0174-2 (figura 5.14 (b y d)).

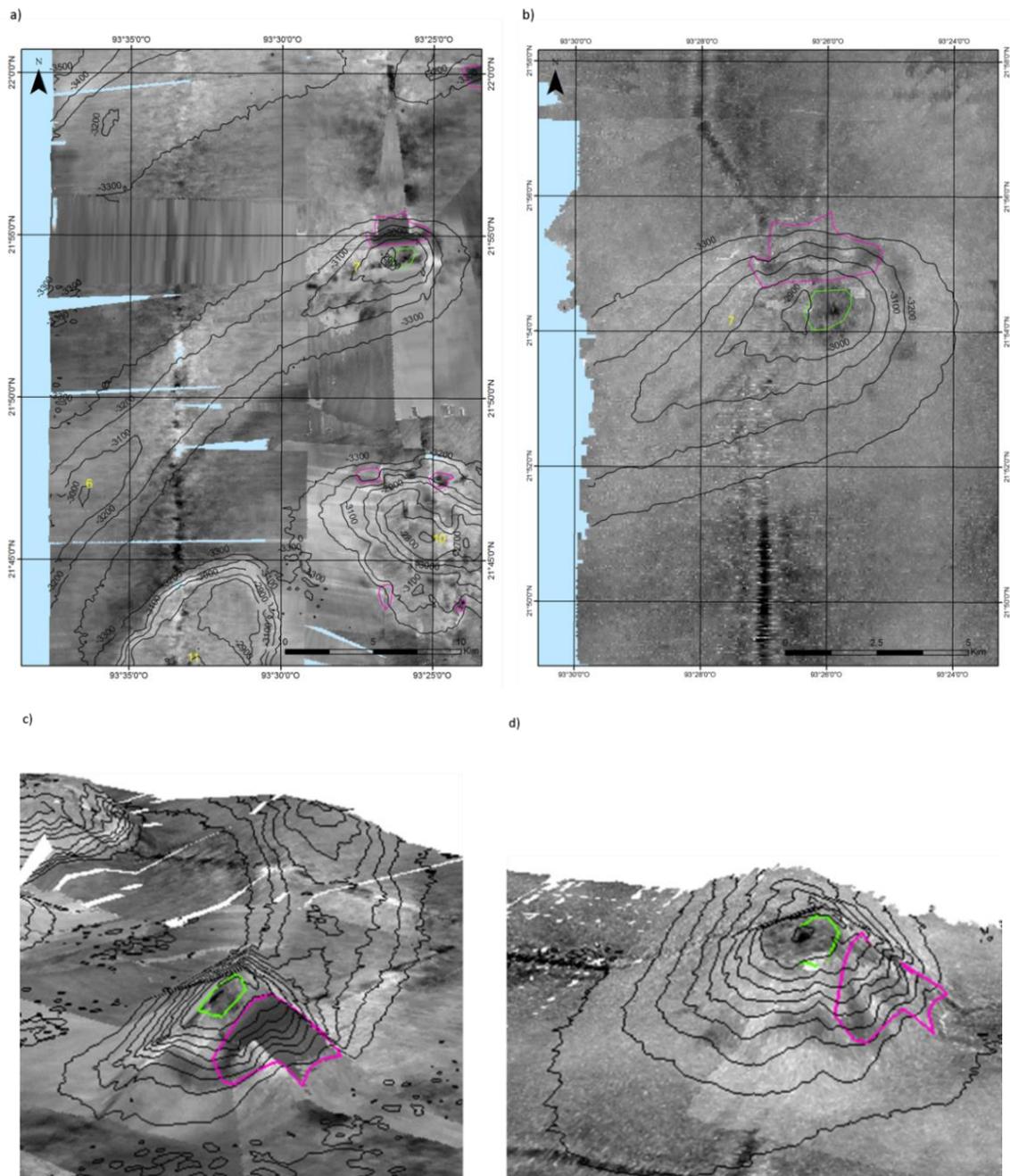


Figura 5.14. Mosaico de imágenes retrodispersión acústica del domo Chapopote. (a) y (c) pertenecen a la campaña M67-2a (2006) y (b) y (d) a la campaña S0174-2 (2003). En (c) y (d) se ilustra el domo en imagen 3D con vista hacia el suroeste.

Durante la campaña M67-2a se confirmó la presencia de asfaltos en la zona de alta intensidad en la cima (figura 5.14 en contornos verdes) mediante toma de núcleos y grabación con equipo de video-telemetría. También en el área occidental de la zona de alto *backscatter* (figura 5.14 en contornos rosas) se observó hacia el cañón material que se interpretó como asfalto, carbonatos o sedimentos litificados [Weinrebe et al., 2010]. La presencia de estos asfaltos fue registrada por primera vez en la campaña SO174-2 [Bohrmann et al., 2004].

5.2.2 Área sur

El mosaico del área sur tiene una extensión de 6,362.82 km² aproximadamente, y contiene únicamente datos de retrodispersión acústica de la campaña M67-2a (figura 5.15). Se observa que, como en el área norte, los edificios de los domos presentan bajas intensidades acústicas, sin embargo, la diferencia es menos clara con respecto de los valles.

La figura 5.16 muestran las zonas de alta intensidad en los flancos y cañones de los domos (con contornos rosas) y en las cimas de los domos (con contornos verdes).

Los mosaicos se construyeron con líneas de datos que tienen diferentes trayectorias, lo que provoca que las líneas de nadir se intersequen en varios puntos y los patrones de ensonificación sean diferentes, dando un aspecto “parchado”. Los valores de alta intensidad sobre la línea del nadir en dichas zonas “parchado” interfieren en el análisis de la imagen. Pueden existir falsos positivos en las zonas de alta intensidad causados por errores en la corrección del patrón del haz, por la intersección de las líneas de navegación o los materiales que componen el lecho marino.

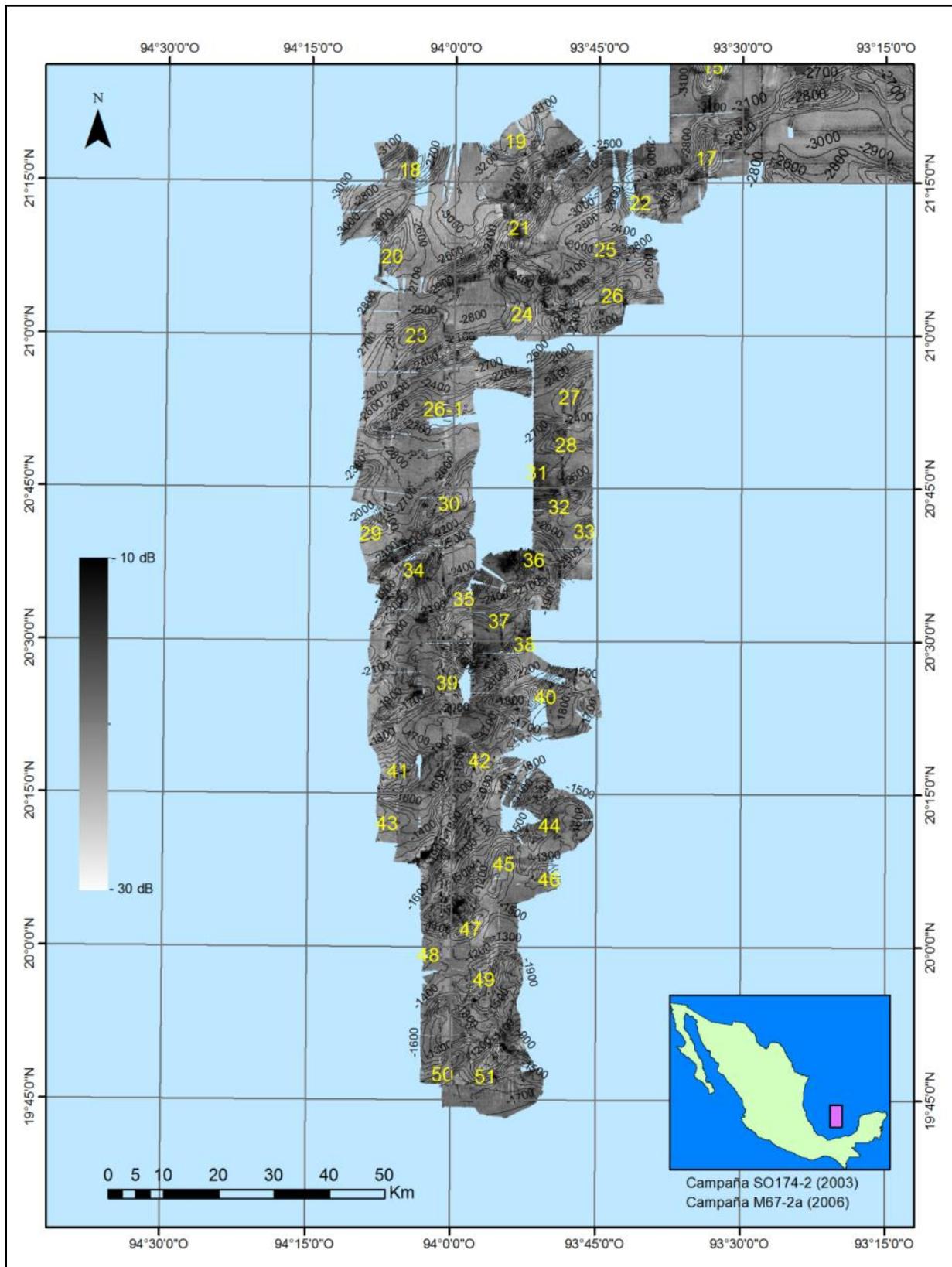


Figura 5.15 Imagen de retrodispersión acústica de la región sur de la campaña M67-2a.

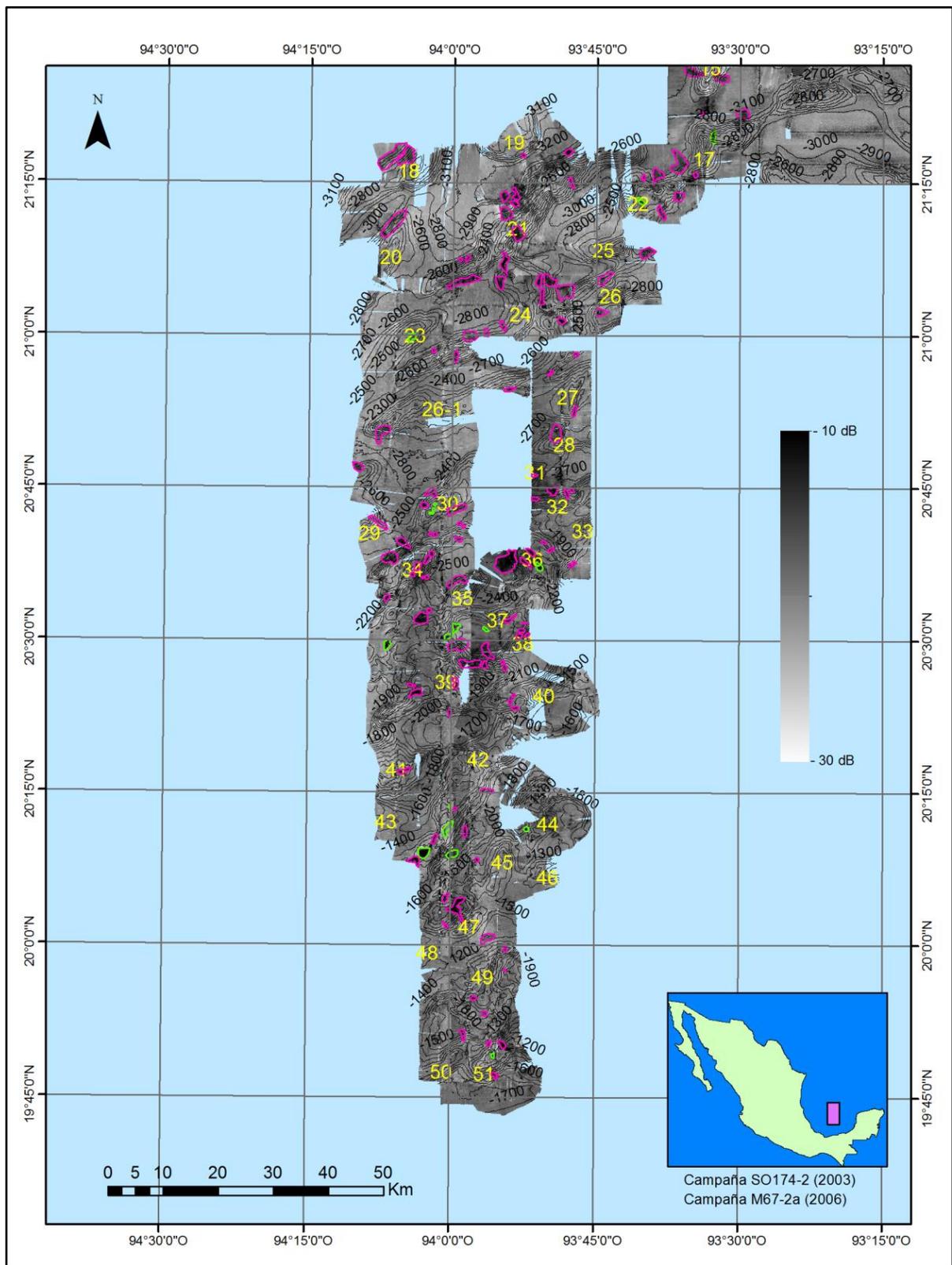


Figura 5.16. Zonas de alta intensidad de *backscatter* en la región sur del mosaico de la campaña M67-2a. En color rosa se señalan las zonas de alto bs que se encuentran en los flancos y cañones de los domos, en color verde se indican las zonas de alto bs que se encuentran en las cimas de los domos.

El domo 21 (figura 5.17) se encuentra en la zona central del área de estudio, tiene una longitud aproximada de 51 km y tiene una diferencia de 950 m entre su cima y su base. Se caracteriza por tener zonas de alto *backscatter* en sus flancos las cuales se presentan en áreas de pendiente abrupta y a lo largo de su base. El punto verde señala un área de estudio llamada “oil ridge” en la que se observaron manchas de petróleo y estudios de sísmica multicanal revelaron lo que podría interpretarse como un depósito de gas poco profundo [Weinrebe *et al.*, 2010].

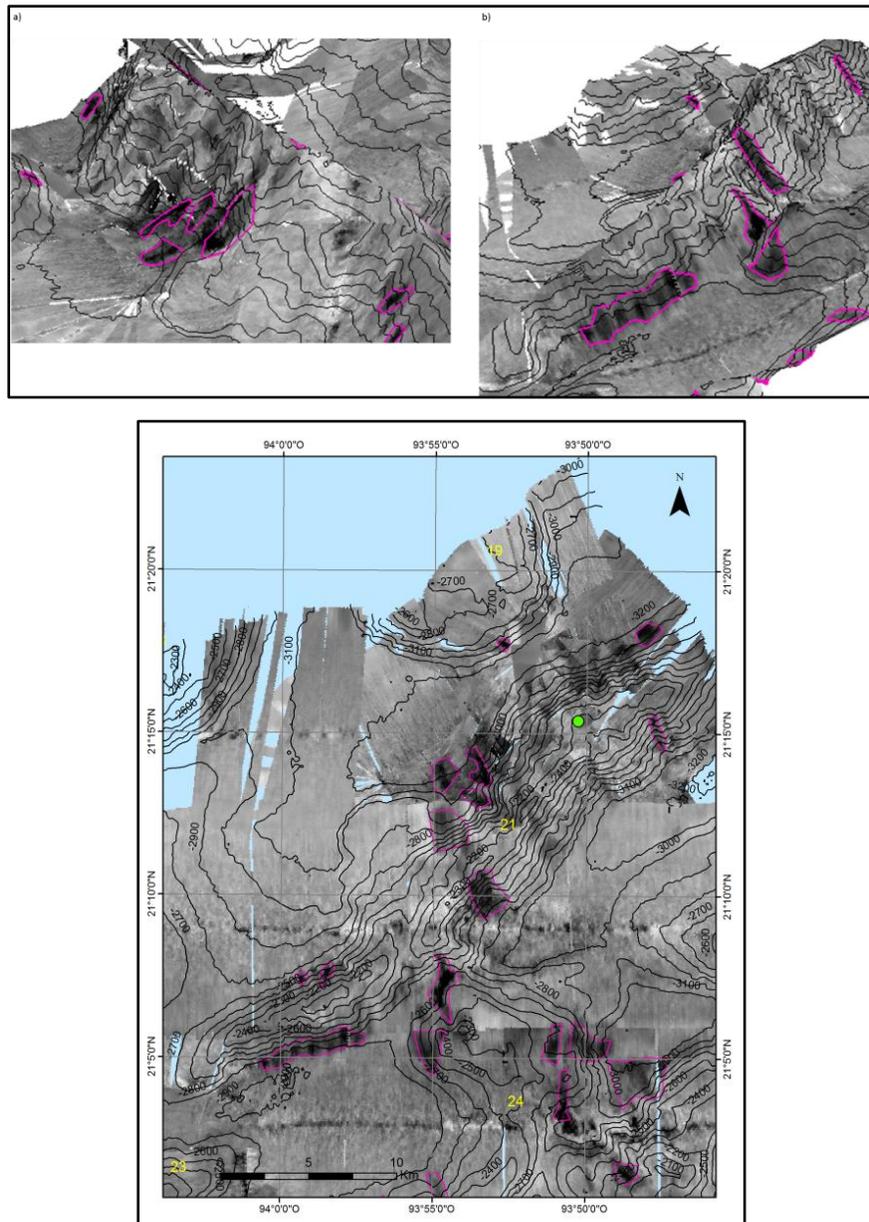


Figura 5.17 Mosaico del domo 21 visto en 3D (a) flanco izquierdo (b) flanco derecho. Vista en planta, el punto verde señala un área de estudio conocida como “oil ridge”. Campaña M67-2a (2006).

Análisis de batimetría

La morfología del lecho marino en el área de los Domos de Campeche que se aprecia en las cartas batimétricas con datos multihaz de las campañas S0174-2 (2003) y M67-2a (2006) es consecuencia del depósito de sal que gradualmente disminuye hacia el norte. La disminución de depósitos de sal es tan evidente en la región norte que da lugar a amplios valles y domos aislados.

La mayor actividad del lecho marino se refleja en la zona sur, lo que hace a esta zona bastante compleja, y puede deberse a que las estructuras se encuentran sometidas a esfuerzos de fallas normales que ejerce el movimiento de sal. La sal asciende siguiendo las debilidades causadas por las fallas normales formando paredes de sal (*salt walls*), resultando estructuras alargadas con dirección noreste y noroeste. La forma de los domos y cordilleras queda sujeta entonces a la tectónica salina y al depósito de sedimentos. El cambio de la dirección de las cordilleras y domos que se observa en la zona norte de la carta batimétrica puede reflejar el proceso de apertura que tuvo el Golfo de México durante el periodo Jurásico.

Las extensiones en los flancos de los domos pueden deberse al deslizamiento y compactación de los sedimentos ocasionados por la reactivación de la sal. La forma circular y cima casi plana que presentan los domos 1, 11 y 19 sugiere que se trata de diapiros con sobre carga anisotrópica, es decir, se tienen múltiples capas que al someterse a los esfuerzos de la sal ascendente no fallan en los bordes, sino se flexionan, al arquearse suavemente las capas forman un anticlinal con cima redondeada y no puntiaguda [Jackson and Hudec, 2017].

El canal más largo que se observa en la zona norte puede relacionarse a corrientes de turbidez que están sujetos al mecanismo de disparo de deslizamientos en masa que obedecen a la pendiente general del área de estudio (dirección noroeste).

Análisis mosaicos

El área de estudio se caracteriza por la presencia de domos salinos que pueden actuar como trampas petroleras, es por ello que desde hace años esta región del Golfo de México ha sido el foco de estudios geológicos y geofísicos [Mendoza, 2000]. Los valores de alta intensidad de *backscatter* que se presentan en los domos, ya sea en las cimas o en los cañones de los flancos podrían reflejar la presencia de derrames asfálticos o hidratos de gas. Los

valores de alto BS en los flancos y cañones podrían ser ocasionados también por la compactación del sedimento después de haber ocurrido procesos de deslizamiento. Las zonas de bajo backscatter que no se asocian a la morfología del domo podrían ocasionarse por posibles acumulaciones de gas dentro del sedimento, así como material blando.

6. Conclusiones

En este trabajo se realizó por primera ocasión el análisis y post-procesado de los datos de batimetría y retrodispersión acústica adquiridos durante la campaña M67-2a (2006). Con esta integración, la tesis produce una carta batimétrica de alta resolución con su mosaico de imágenes de retrodispersión acústica. A través de la carta batimétrica, se reconoce a mayor detalle el relieve del lecho marino de la provincia de los Domos de Campeche (cubriendo una superficie aproximada de 17,500 Km², un 26% de los ~66, 942 km² de esta provincia) en el sector sur del Golfo de México.

En general después del procesamiento, los modelos digitales de elevación, resultados de ambas campañas: M67-2a (2006) y SO174 (2003), mostraron un buen empalme y no se observaron cambios asociados a la toma de registros, lo cual refleja que las suposiciones y elecciones tomadas en el procesamiento batimétrico para la corrección de velocidad del sonido y marea han sido adecuadas. La resolución de 200 m en la carta batimétrica es producto solo del área ensonificada en el fondo marino, permitiendo a su vez tener un modelo batimétrico mas representativo de su relieve a esa escala espacial (menos celdas vacías).

La presencia de domos aumenta norte a sur. En el sector norte los valles entre los domos aislados son extensos, pero su extensión disminuye hacia el sur. Hacia el sur las estructuras dómicas predominan en forma de cordilleras orientadas preferentemente al noreste y los valles son de menor área.

La morfología de toda la carta batimétrica se asocia a la presencia de sal depositada a través de los sedimentos y sugiere que la presencia de ésta es mayor hacia el sur y disminuye hacia el norte. En la parte norte, donde los domos están aislados, las estructuras dominantes posiblemente son causadas por diapiros. En la parte sur, donde los domos forman largas cordilleras, las estructuras podrían estar relacionadas con paredes de sal en combinación con diapiros. Este movimiento quizá esté conducido a través de sistemas de fallas normales de crecimiento, producto del movimiento de los cuerpos salinos que subyacen bajo los grandes espesores de sedimentos listricos.

En los mosaicos de imágenes de retrodispersión acústica fue posible identificar zonas de alto *backscatter* en las cimas, flancos y cañones de los domos, estas zonas son

interpretadas a lechos con un contenido de mayor dureza debido a su composición litológica. Estas zonas pueden ser zonas de emanación de hidrocarburos, como lo presentan los resultados de ambas campañas de investigaciones en el domo Chapopote.

Al comparar los resultados del procesamiento de ambos cruceros se pudo conocer las ventajas en el procesado de datos de retrodispersión acústica. Por ejemplo, la corrección del patrón del haz que permitió disminuir las contribuciones del *backscatter* en la línea a lo largo del nadir que marca la derrota, también se atenuó el bandeamiento debido al traslape entre barridos. Teniendo mejores resultados a los que se obtuvieron en los mosaicos de Ponce [2009].

Por otro lado, parte del procesamiento hecho para los datos de M67-2a en el que el software no permite conocer con exactitud el desarrollo de ejecución, provoca una textura de “parches” en los mosaicos que dificulta la interpretación. También la imposibilidad de exportar los mosaicos de retrodispersión acústica en un formato distinto a *imagen* limita la interpretación a modo cualitativo, tomando esto en cuenta y también el hecho de no contar con muestras del lecho marino, queda limitada la determinación específica del material que lo compone.

La batimetría y los mosaicos resultantes se vieron afectados por la velocidad y ángulo en el que fueron tomados en las zonas de giro en la trayectoria del barco, quizá deba considerarse la manera de eliminarlos de algún modo para estudios posteriores. La resolución espacial de 50 m en las imágenes de retrodispersión acústica permitió tener mayor variabilidad en el reconocimiento de la morfología que tiene el lecho marino en esta región la carta batimétrica y las imágenes de retrodispersión acústica fueron de 200 m y 50 m respectivamente, lo cual funcionó de manera adecuada para este trabajo. En el caso de los mosaicos fue más factible utilizar una resolución menor ya que, al tener mayor variabilidad que la batimetría, el fenómeno de *backscatter* requiere más detalle.

Al fusionar los datos de la campaña M67-2a con los del S0174-2 fue posible: incrementar el conocimiento morfológico del área norte de los Domos de Campeche y sus cambios ocurridos en la superficie del lecho marino en el transcurso de 3 años. Estos resultados sugieren dar continuidad a la investigación de la génesis de estos cambios en la

morfología y composición en sitios donde las imágenes de *backscatter* presentan zonas de alta intensidad, en particular en los domos.

Anexos

Anexo 1

La Ecosonda EM120 tiene una frecuencia nominal de 12 KHz con un ángulo de cobertura de 150 grados y 191 haces por ping equiespaciados 1 grado.

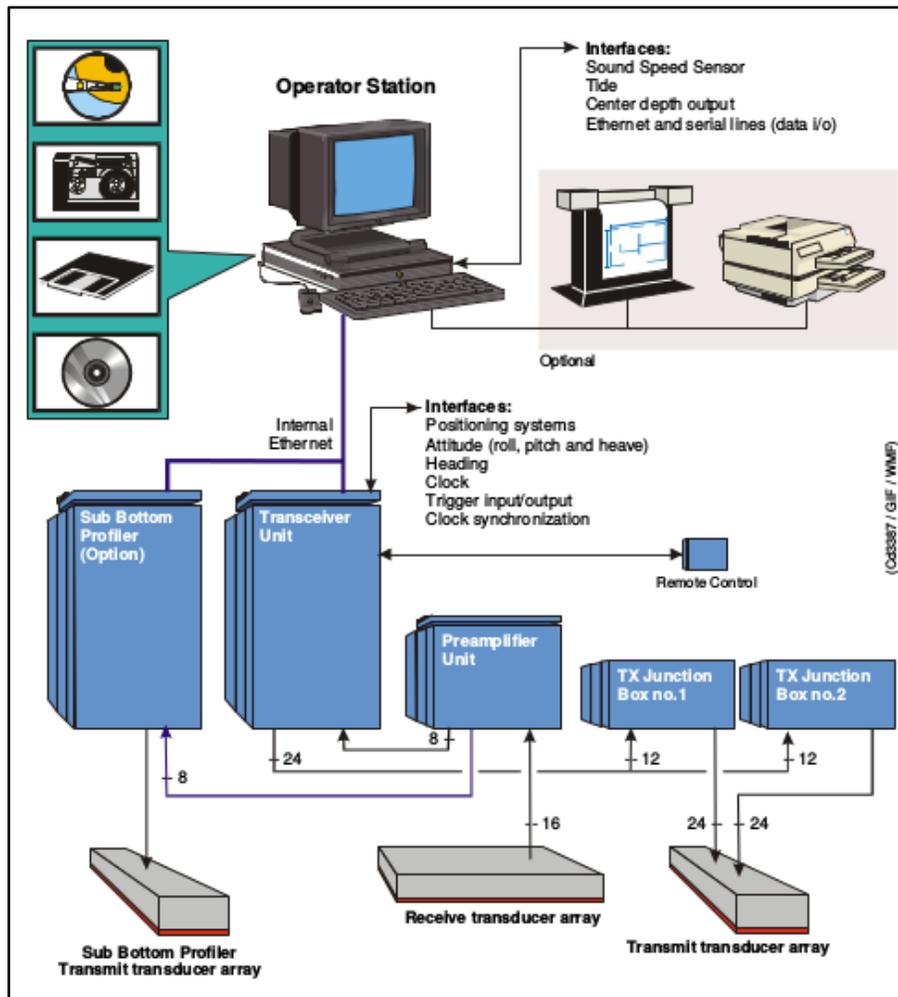


Figura I. Diagrama del sistema [Kongsberg, 2005].

La ecosonda multihaz EM 120 consta de las siguientes unidades:

- Arreglo de transductores de transmisión (con caja(s) de conexión TX)
- Arreglo de transductores de recepción
- Unidad de Transceptor
- Unidad de Preamplificador
- Estación del operador

Arreglo de transductores

El arreglo de transductores de transmisión contiene hasta 48 módulos que estará en función de la anchura del haz elegida. Cada módulo contiene 18 elementos dispuestos en filas de 6 elementos, a través de la caja de conexiones TX, cada elemento se conecta de manera individual a su transmisor correspondiente en la Unidad Transmisora.

Transductor de recepción

El transductor de recepción contiene hasta 16 módulos, dependerá de la anchura del haz elegida. Cada módulo contiene 8 pentagramas de transductor, los cuales tienen conexiones eléctricas individuales a sus preamplificadores correspondientes de la Unidad de Amplificador.

Unidad Transceiver

La Unidad Transceiver contiene los elementos de electrónica y procesadores, tanto de la transmisión como la recepción, para la formación del haz, la detección del fondo y el control de los parámetros con respecto a la ganancia, la tasa del ping y los ángulos de transmisión. Tiene interfaces serie para todos los sensores externos tales como: la actitud del buque (roll, pitch, heading, heave), su posición, y el reloj externo. La Unidad Transceiver se conecta a la Estación del operador mediante un cable Ethernet.

Unidad de preamplificador

La unidad de preamplificador contiene los preamplificadores para las señales de recepción; también proporciona el circuito de división de frecuencia para alimentar señales de baja frecuencia al perfilador de sub-fondo opcional.

Estación del operador

La estación de trabajo del operador es la estación PC de doble procesador HWS 10 de alto rendimiento. El software del operador es el Seafloor Information System (Sistema de Información del Fondo Marino), desde el cual se accede para la configuración de los parámetros de instalación y ejecución de la ecosonda, el registro de datos y la ejecución de autoprueba.

Anexo 2

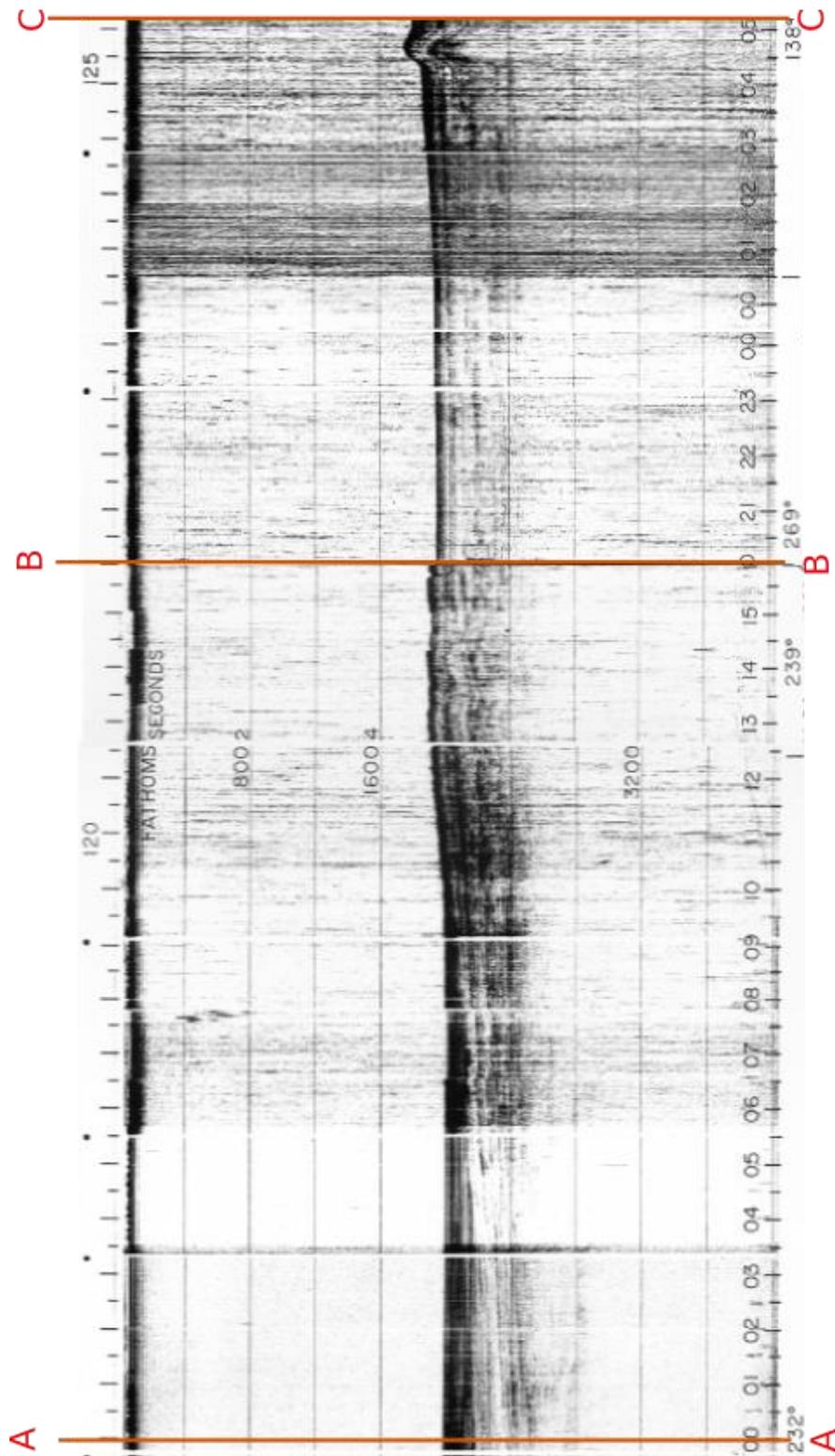


Figura II. Perfil sísmico, secciones AB y BC. Campaña V2024, Cortesía del Lamont-DohertyEarthObservatory a través del NGDC.

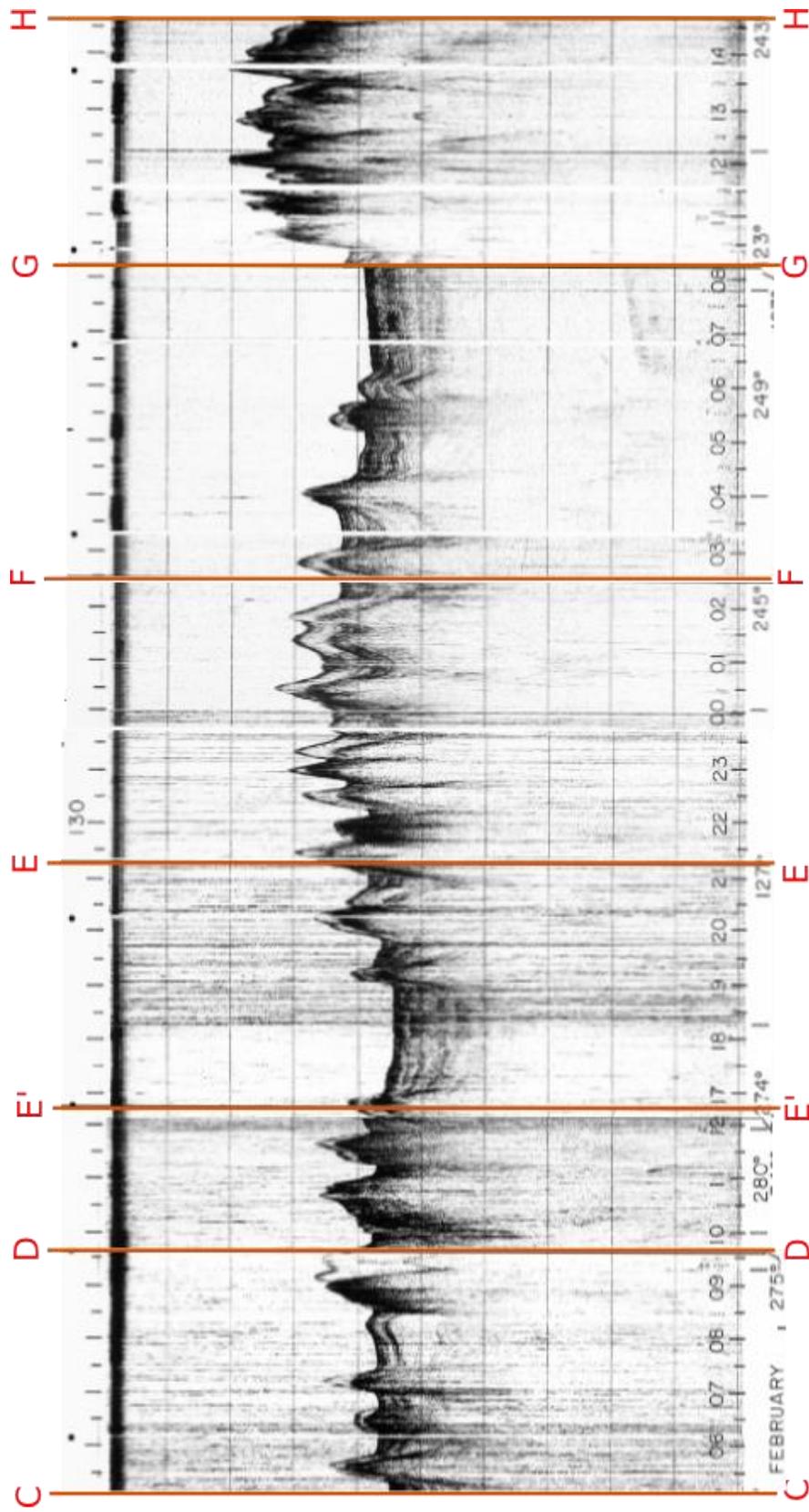


Figura III. Perfil sísmico, secciones CD, DE', E'E, EF, FG y GH. Campaña V2024, Cortesía del Lamont-DohertyEarthObservatory a través del NGDC.

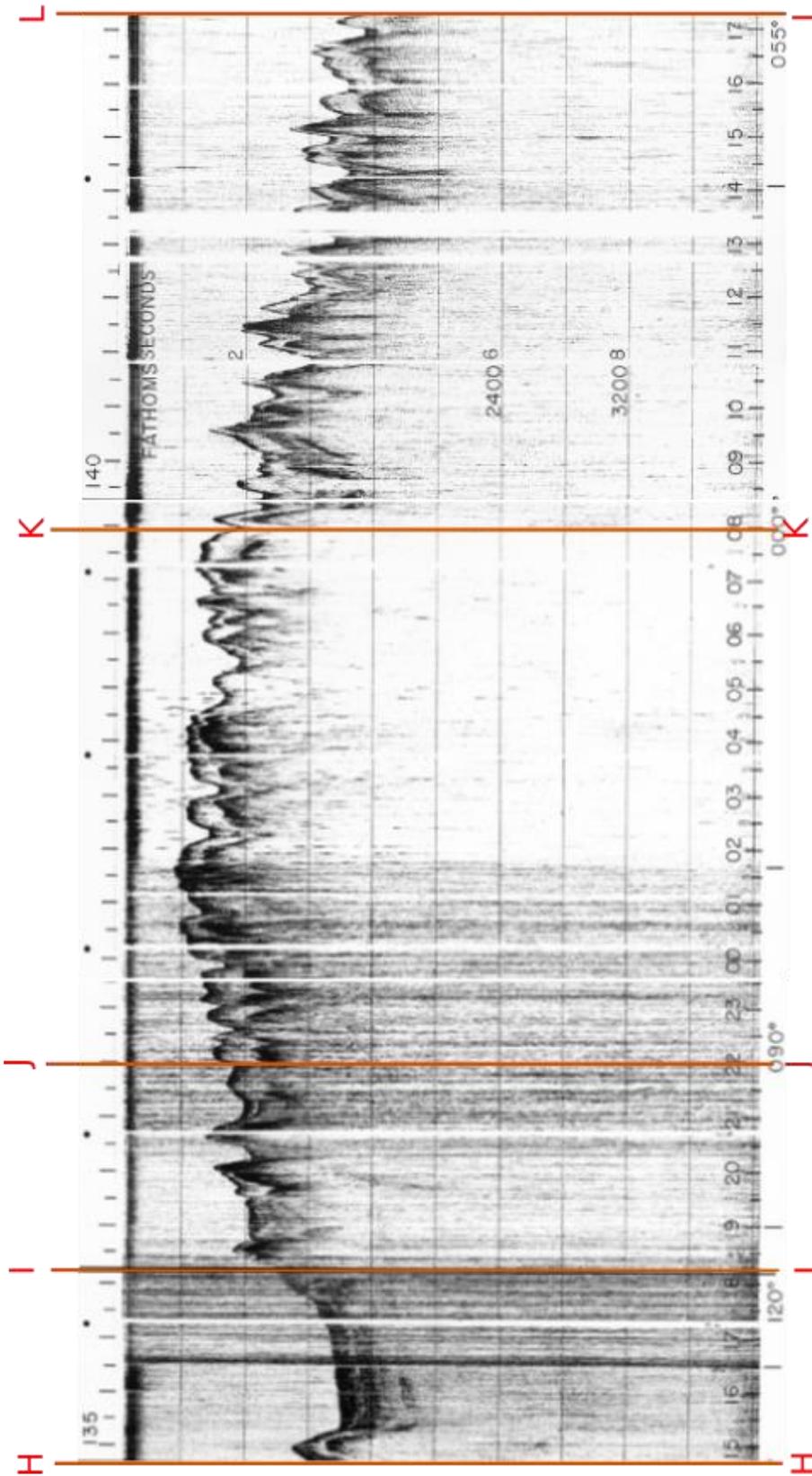


Figura IV. Perfil sísmico, secciones HI, IJ, JK y KL. Campaña V2024, Cortesía del Lamont-DohertyEarthObservatory a través del NGDC.

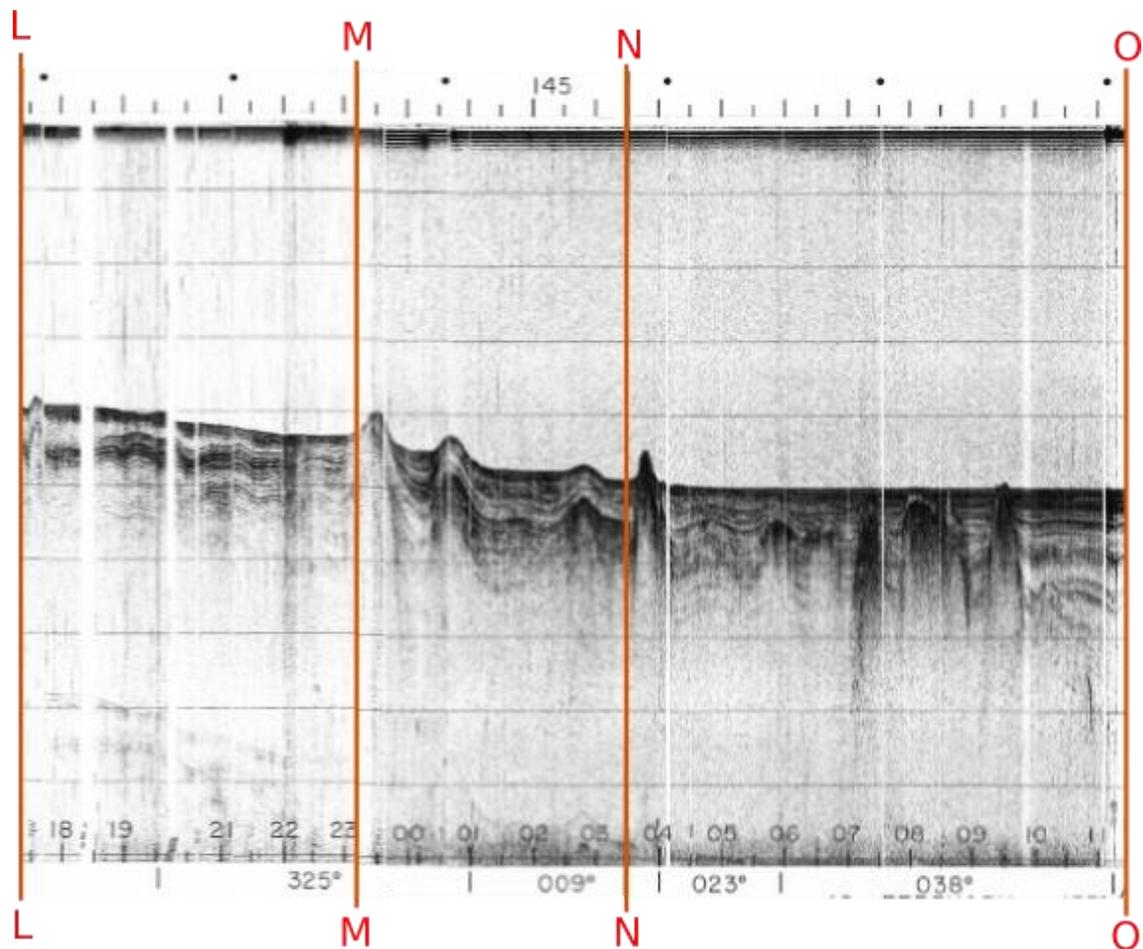


Figura V. Perfil sísmico, secciones LM, MN y NO. Campaña V2024, Cortesía del Lamont-DohertyEarthObservatory a través del NGDC.

ANEXO 3

Archivo de embarcación

El archivo de embarcación es un requisito necesario para cualquier proyecto que se realice en Caris. Se crea con el editor “Vessel Editor” y tiene como objetivo combinar toda la información de los sensores para crear un registro de la posición y la profundidad final, se requiere ingresar las dimensiones del buque, la posición y calibración de los equipos instalados.

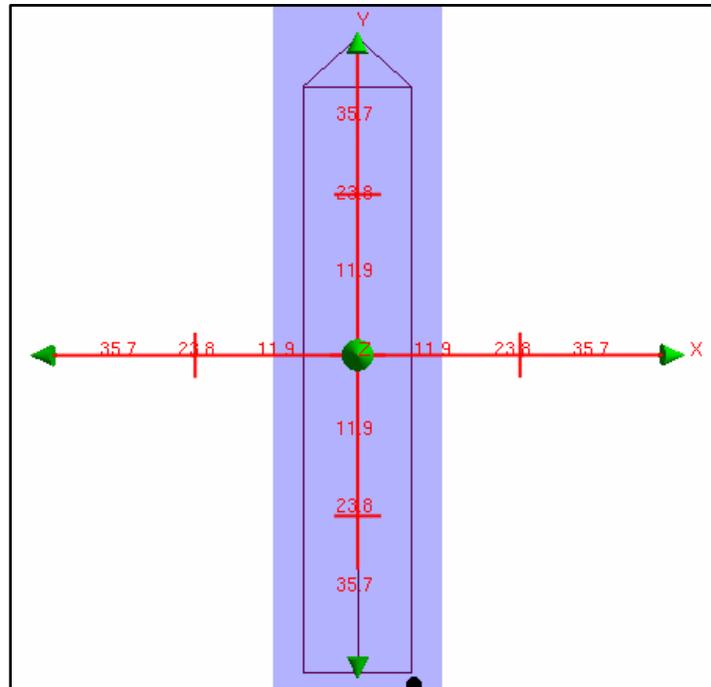


Figura VI. Dimensiones del buque RV Meteor, visto en planta.

Creación del proyecto

Crear un proyecto nos permite organizar el conjunto de datos que deseamos procesar, a dicho proyecto se le asigna un nombre, se le agrega un archivo de embarcación, las fechas de adquisición de los datos separadas por día y muy importante, se asignan los parámetros geográficos. En nuestro caso utilizamos el sistema WGS84, zona UTM 15N.

Conversión de datos en bruto

Este paso consiste en importar nuestros datos que se encuentran almacenados en archivos con extensión .all, al software Caris para convertirlos en un formato que pueda leer. Nuestros datos se convirtieron a formato Simrad, fue necesario asignar el proyecto, archivo de embarcación, fecha, y proyección geográfica correspondientes.

Cargar marea

Caris requiere un archivo que contenga datos de marea de la zona de estudio, sin embargo en nuestro caso se utilizó un archivo de marea cero, debido a que en zonas de grandes profundidades la variación de marea no provoca afectaciones relevantes en la adquisición de los datos.

Combinar (Merge)

Al aplicar la combinación, lo que se realiza es un cálculo de las profundidades y posiciones geográficas finales. Se crea un archivo de profundidades procesadas para cada línea, este archivo contiene la posición geográfica calculada final para cada registro de profundidad. Es importante mencionar que el Merge debe realizarse después de la corrección de velocidad del sonido (la cual se detalla más adelante).

Definir nuevas hojas de campo

Este proceso es fundamental para la creación de superficies Base. Consiste en un archivo de definición de la hoja de campo y otro archivo CARIS que almacena productos vectoriales. El archivo de definición contiene información sobre el límite geográfico de la hoja de campo y el sistema de coordenadas que se utiliza para los productos de los datos. Las hojas de campo, nos permiten crear superficies Base, capas de contornos o mosaicos, capas de sondajes, generar perfiles desde la superficie Base, crear un mosaico de datos de barrido lateral y seleccionar datos de una capa de mosaicos.

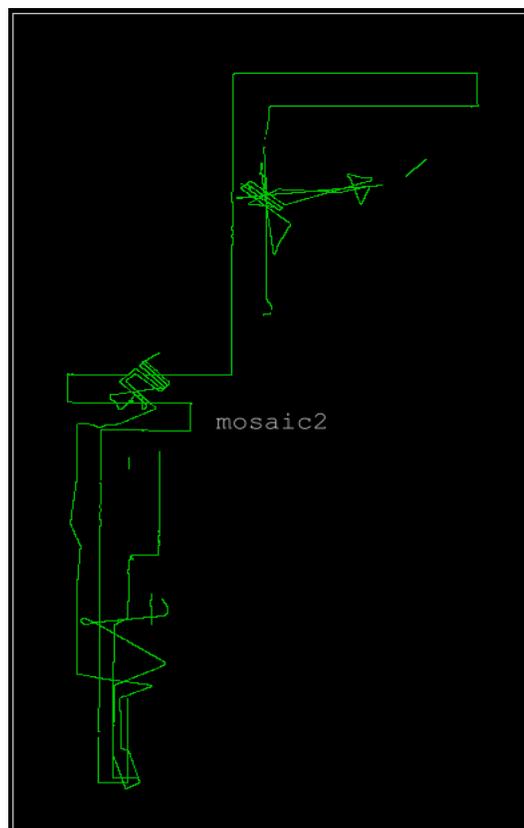


Figura VII. Representación de las líneas de navegación dentro del área asignada para la hoja de campo.

Anexo 4

La limpieza de datos en Caris se puede realizar con dos herramientas: Swath Editor (Editor de bandas de sondeos) y Subset Editor (Editor de subconjuntos).

Swath Editor

El Swath Editor muestra múltiples vistas de los datos, la limpieza de datos consiste en seleccionar y rechazar sondeos de forma interactiva así como utilizar funciones de filtrado comprobadas y eficientes para detectar y rechazar automáticamente valores atípicos.

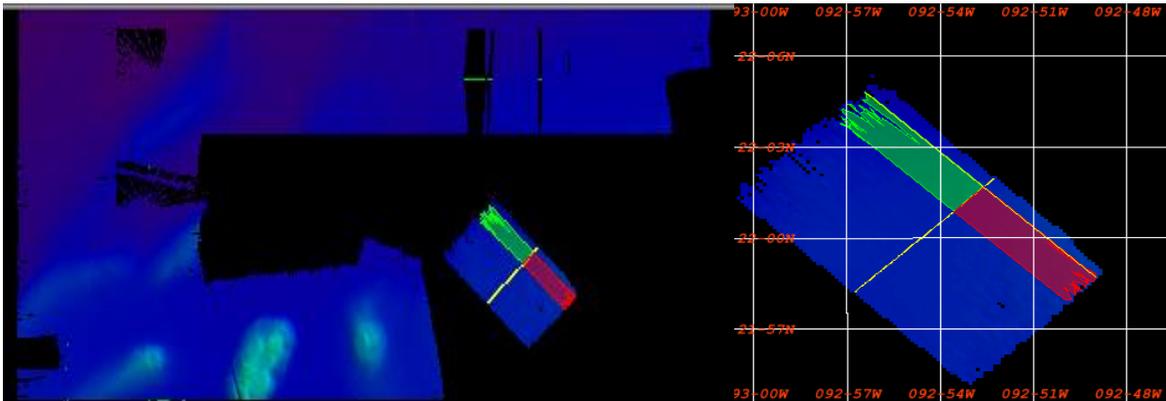


Figura VIII. Área seleccionada para realizar limpieza con Swath Editor.

A continuación se muestran algunas de las vistas que se utilizaron para analizar los datos.

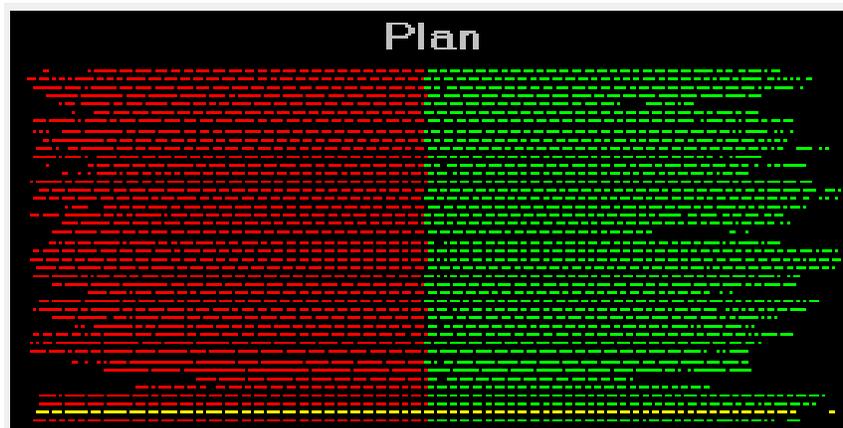


Figura IX. Plan View. La vista de planta presenta una vista aérea de los haces y los perfiles del swath, los cuales están espaciados por igual en la dirección along-track.

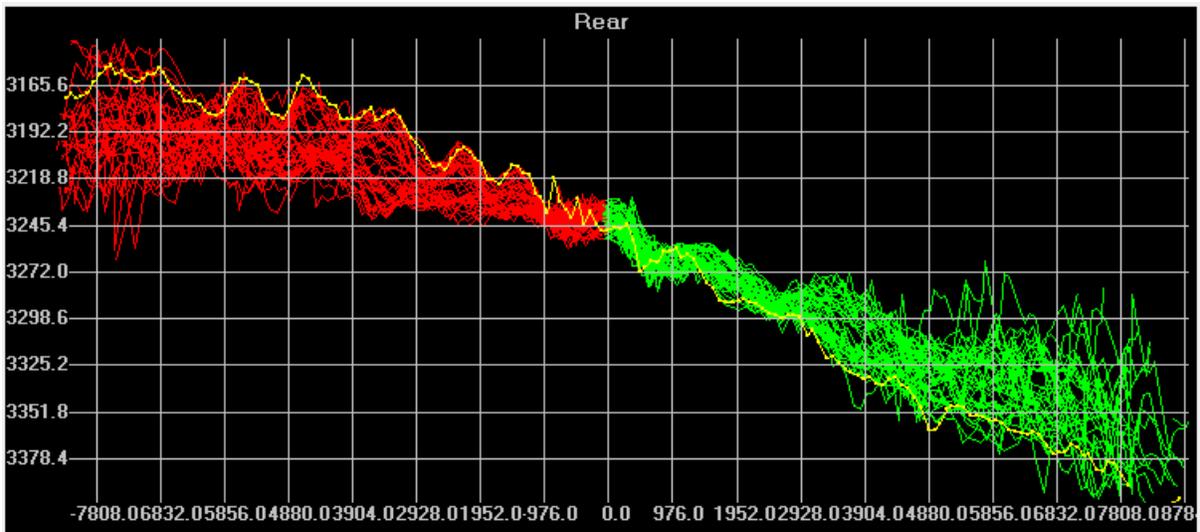


Figura X. Rear View. La vista posterior presenta la encuesta vista desde detrás del buque. Cada línea representa un swath.

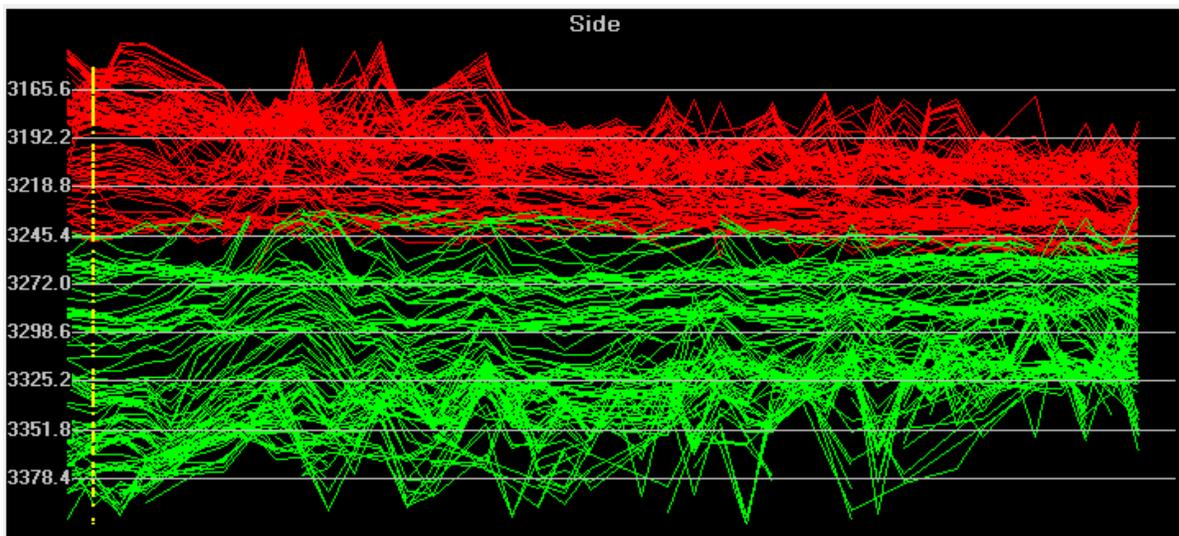


Figura XI. Side View. La vista lateral presenta el levantamiento visto desde el costado del buque con el buque viajando de izquierda a derecha. Cada línea representa sondeos del mismo haz.

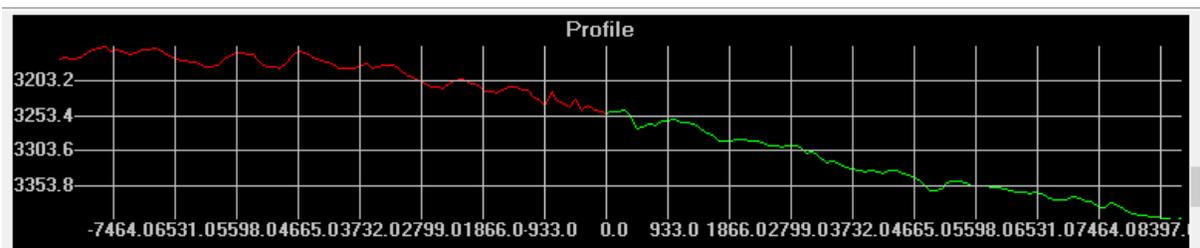


Figura XII. Profile View. La vista de perfil muestra un swath único.

El Swath Editor es útil para analizar las bandas con los perfiles de los haces, sin embargo, al no tener una vista que muestre la morfología del área, nos limita a resolver si los valores atípicos son causados por errores sistemáticos o si realmente se trata de una anomalía en el lecho marino. Por esta razón, el editor se utilizó para darnos una idea de cómo se encontraban los datos, mas no para limpieza ni edición.

Subset Editor

El editor de subconjuntos difiere del editor de bandas en que los sondeos ya no tienen solo una relación con las direcciones along-track ni across-track, sino que cada sonda tiene ahora un valor de latitud y longitud adjunto.

El Subset Editor nos permite:

- Ver los datos de forma tridimensional para que las características como crestas y valles del lecho marino sean visibles.
- Rotar datos para verlos desde diferentes ángulos.
- Ver áreas de superficie BASE en la ventana 3-D.
- Ver y editar superficies CUBE, utilizando mosaicos de subconjuntos para rastrear las áreas que se han completado.

A medida que se arrastra el cursor por la ventana de visualización, se dibuja un cuadro delimitador para mostrar el área del subconjunto (subset).

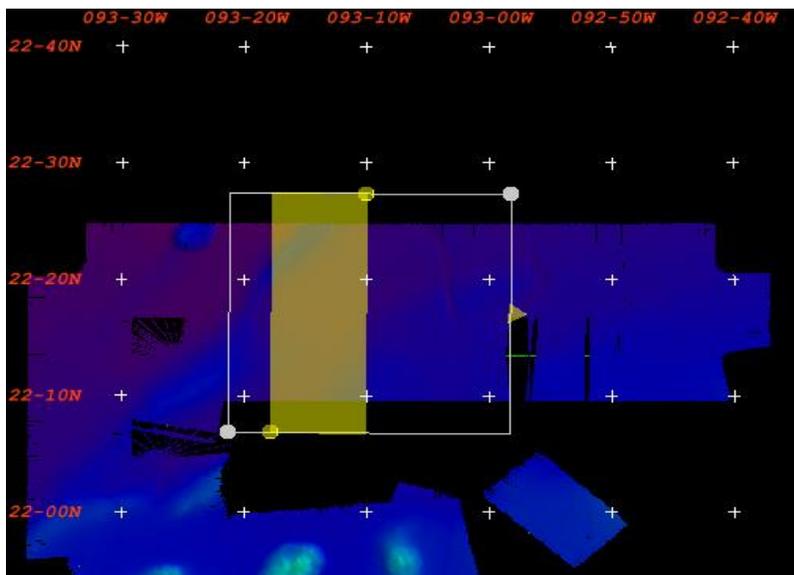


Figura XIII. Área delimitada por el editor Subset.

El tamaño del subconjunto está determinado por el cuadro delimitador. A medida que se modifica el área del cuadro delimitador, se genera un nuevo subset y las visualizaciones en las vistas bidimensional y tridimensional se actualizan para mostrar el área nueva.

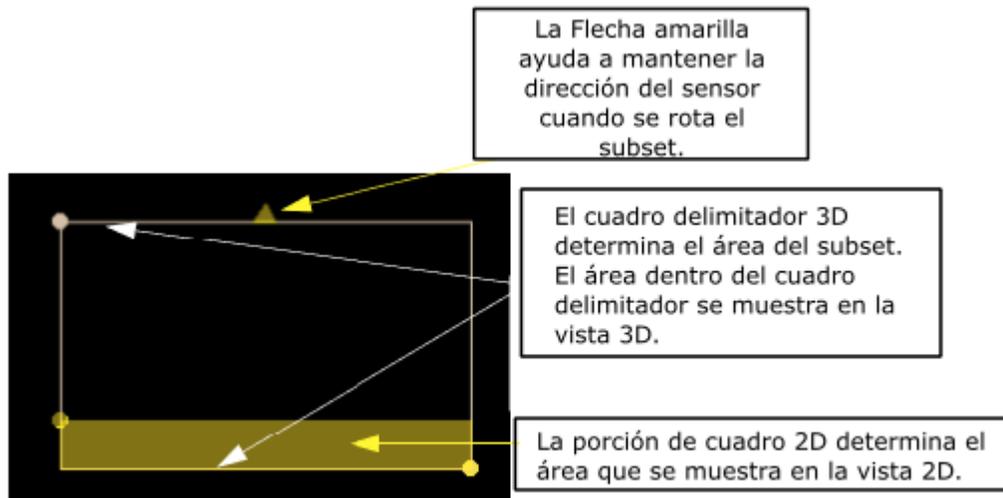


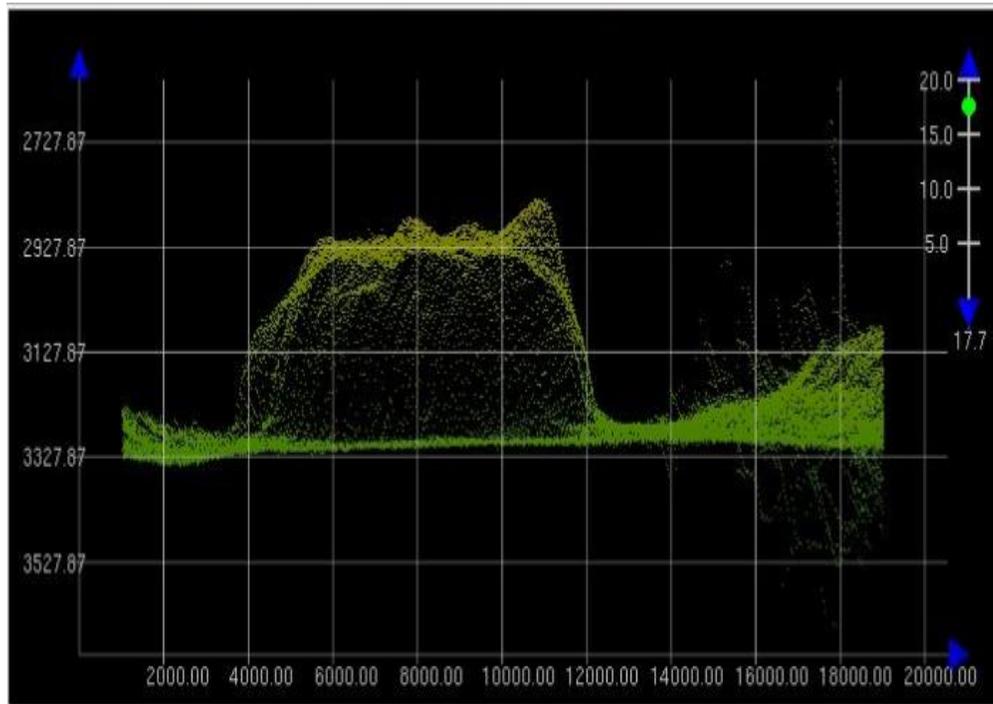
Figura XIV. Cuadro delimitador del editor Subset.

El editor de subconjuntos tiene los siguientes componentes:

- Cuadro delimitador de subconjuntos: el cuadro delimitador selecciona un área donde se genera el subset. Cada vez que se mueve o cambia el tamaño del cuadro, se genera un nuevo subset. El recuadro de división 2D amarillo define el área que aparecerá en la ventana 2D.
- La vista 3D: la vista 3D (tridimensional) muestra todos los sondajes en el área del subset. La vista en la ventana se puede rotar o cambiar.
- La vista 2D: la vista 2D (bidimensional) muestra los sondajes del área del subset que se encuentran dentro del cuadro de división 2D.

Cuando se redimensiona el cuadro delimitador de la división 2D, la información en la pestaña se actualiza con nuevos datos.

a)



b)

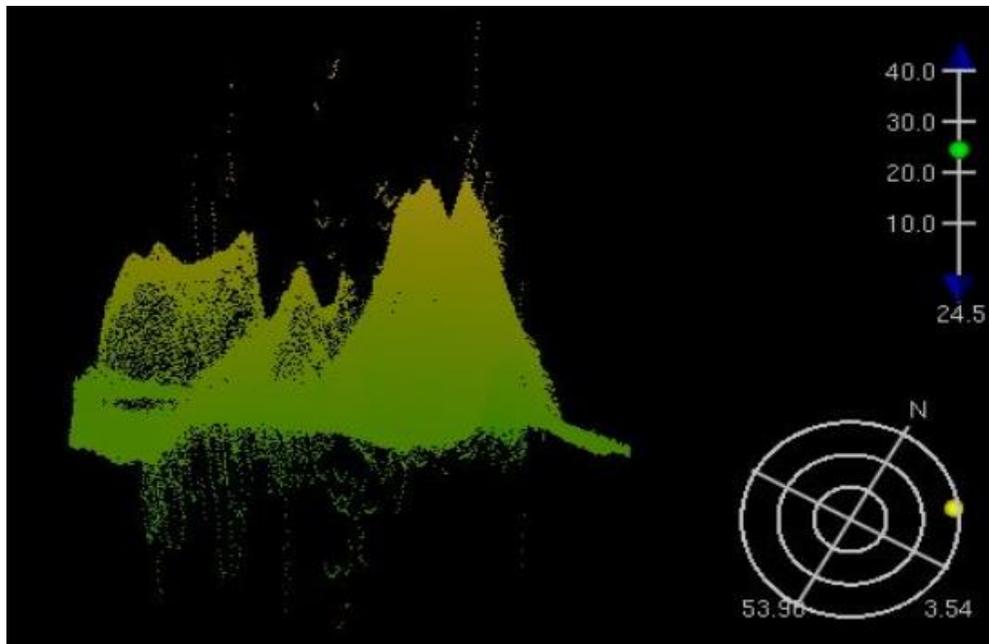
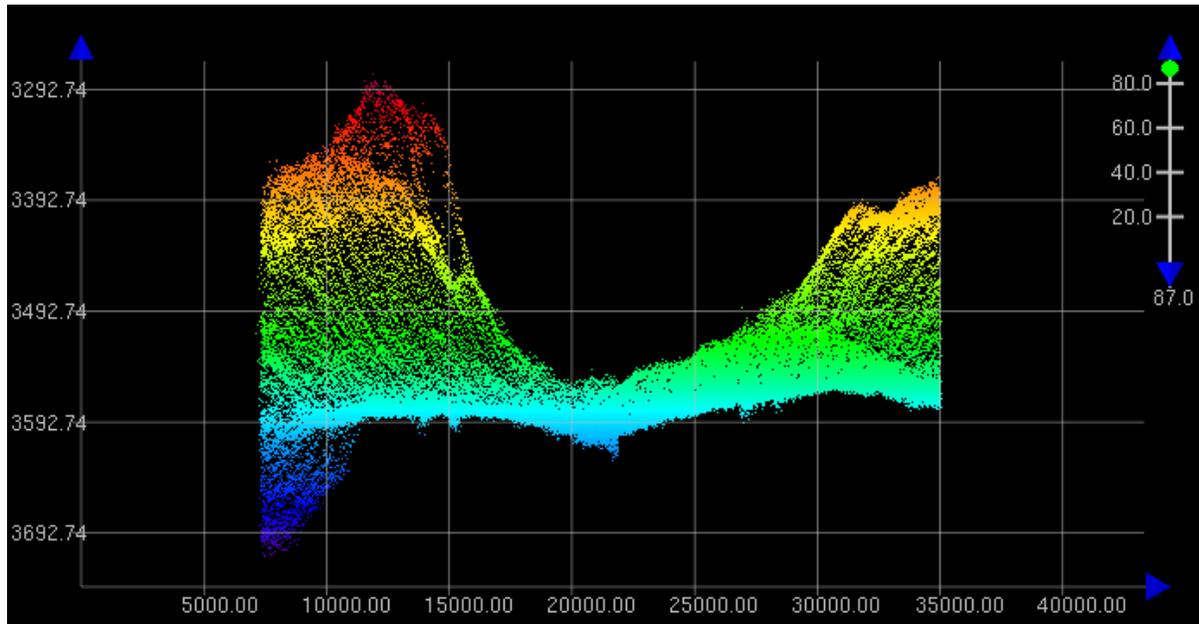


Figura XV. Se muestran a) Vista 2D y b) Vista 3D de datos que aún no han sido editados, se observa que los puntos sobresalientes a la forma de la batimetría son datos erróneos.

c)



d)

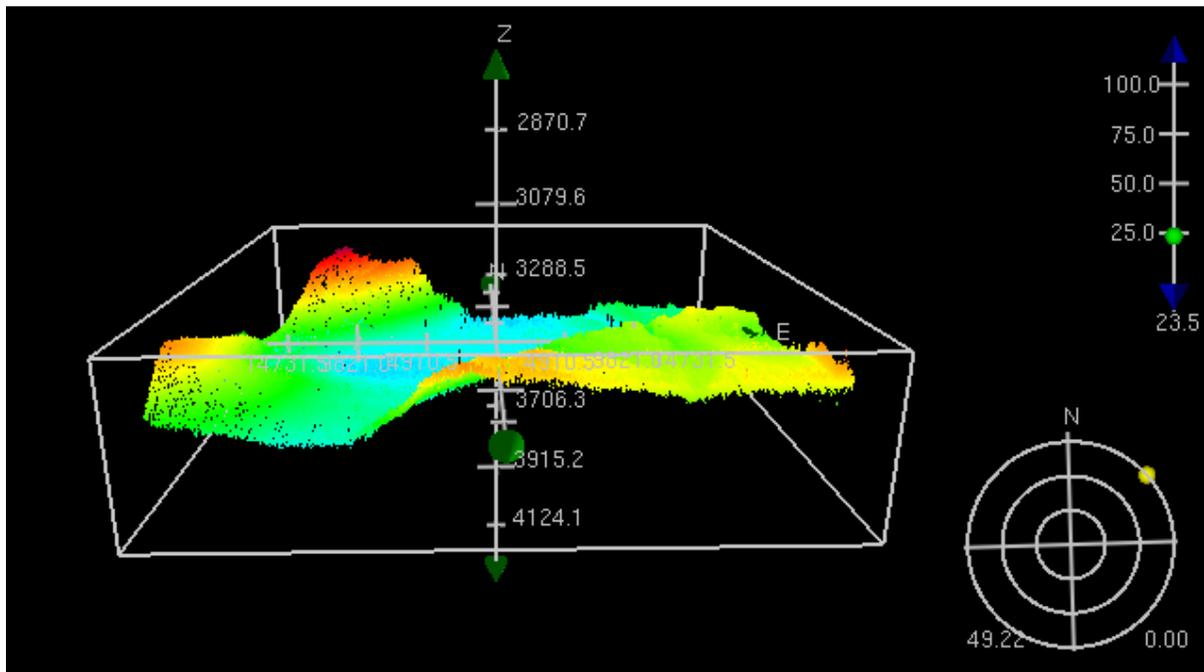


Figura XVI. c) Vista 2D y d) Vista 3D de datos limpios.

Tanto la vista en 2D o 3D te permiten descartar sondajes erróneos o anómalos.

Anexo 5

Batimetría

El domo 8 muestra constancia en sus rasgos morfológicos, como se puede observar en la figura XVII. En el caso de la carta M67-2a se observa una deformación en las curvas de nivel en el flanco oeste, esto es ocasionado por una inconsistencia en los datos. También es posible observar la cañada que Ponce (2003. P.68) menciona, atraviesa el domo del flanco sur al norte.

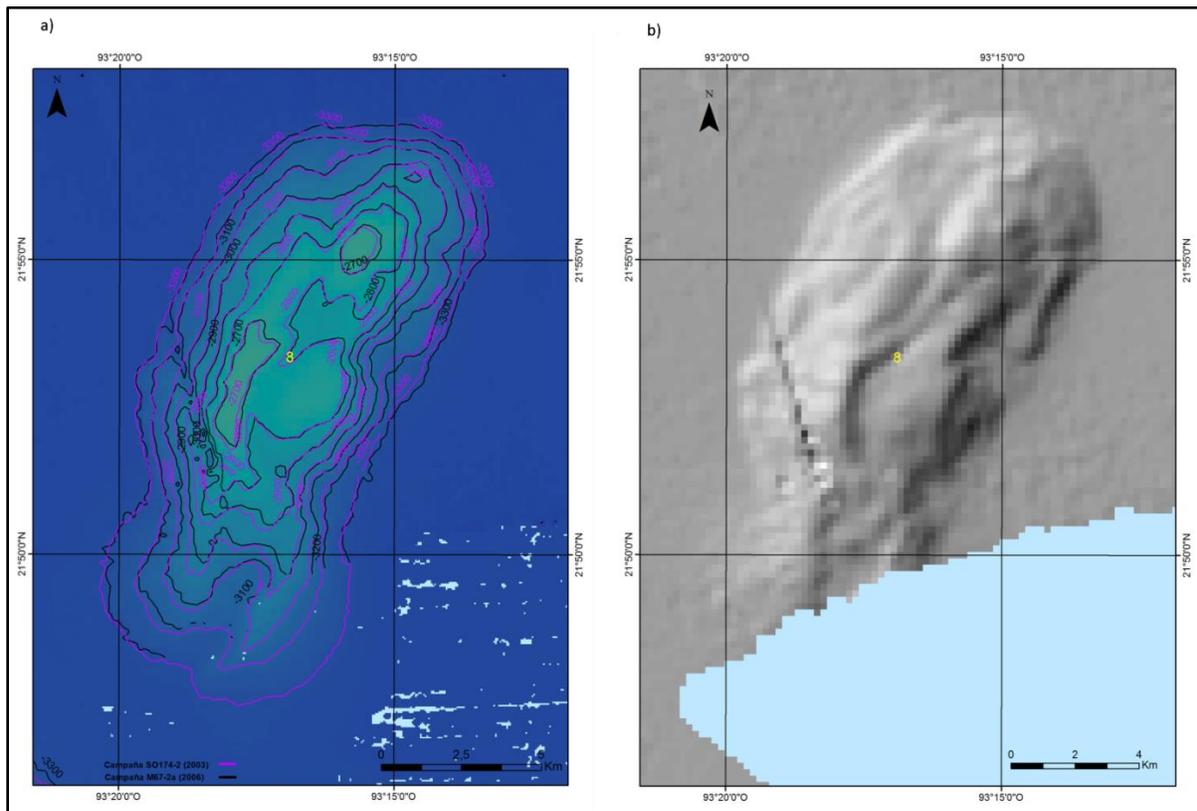


Figura XVII. a) Carta batimétrica del domo 8 mapeado por las campañas. b) Mapa de sombras del domo 8 en donde se observa una cañada en el centro sobre el eje mayor.

En la figura XVIII se observan imágenes 3D del domo 8, (a) y (c) corresponden a la campaña M67-2a, (b) y (d) corresponden a la campaña SO174-2.

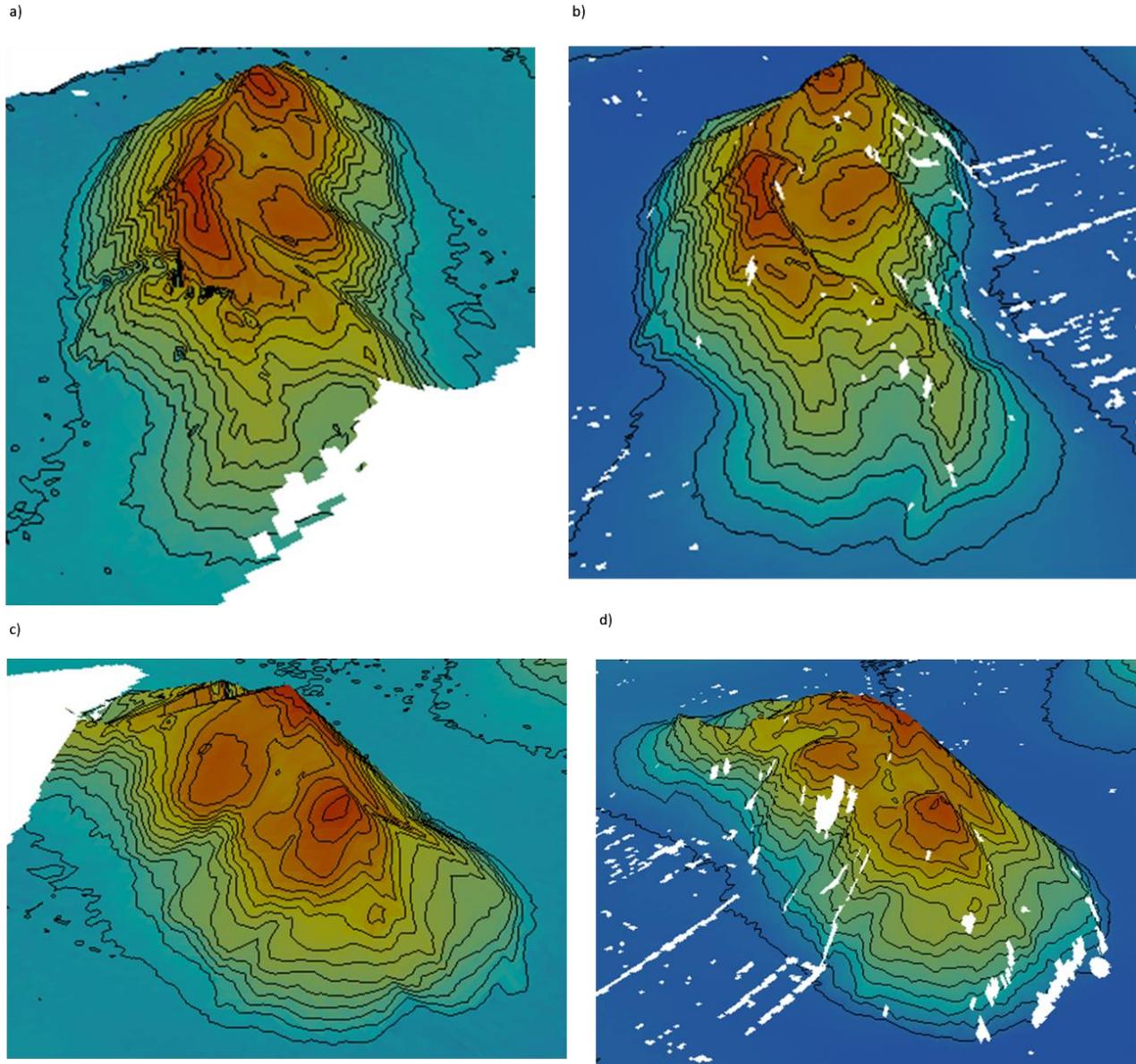


Figura XVIII. Batimetría 3D del domo 8 mapeado por la campaña M67-2a (a, b) y la campaña S0174 (c, d).

El domo 9 mantiene la geomorfología en ambas campañas. En la carta M67-2a la curva de nivel que rodea el canal es más estrecha.

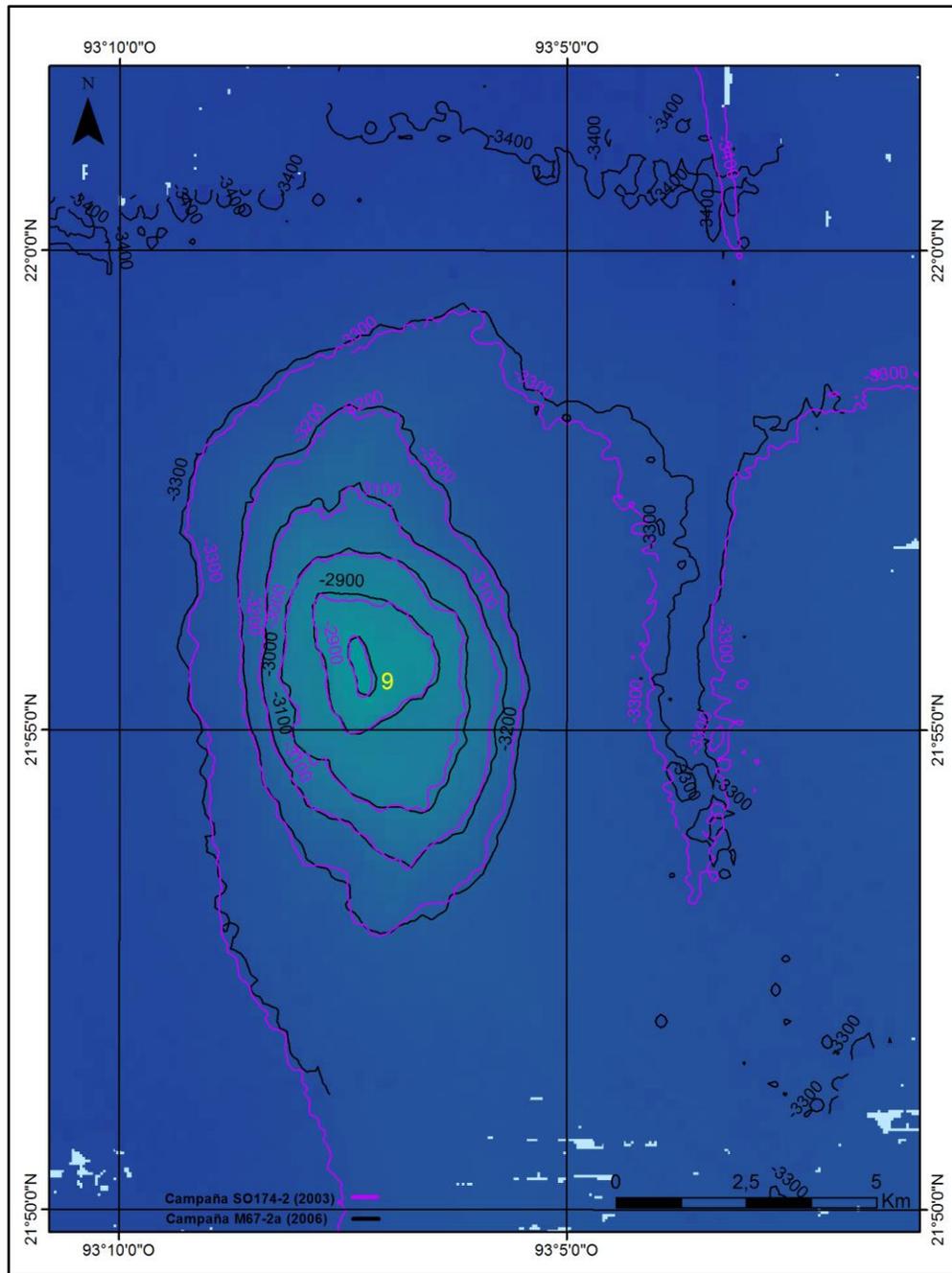


Figura XIX. Domo 9 mapeado por las campañas, a) SO174-2 (2003) y b) M67-2a (2006).

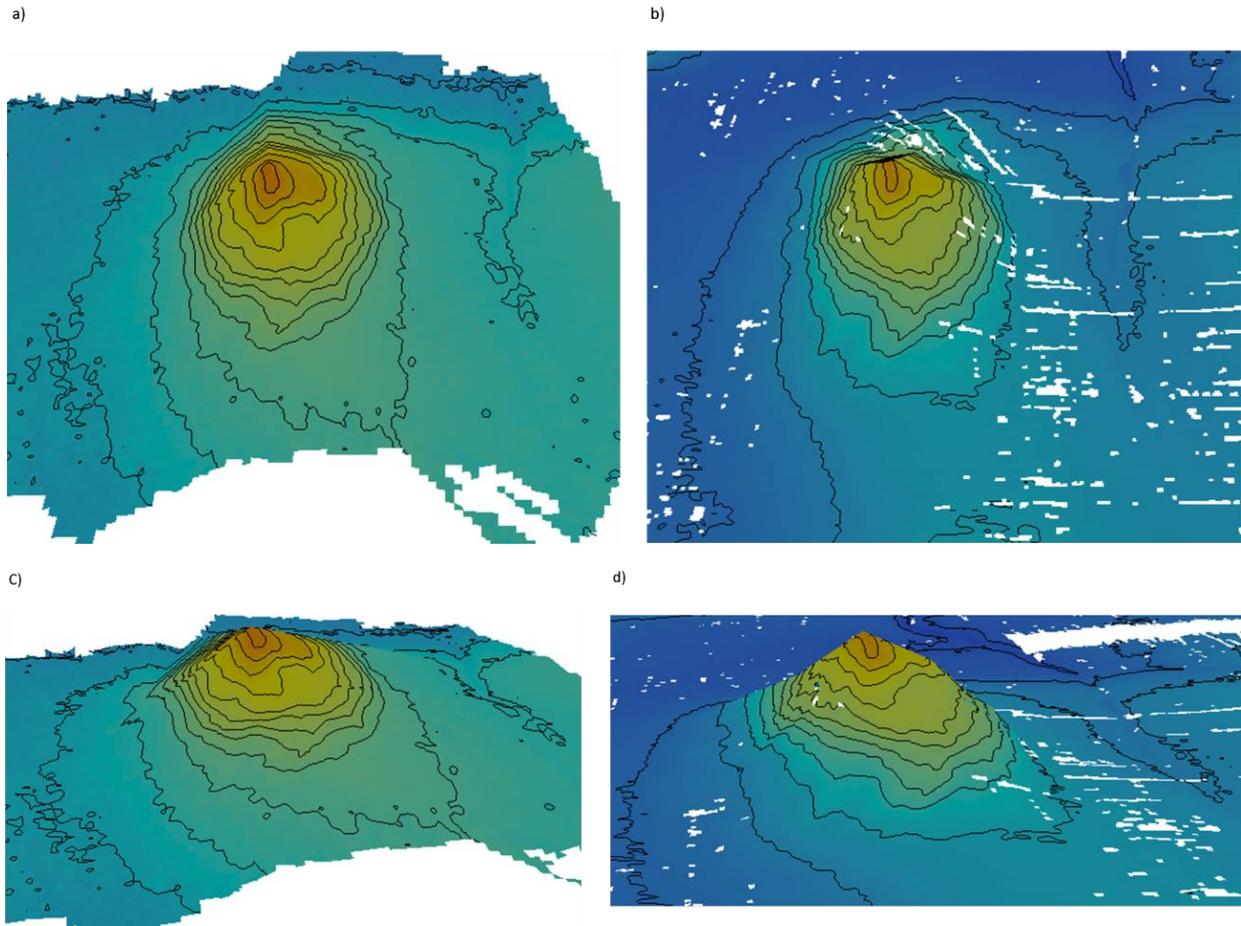


Figura XX. Batimetría 3D del domo 9 mapeado por la campaña M67-2a (a, c) y la campaña S0174 (b, d).

En la carta M67-2a se observan ligeros cambios en el domo 10 en la extensión del flanco izquierdo al nivel de la curva -3100, la cual omite una curvatura que sí se observa en la carta S0174. En la carta S0174-2 el domo se mapeó completo.

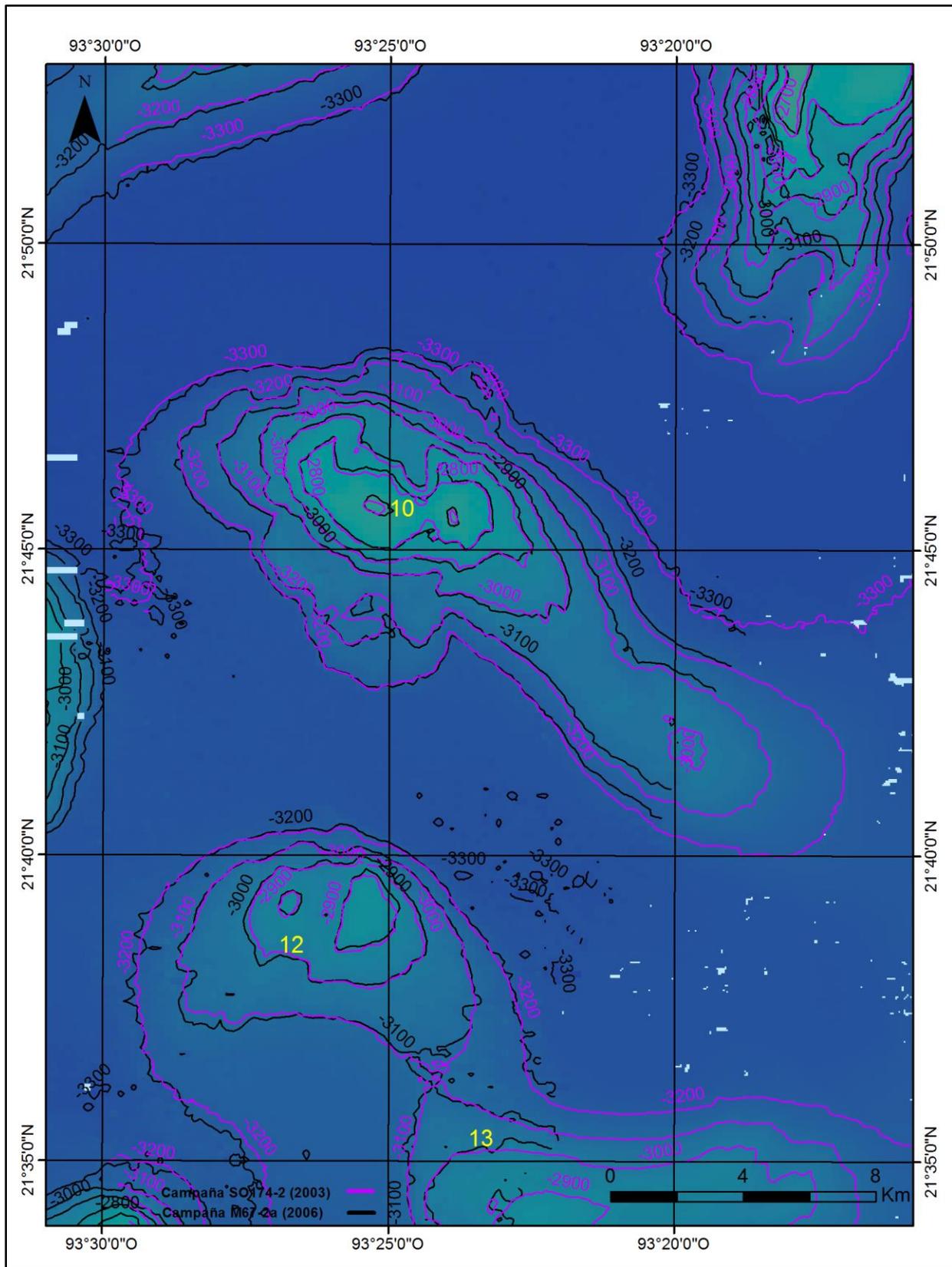


Figura XXI. Domo 10 mapeado por las campañas SO174-2 (2003) y M67-2a (2006).

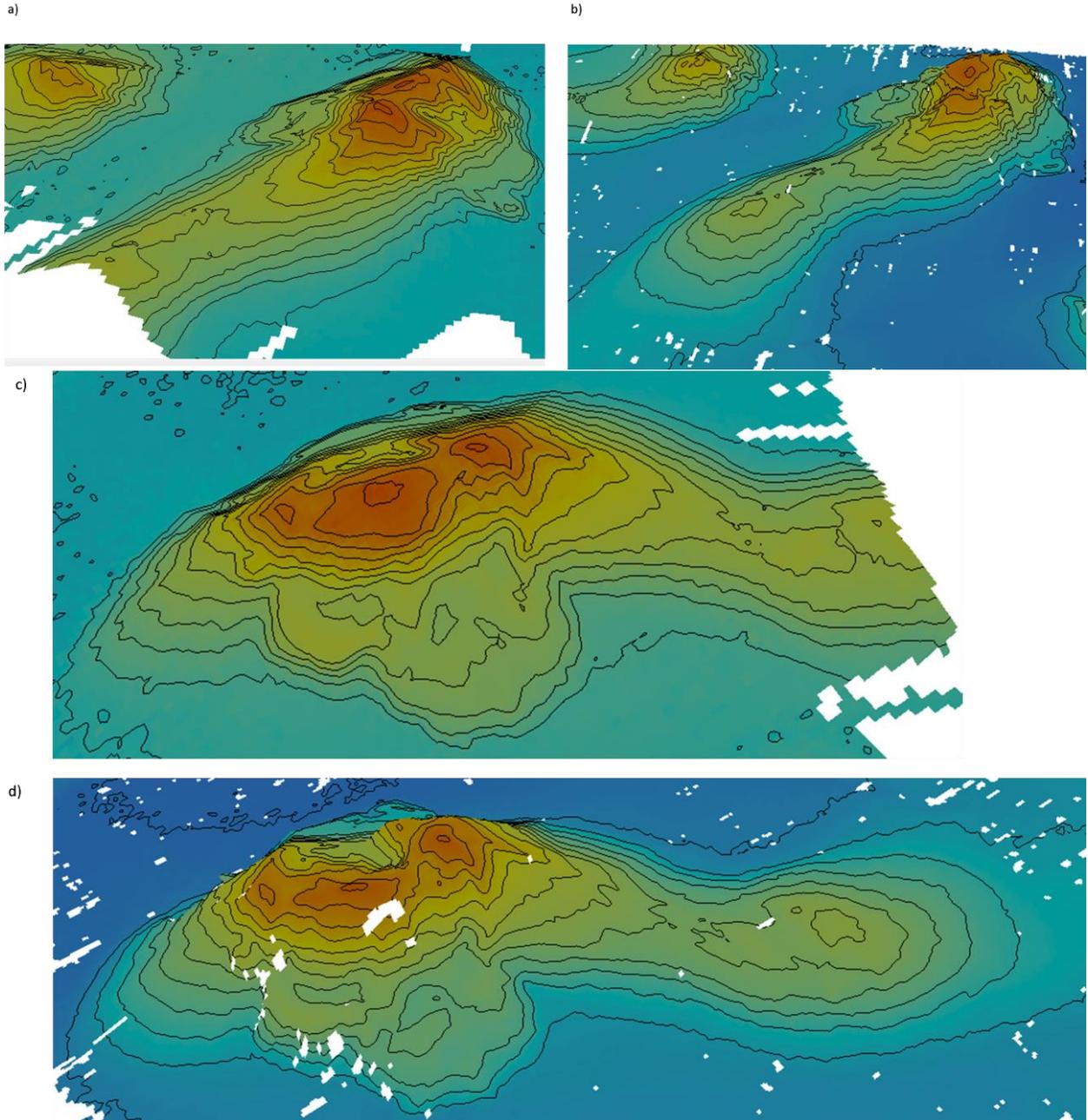


Figura XXII. Batimetría 3D del domo 10 mapeado por la campaña M67-2a (a, c) y la campaña S0174-2 (b, d)

Backscatter

Las intensidades altas observadas en los mosaicos de la cartabatimétrica M67-2a se identifican con las observadas en los datos de Ponce (2003). Se tomaron los mismos domo como ejemplo que en la batimetría para comparar los rasgos del backscatter: el domo Chapopote, el domo 8, 9 y 10.

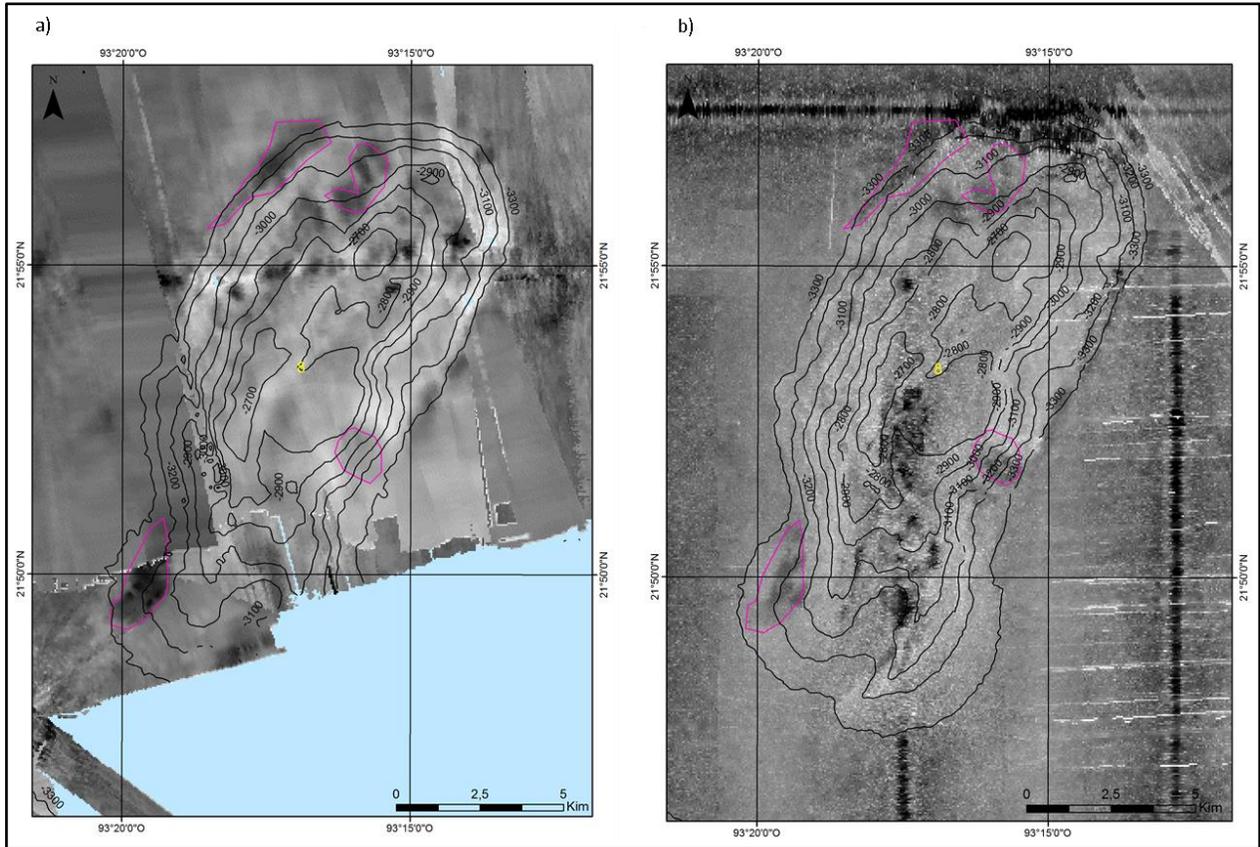


Figura XXIII. Mosaico de imágenes de retrodispersión acústica del domo 8 registrado por la campaña a) M67-2a (2006) y b) la campaña SO174-2 (2003). En rosa se señalan las zonas de alto backscatter.

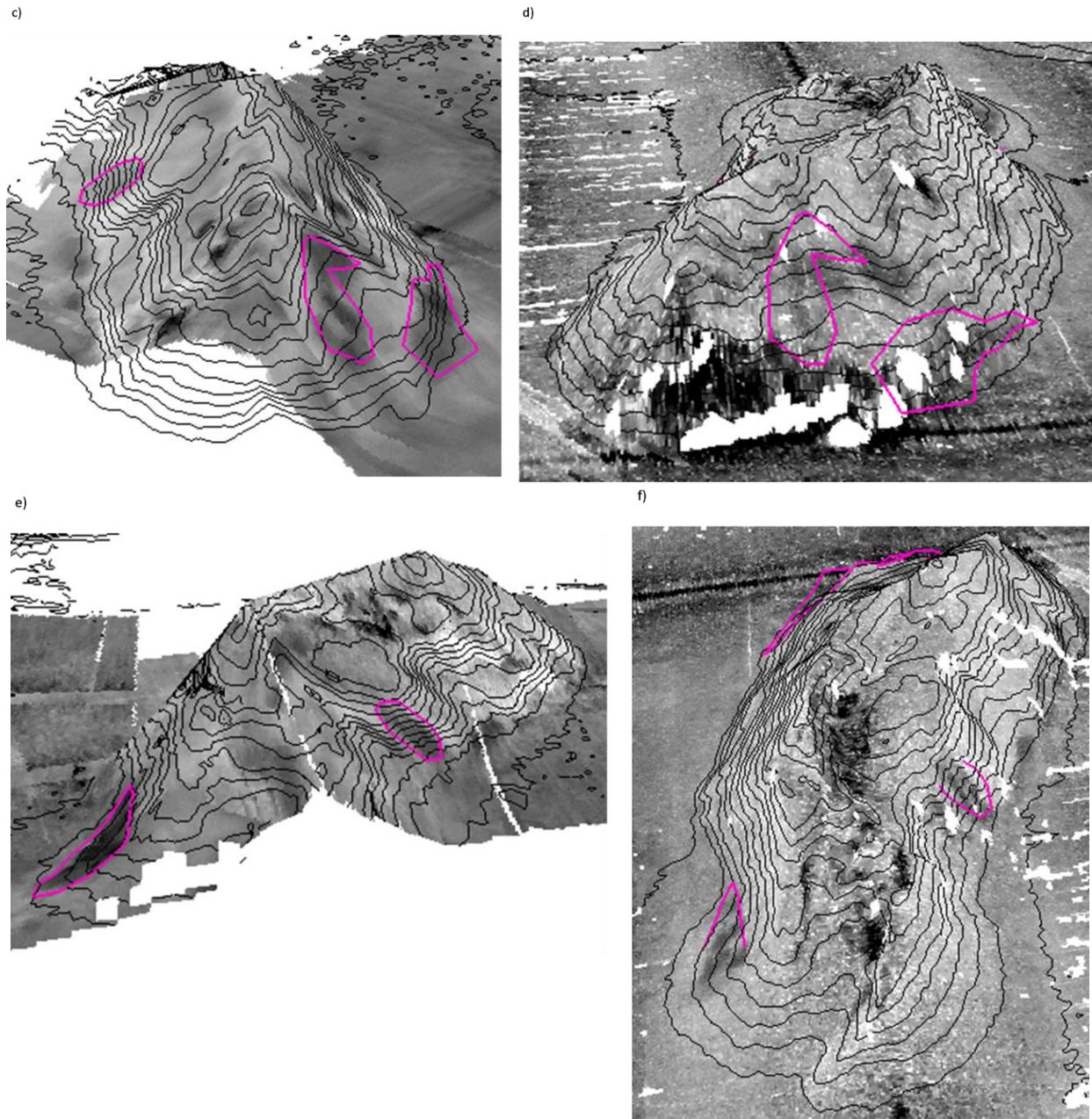


Figura XXIV. Mosaico de imágenes de retrodispersión acústica visto en 3D del domo 8. (c) y (d) corresponden a la Campaña M67-2a (2006), (e) y (f) corresponden a la campaña S0174-2 (2003). En rosa se señalan las zonas de alto backscatter.

El domo 9 se caracteriza por presentar en gran parte de su cima valores de alta intensidad. Al este se observa el canal en el cual también predominan valores altos de intensidad (color rosa figura XXV).

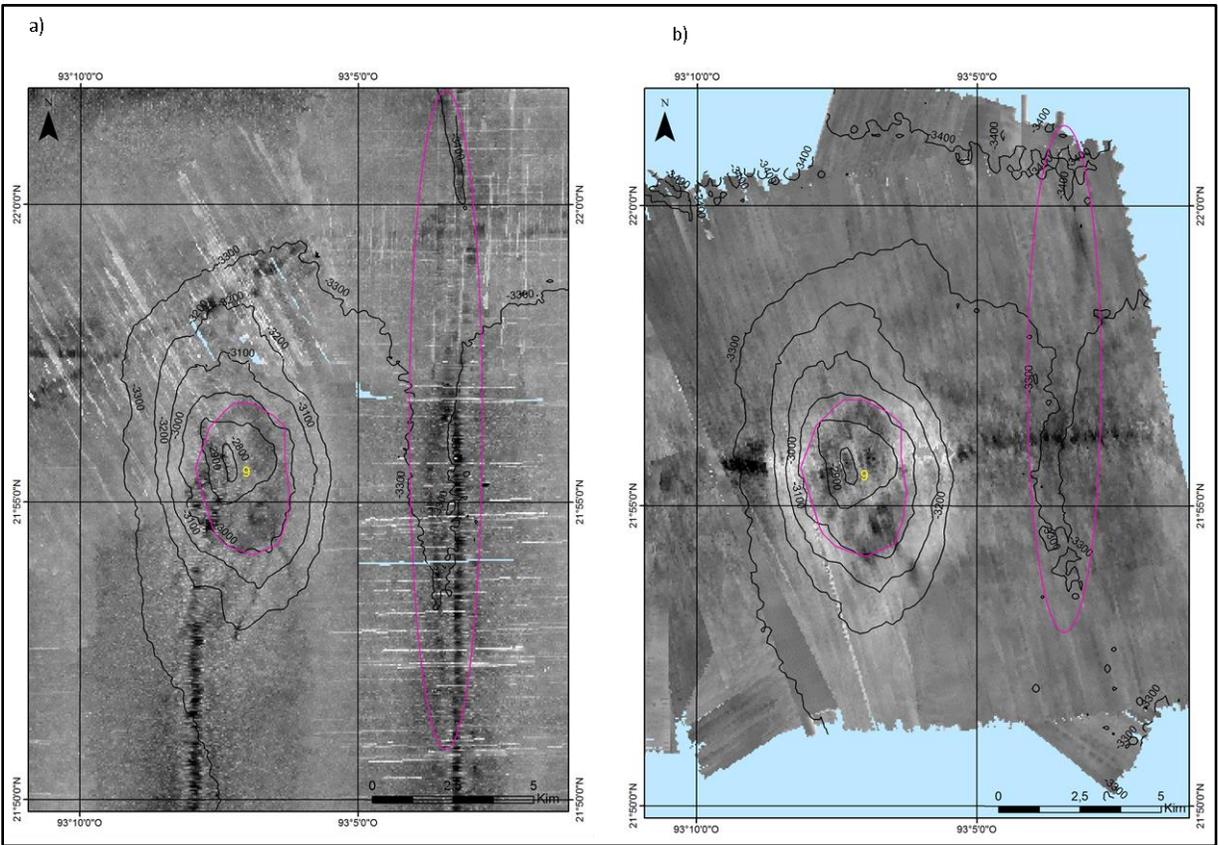


Figura XXV. Mosaicos de imágenes de retrodispersión acústica del domo 9, a) campaña SO174-2 (2003) b) campaña M67-2a (2006). En rosa se señalan las zonas de alto backscatter.

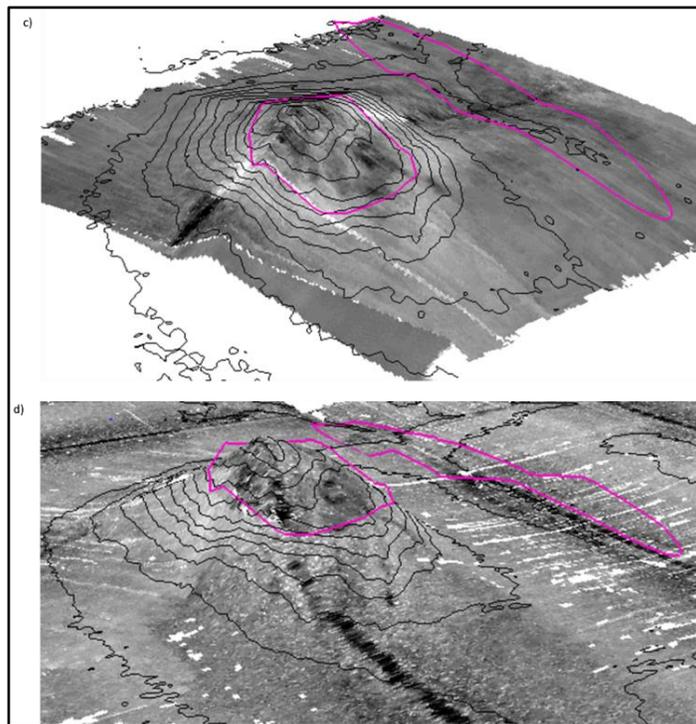


Figura XXVI. Mosaicos de imágenes de retrodispersión acústica en 3D del domo 9. c) Campaña M67-2a (2006), d) Campaña SO174-2 (2003). En rosa se señalan las zonas de alto backscatter.

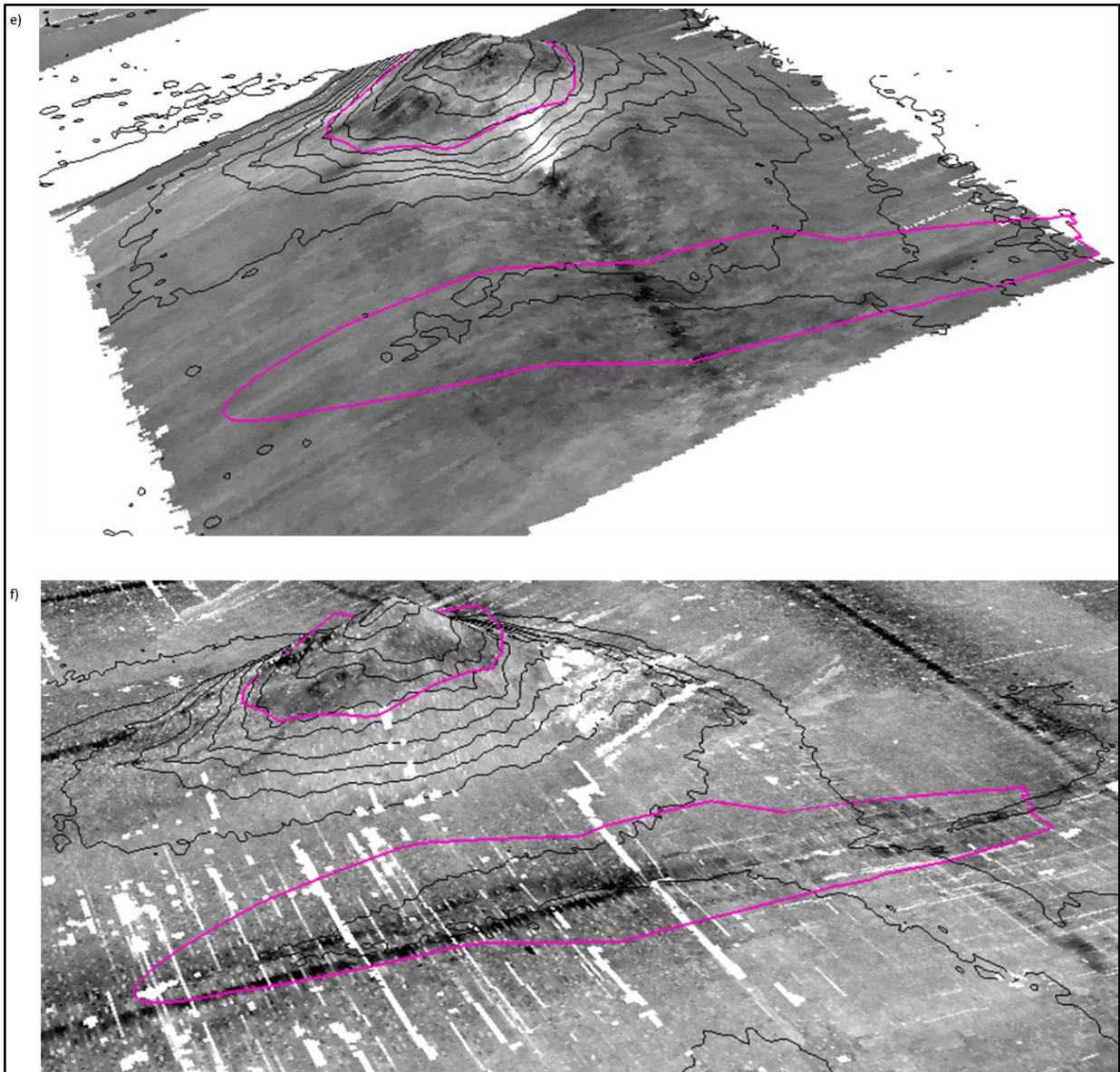


Figura XXVII. Mosaicos de imágenes de retrodispersión en 3D del domo 9. e) Campaña M67-2a (2006), f) Campaña S0174-2 (2003). En rosa se señalan las zonas de alto backscatter.

El domo 10 aparece completo en la carta S0174-2, en la figura XXVIII se señala en rosa las zonas de alto bs.

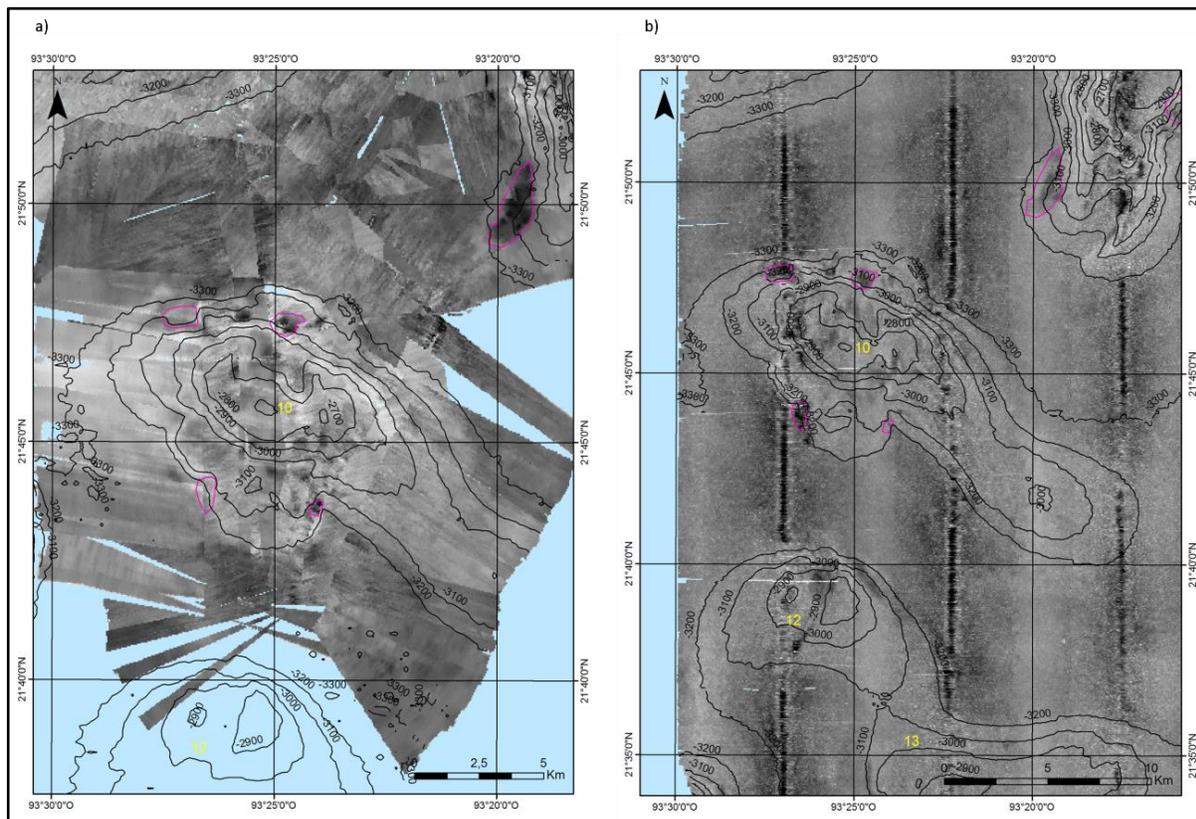


Figura XXVIII. Mosaicos de imágenes de retrodispersión acústica del domo 10. a) Campaña M67-2a (2006), b) Campaña S0174-2 (2003). En rosa se señalan las zonas de alto backscatter.

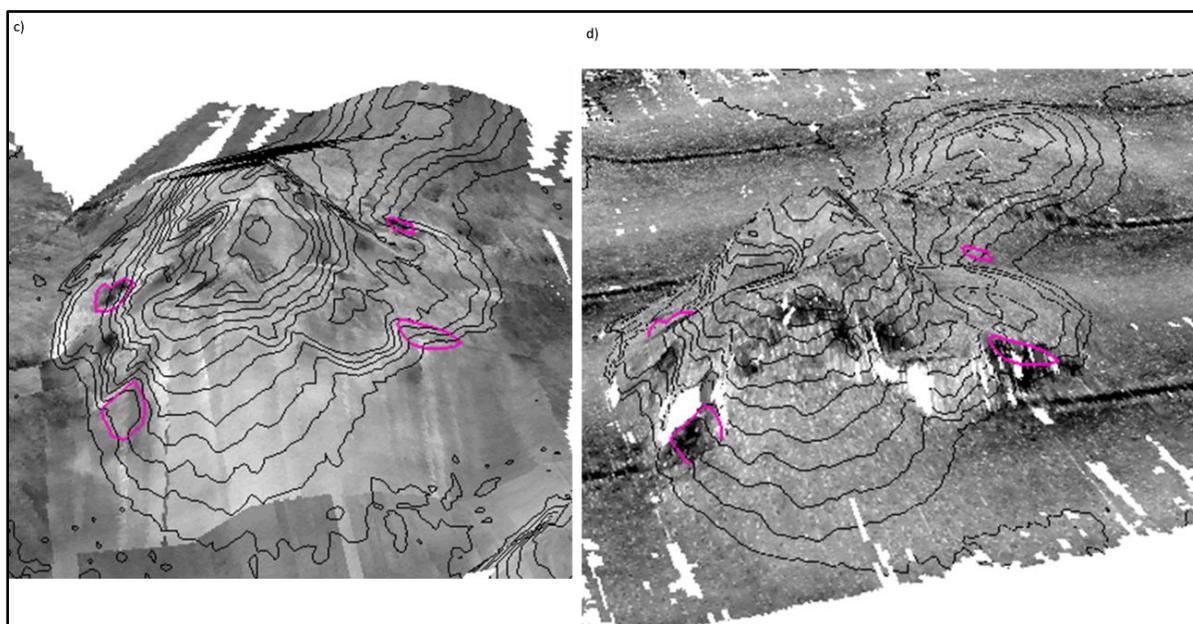


Figura XXIX. Mosaicos de imágenes de retrodispersión acústica en 3D del domo 10. c) Campaña M67-2a (2006), d) Campaña S0174-2 (2003). En rosa se señalan las zonas de alto backscatter.

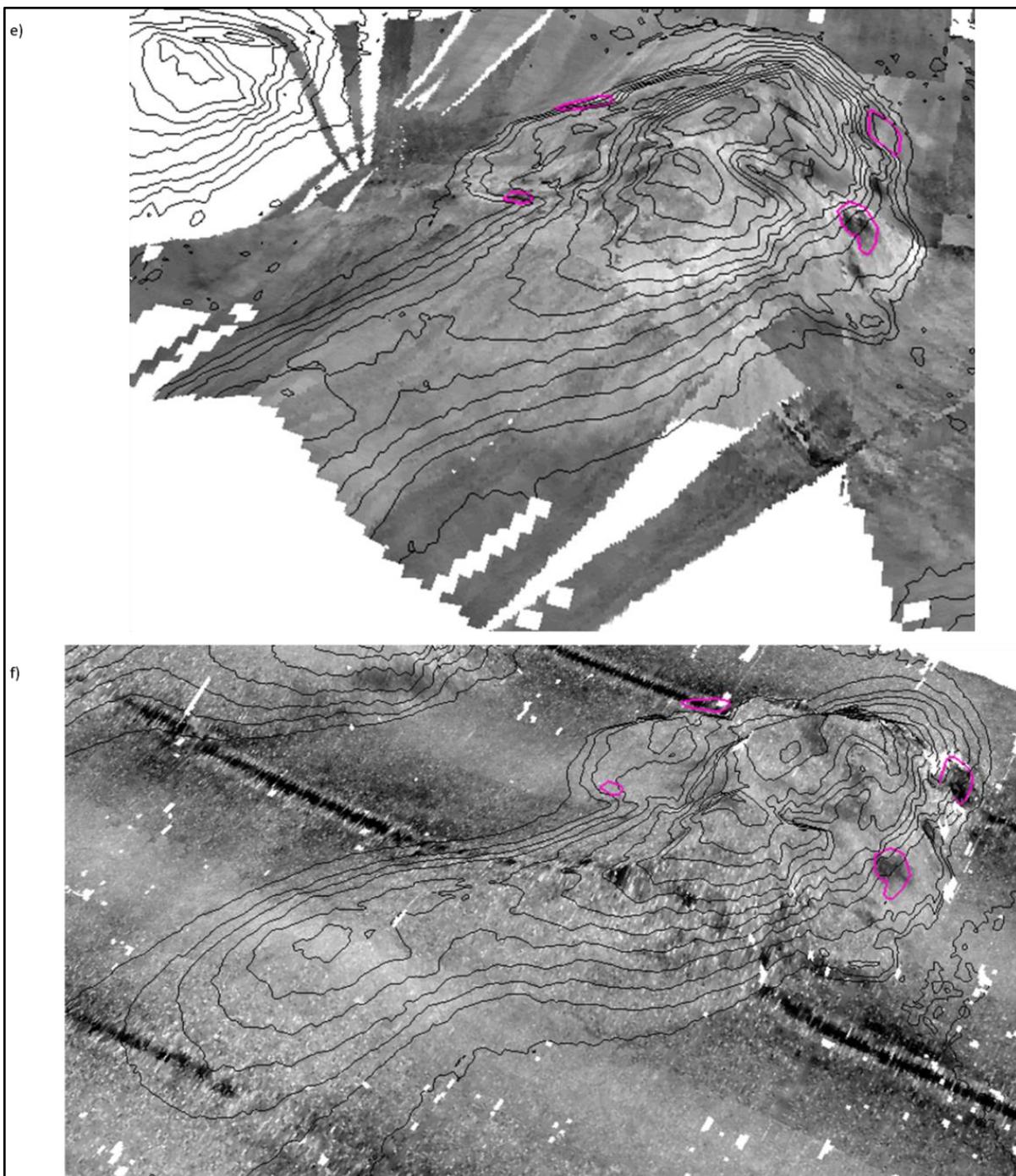


Figura XXX. Mosaicos de imágenes de retrodispersión acústica en 3D del domo 10. e) Campaña M67-2a (2006), f) Campaña S0174-2 (2003). En rosa se señalan las zonas de alto backscatter.

Anexo 6

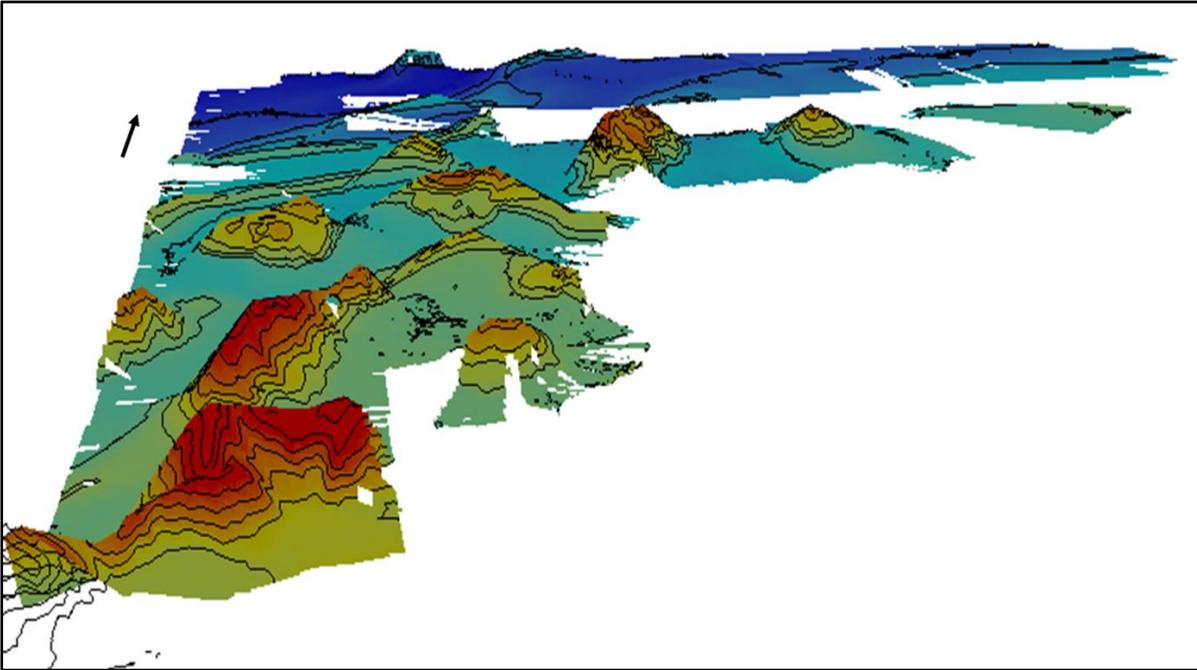


Figura XXXI. Batimetría 3D de alta resolución del área norte campaña M67-2a (2006).

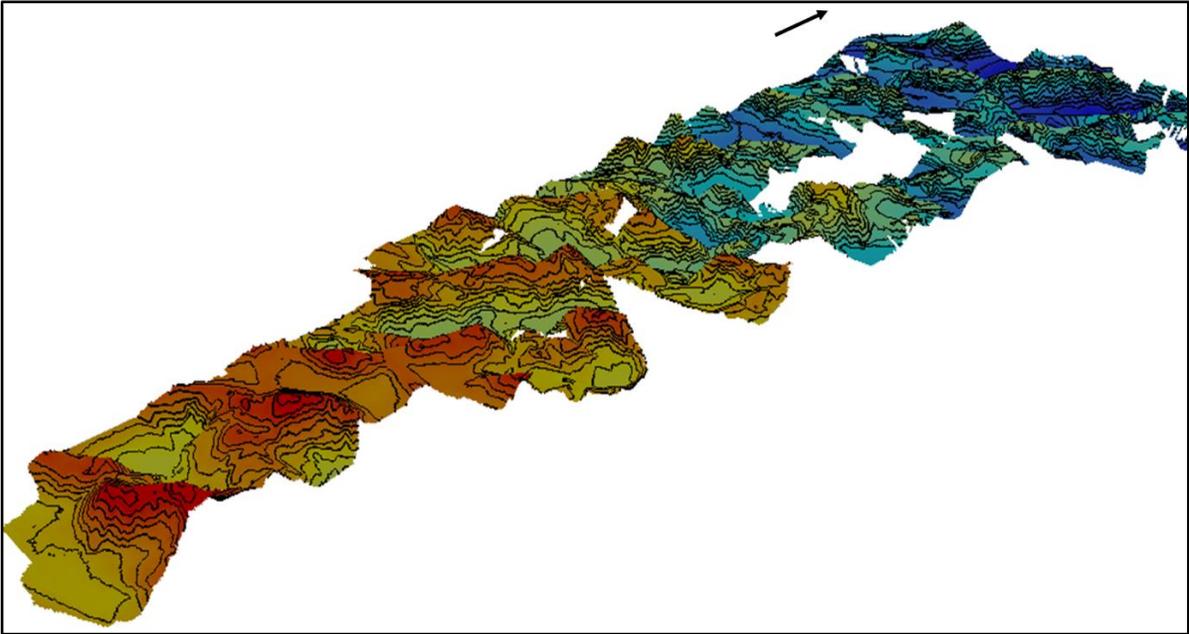


Figura XXXII. Batimetría 3D de alta resolución del área sur campaña M67-2a (2006).

Anexo 7

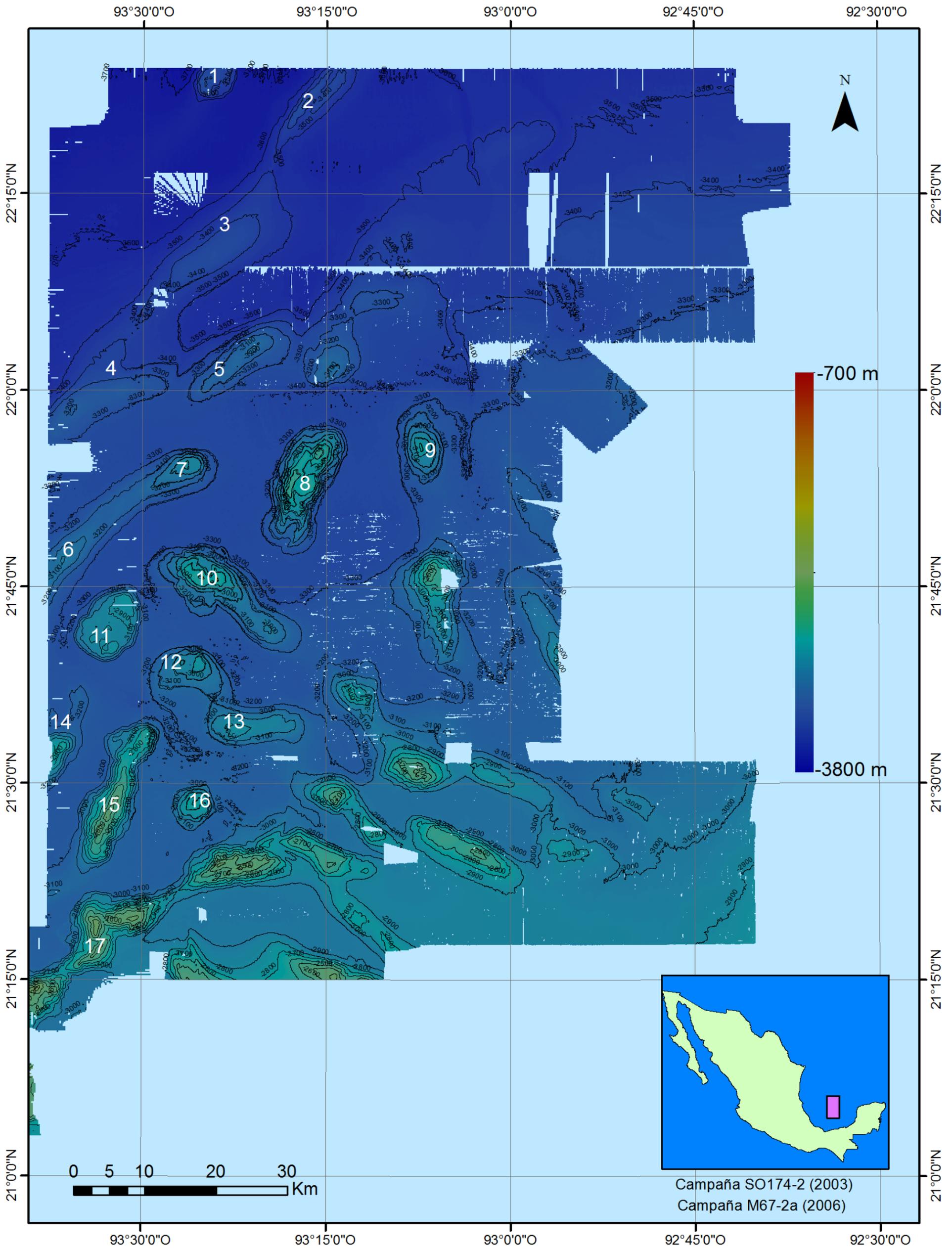


Figura XXXIII. Carta batimétrica de alta resolución zona norte de las campañas M67-2a (2006) y SO174-2 (2003).

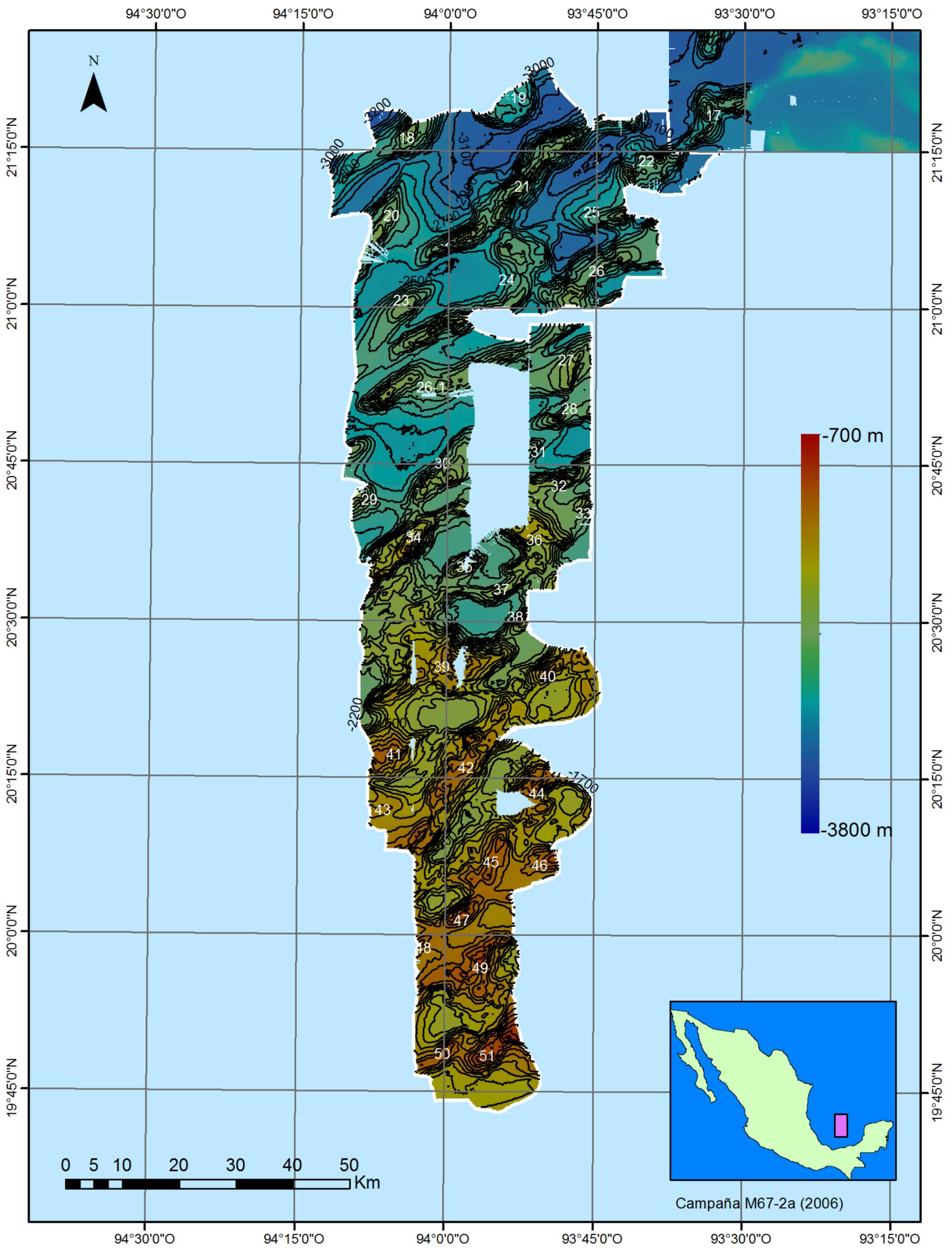


Figura XXXIV. Carta batimétrica de alta resolución zona sur de la campaña M67-2a (2006).

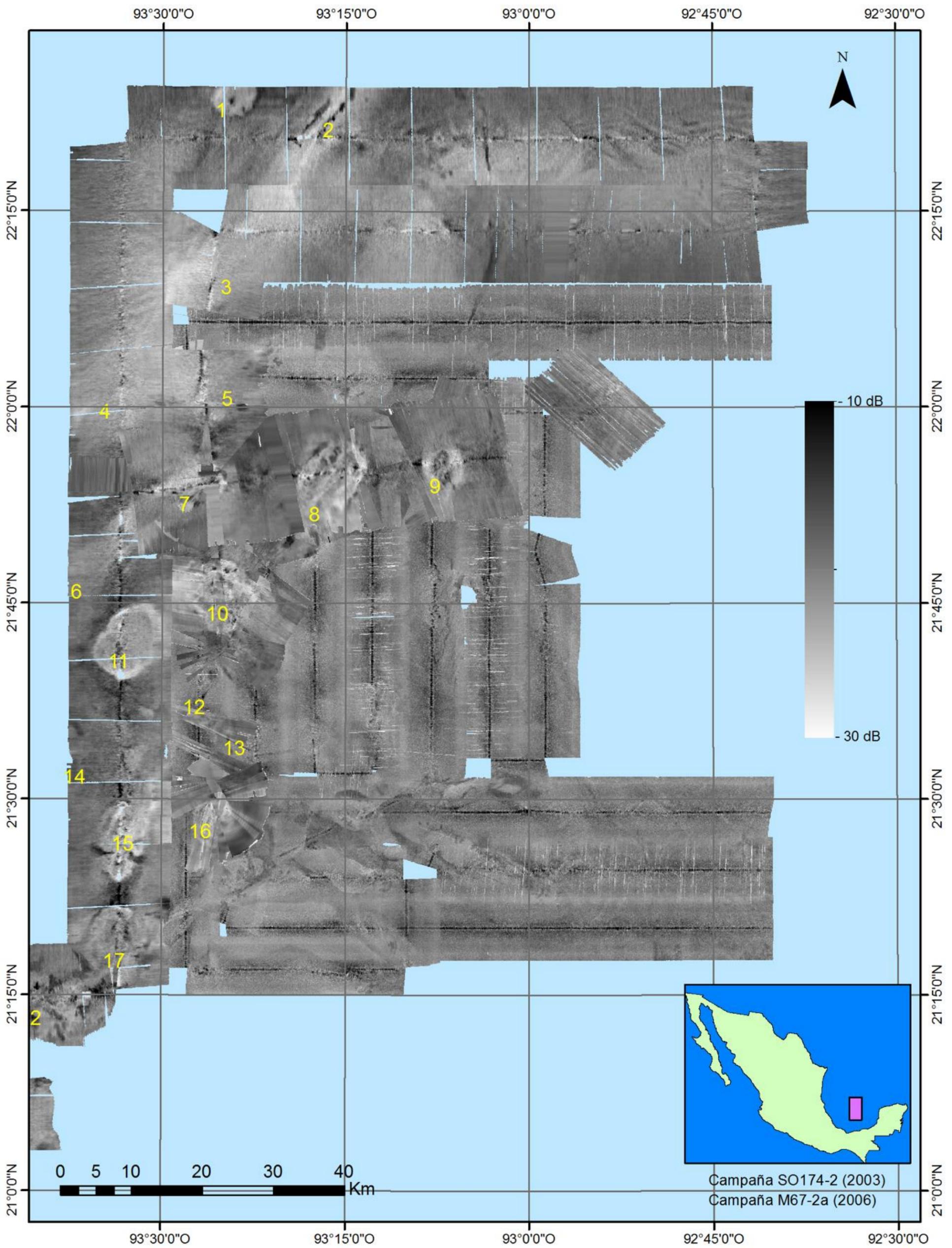


Figura XXXV. Mosaico de retrodispersión acústica zona norte de las campañas M67-2a (2006) y SO174-2 (2003).

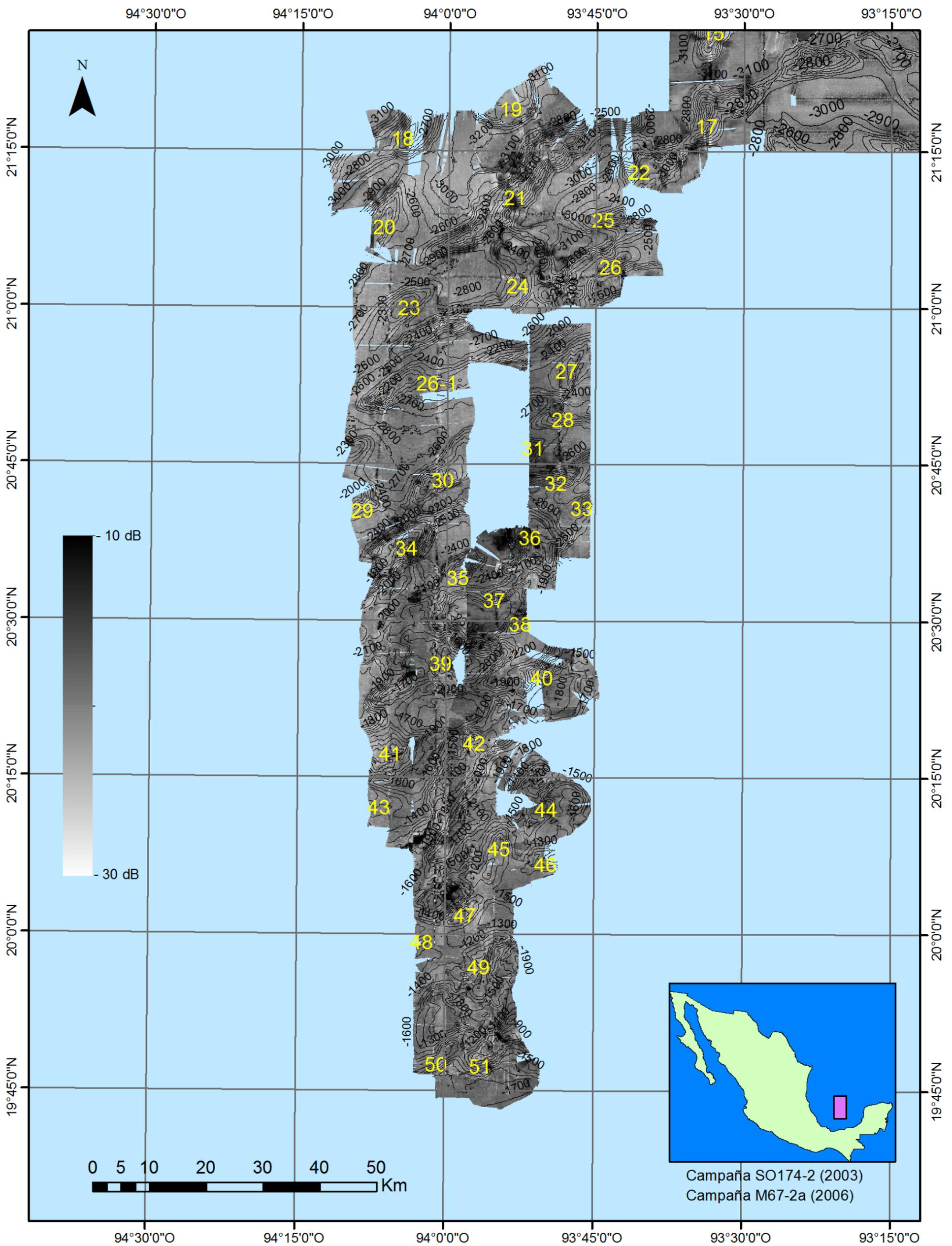


Figura XXXVI. Mosaico de retrodispersión acústica zona sur de la campaña M67-2a (2006).

Referencias Bibliográficas

- Anónimo, 2009. HIPS and SIPS 7.0 Service Pack 1. User Guide. P. 1-805.
- Anónimo, 2009. *Procesamiento de Datos Hidrográficos, Manual de entrenamiento*. Fredericton, New Brunswick, Canada. P. 1-362.
- Augustin, J.M., Le Suave, R., Lurton, X., Voisset, M., Dugelay, S. and Satra, C., 1995. *Contribution of the Multibeam Acoustic Imagery to the Exploration of the Sea-Bottom*. Marine Geophysical Researches 18. P. 459-486.
- Bohrmann, G. and Schenck, S. (eds.), 2004. *RV Sonne Cruise Report SO174-2*. GEOMAR Report 117, Kiel.
- 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.
- Burczynski, J., 1982. *Introducción al uso de sistemas sonar para la estimación de la biomasa de peces*. FAO, Doc. Téc. Pesca, Rev.1. P. 1-74.
- Cantú-Chapa, A., 1998. *Las transgresiones jurásicas en México*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, volumen 15, número 1, p. 25-37.
- Cossío, R., 2020. *Batimetría de alta resolución del sector suroeste del Escarpe de Campeche*. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM. P.1-67.
- Cristián, R., 2006. *Caracterización del fondo marino de la bahía de Puerto Montt*. Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, Casilla 324. Valparaíso, Chile.
- de Moustier, C., 1985. *Beyond bathymetry: Mapping acoustic backscattering from the deep seafloor with Sea Beam*. Journal of the Acoustical Society of America 79, 317 -331.
- de Moustier, C., 1986-a. *Approaches to acoustic backscattering measurements from the deep seafloor*. Symposium on Current Practices and New Technology in Ocean Engineering, Am. Soc. Mech. Eng., OED II, 137-143.
- de Moustier, C., Matsumoto, H., 1992. *Seafloor Acoustic Remote Sensing with Multibeam Echo-Sounders and Bathymetric Sidescan Sonar Systems*. Marine Geophysical Researches 15, P. 27-42.
- Fonseca, L., Calder, B., 2005. *Geocoder: An efficient Backscatter map constructor*. Center for Coastal and Ocean Mapping, University of New Hampshire Scholars' Repository.
- Fonseca, L. Mayer, L., 2007. Remote estimation of surficial seafloor properties through the application Angular Range Analysis to multibeam sonar data. Marine Geophysical Research, (2007) 28:119-126.
- Hammerstad, E., Pohner, F., Parthiot, F., and Bennett, J., 1991. *Field testing of a new deep water multibeam echo-sounder*, Proc-IEEE Oceans' 9 1, 2, P. 743-749.
- Hudec, M., Jackson M., 2007. *Terra infirma: Understanding salt tectonics*. Earth-Science Reviews, 82, P. 1-28.

International Hydrographic Organization, (1971). *Limits of oceans and seas: 3rd Edition*. Monte-Carlo, pp 14.

Jackson, M., Hudec, M., 2017. *Salt Tectonics: Principles and Practice*. University of Texas, Austin. Cambridge University Press. P. 1-498.

Kongsberg, 2005. *Product Description: EM 120 Multibeam echo sounder*.

MacKenzie K.V. 1981. *Nine-term equation for sound speed in the ocean*. Journal of the Acoustical Society of America 70: 807-812.

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.

Munk W., P. Worcester, and C. Wunsch. 1995. *Ocean Acoustic Tomography*. Cambridge: University Press.

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

Padilla y Sanchez, R.J., 1986, *Post-Paleozoic tectonics of Northeast Mexico and its role In the evolution of the Gulf Of Mexico: Geofísica Internacional*, V. 25, No. 1, P. 157-206.

Padilla y Sánchez, R.J., 2007. *Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo LIX, Núm. 1, p. 19-42.

Ponce, F., 2009. *Caracterización acústica del relieve batimétrico de los diapiros salinos profundos de la sonda de Campeche del Golfo de México*. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM. P. 1-86.

Salvador, A., 1991. *Gulf of Mexico Basin: Introduction*. En: Salvador, A. (ed). *The Geology of North America, Vol. J: The Gulf of Mexico Basin*. Geological Society of America, p. 1-12.

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.

Saracin, A. and Calin, A., 2014. *Bathymetric measurements: principles and utility*. International Journal of Energy and Environment. Vol 8. P. 46-54.

Schlager, W., Buffler, R. T., and Scientific Party, 1984. *Deep Sea Drilling Project, Leg 77, southeastern Gulf of Mexico: Geological Society of America Bulletin*, v.95, p.226-236.

Stewart, R.H., 2008. *Introduction To Physical Oceanography*. Department of Oceanography. Texas A & M University, p. 1-313.

Urick, R., 1983. *Principles of Underwater Sound*, McGraw-Hill, 3d Edition, 433 p.

Weinrebe, W., Bohrmann, G., Spiess, V., 2010. *Fluid Seepage of Chile and in the southern Gulf of Mexico (informe Meteor Crucero M67)*. Instituto De Oceanografía, Universidad De Hamburgo. P. 1-110.

Wilson, W.D., 1960. *Equation for the Speed of Sound in Sea Water*. The Journal of the Acoustical Society of America 32. U.S. Naval Ordnance Laboratory, White Oak, Silver Spring, Maryland.