

La geofísica en la delimitación de la plataforma continental de la República de Cuba más allá de las 200 millas marinas en el sureste del Golfo de México

Geophysics in the delimitation of the continental shelf of the Republic of Cuba beyond 200 nautical miles in the southeastern Gulf of Mexico

Liana Ordaz Sánchez¹, Carlos Veiga Bravo², José Gemen Luis Prol Betancourt²

¹ Universidad Tecnológica de La Habana. Calle 114/ Ciclovía y Rotonda. Municipio Marianao. La Habana, Cuba.

² Centro de Investigación del Petróleo. Calle Churruca/ Washington y Vía Blanca. Municipio Cerro. La Habana Cuba

*Autor de correspondencia: lianaordsan@civil.cujae.edu.cu

Resumen

La Convención de Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar regula los límites y el régimen jurídico de las diversas zonas marítimas bajo jurisdicción de los estados, entre las que se encuentra la plataforma continental. Cuba, como estado firmante, cumple con las disposiciones establecidas para demostrar la extensión de su plataforma continental en el sureste del Golfo de México, lo que requiere de la determinación del borde exterior del margen continental.

En el presente artículo se explica la aplicación de los métodos geofísicos: sísmica de reflexión, gravimetría y magnetometría para elaborar un mapa de espesor sedimentario, caracterizar el margen continental cubano en el sureste del Golfo de México y determinar su borde exterior. Se detalla el flujo de trabajo propuesto.

Como apoyo a la caracterización del margen continental cubano en la región; se realizó la interpretación cualitativa integrada de curvas de los campos gravitatorio y magnético, mediante las herramientas de procesamiento de un programa informático especializado.

Se realizó la interpretación de líneas sísmicas 2D del levantamiento BGP-CUPET 2016-2017 y líneas de la Universidad de Texas adquiridas en 1977. La interpretación sísmica demostró la existencia y extensión de las rocas sedimentarias desde la zona del talud continental hacia el interior del oriente la cuenca de Sigsbee y permitió elaborar un mapa de espesores sedimentarios del sureste del Golfo de México. A partir del conocimiento de los espesores sedimentarios en la región, se demostró el cumplimiento de la fórmula de Gardiner en los puntos fijos seleccionados, mediante los que se estableció el borde exterior del margen continental.

Palabras clave: Plataforma continental cubana, margen continental, sureste del Golfo de México, métodos geofísicos.

Abstract

The United Nations Convention on the Law of the Sea regulates the boundaries and legal status of the various maritime zones under the jurisdiction of states, including the continental shelf. Cuba, as a signatory state, complies with the established provisions to demonstrate the extent of its continental shelf in the southeastern Gulf of Mexico, which requires determining the outer edge of the continental margin.

This article explains the application of geophysical methods: reflection seismic, gravimetry, and magnetometry to develop a sedimentary thickness map, characterize the Cuban continental margin in the southeastern Gulf of Mexico, and determine its outer edge. The proposed workflow is detailed.

To support the characterization of the Cuban continental margin in the region, an integrated qualitative interpretation of gravity and magnetic field curves was performed using the processing tools from a specialized computer program.

Interpretation of 2D seismic lines from the 2016-2017 BGP-CUPET survey and lines from the University of Texas acquired in 1977 was carried out. The seismic interpretation demonstrated the existence and extension of sedimentary rocks from the continental slope zone into the eastern of Sigsbee basin and to develop a map of sedimentary thicknesses of the southeastern Gulf of Mexico. Knowledge of the sedimentary thicknesses in the region made it possible to demonstrate compliance with Gardiner's formula at the selected fixed points, through which the outer edge of the continental margin was established.

Keywords: Cuban continental shelf, continental margin, southeastern Gulf of Mexico, geophysical methods.

1. Introducción

El derecho internacional del mar es una de las ramas fundamentales del derecho internacional público que regula las relaciones entre Estados y su documento rector es la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (en lo adelante la CONVEMAR).

La Convención sobre el Derecho del Mar versa sobre: los límites y el régimen jurídico de las diversas zonas marítimas; los derechos de navegación; la paz y la seguridad; la conservación y administración de los recursos marinos vivos; la protección y preservación del medio marino; la investigación científica; las actividades realizadas en los fondos marinos fuera de los límites de la jurisdicción nacional y la solución de controversias entre los Estados. (Naciones Unidas, 2006)

La plataforma continental es una de las zonas marítimas que componen el territorio de un Estado, se encuentran bajo su jurisdicción y sobre las cuales ejerce su soberanía.

El concepto de plataforma continental a efectos de la CONVEMAR se sustenta sobre el concepto científico de margen continental: “La plataforma continental de un Estado ribereño comprende el lecho y el subsuelo de las áreas submarinas que se extienden más allá de su mar territorial y a todo lo largo de la prolongación natural de su territorio hasta el borde exterior del margen continental (...)” (Naciones Unidas, 1999)

Las Directrices Científicas y Técnicas de la CONVEMAR (Naciones Unidas, 1999) establecen los preceptos y exigencias que deben cumplir los Estados para demostrar la extensión de su margen continental más allá de las 200 millas náuticas (M). Ello les confiere la posibilidad de poder demandar la extensión de su plataforma continental.

Varios estados ya han realizado su presentación ante la Comisión del Límite de la Plataforma Continental (CLCS por sus siglas en inglés), para reivindicar sus respectivas plataformas continentales, y recibido sus recomendaciones. Algunos de los más recientes son Francia, respecto

a las islas La Reunión, San Paul y las islas Amsterdam (CLCS, 2020a); Costa de Marfil (CLCS, 2020b); Francia y Sudáfrica en beneficio del archipiélago Crozet y las islas Príncipe Eduardo (CLCS, 2023a), Kenia (CLCS, 2023b) y Nigeria (CLCS, 2023c).

Recientemente, Estados Unidos (EUA), pese a no ser un estado miembro de la CONVEMAR, también realizó un ejercicio para determinar la extensión de su plataforma continental (United States Department of State, 2023).

Cuba, como estado firmante de la CONVEMAR desde 1982, no se encuentra exenta de sus exigencias y realiza los análisis técnicos pertinentes para demostrar la extensión de su plataforma continental en el sureste del Golfo de México.

En el párrafo 4 del artículo 76 de la CONVEMAR se establecen las líneas de las fórmulas en base a las cuales se determina el borde exterior del margen continental. Una de las líneas de las fórmulas estipuladas, demanda la demostración de la existencia de puntos donde se cumpla que el espesor sedimentario sea al menos igual al 1% de la distancia al pie del talud determinado.

La demostración de la prolongación del margen continental de un Estado se realiza sobre la base de datos geológicos, geofísicos, morfológicos, geodésicos e hidrográficos. El presente artículo amplía el papel de la geofísica en la delimitación de la plataforma continental de Cuba más allá de las 200 M.

Objetivos

- Explicar el flujo de trabajo propuesto para determinar el borde exterior del margen continental de Cuba en el sureste del Golfo de México
- Explicar el papel de los métodos geofísicos en la determinación del borde exterior del margen continental de Cuba en el sureste del Golfo de México.

Los resultados del presente artículo forman parte de los argumentos que sustentan la presentación de la República de Cuba a la CLCS durante sus 61 y 62 período de sesiones. Cuba recibió las recomendaciones de la CLCS respecto del Polígono Oriental en el Golfo de México en febrero de 2025 (CLCS, 2025)

2. Materiales y Métodos

El área de interés de la presente investigación es el sureste del Golfo de México, desde la plataforma insular cubana al noroeste de la isla de Cuba hasta las aguas profundas de la Cuenca de Sigsbee, que ocupan la Zona Económica Exclusiva cubana y parte del sector que se conoce como Polígono Oriental, dentro del cual se extiende la plataforma continental que se reivindica. El Polígono Oriental se encuentra ubicado en la zona abisal del Golfo de México, con profundidades entre los 3000 y 3500 m.

La evolución geológica del Golfo de México en su porción sureste está determinada por los procesos geológicos de apertura continental durante el Jurásico Superior. La apertura continental dio lugar a la formación de corteza oceánica y de los sendos taludes continentales de Yucatán y de la Florida (Vasileiou *et al.*, 2024) (Ludin *et al.*, 2025). Posterior al proceso a apertura y deriva continental, durante el Eoceno Medio, prosiguió la colisión de la placa Caribe contra la microplaca de Yucatán en el occidente de Cuba y contra la de Bahamas-Florida en su parte central y oriental, dando lugar a la formación del orógeno cubano. Esta interacción determinó que el orógeno cubano

quedara integrado a la plataforma de Yucatán (Stanek *et al.*, 2009) (Izquierdo-Llaval *et al.*, 2021) (Curry *et al.*, 2024) como un nuevo margen continental o margen continental rediseñado.

Esta rica historia geológica determina las complejas características geológicas y morfológicas del margen continental cubano en la región de estudio, caracterizado por presentar una secuencia integrada de sur a norte por: el cinturón plegado y cabalgado cubano, la cuenca de antepaís, el abombamiento delantero (*forebulge*), la plataforma de Yucatán con el escarpe de Campeche y la llanura abisal.

Para la determinación del borde exterior del margen continental, de acuerdo con las exigencias de la CONVEMAR, se utilizaron datos e informaciones geológicas y geofísicas, que incluyen: información sísmica y de campos potenciales.

Los datos de campos potenciales (gravimétricos y magnetométricos) utilizados durante los análisis fueron adquiridos al unísono de la campaña sísmica multicliente BGP-CUPET 2016-2017. Para la interpretación integrada cualitativa se empleó un módulo de un programa informático especializado, que se basa en la transformada rápida de Fourier y permite aplicar las transformaciones sobre perfiles independientes. Esta forma de procesamiento posibilita visualizar las curvas de forma conjunta y facilita la interpretación integrada.

Los datos gravimétricos utilizados disponían de un procesamiento previo descrito por Yuxing (2017). Este procesamiento consistió en correcciones de deriva, de mareas, de Eötvös, de latitud y topográfica. Incluyó la determinación de la anomalía de la gravedad al aire libre a la que se le aplicó un filtro pasa baja con una longitud de onda de corte de 150m, con el fin de eliminar el ruido. Se aplicaron también los procesos de *leveling* y *microleveling*. Se determinó la anomalía de Bouguer para diferentes valores de densidad, seleccionándose como idóneo 2300 kg/m³.

Para los efectos del presente análisis, se obtuvo la curva del filtro señal analítica con un incremento de ventana de 5 unidades, para reducir los ruidos. La curva del filtro continuación analítica ascendente se aplicó para 15000 unidades terrestres y una distancia de incremento de 1 unidad; de modo que se evidencie el comportamiento de las rocas constituyentes de la corteza ubicadas a grandes profundidades, en gran parte de la región. Ambos filtros fueron aplicados sobre la anomalía de Bouguer, calculada para una densidad de capa de 2300 kg/m³.

Los datos magnéticos, por su parte, incluyen, en su procesamiento de origen, correcciones del campo normal, correcciones diurnas y los procesos de *leveling* y *microleveling* (Yuxing, 2017). Como parte del análisis se determinó la reducción al polo para un valor de inclinación y declinación del campo de 52.67 y -3.42 respectivamente. Se determinó también su primera derivada horizontal con una distancia de incremento de 1 unidad, con el objetivo de facilitar la ubicación del límite entre la corteza oceánica y continental.

La información sísmica de reflexión multicanal utilizada abarca los levantamientos IG2303 y FM1801 (disponibles en la web) de la Universidad de Texas en 1977 y el mencionado levantamiento BGP-CUPET en 2016-2017. Los del levantamiento BGP-CUPET en 2016-2017 se componen por datos migrados en tiempo antes de la suma y migrados en profundidad antes de la suma mediante inversión tomográfica de red. (BGP MULTI-CLIENT, 2018).

Como resultado del procesamiento expuesto por BGP MULTI-CLIENT (2018), se dispuso de las líneas sísmicas del levantamiento de BGP-CUPET 2016-2017 migradas en profundidad y sus respectivos modelos de velocidades de RMS. Las líneas sísmicas y los modelos de velocidad

poseen una buena calidad; fundamentalmente en la parte superior del corte donde se contaba con mayor información de pozos (BGP MULTI-CLIENT, 2018)

Los datos sísmicos de la Universidad de Texas se obtuvieron sumados y fueron sometidos a un proceso de acondicionamiento, migración en tiempo después de la suma y conversión a profundidad por la UCTB Geofísica del Centro de Investigación del Petróleo. Se elaboraron modelos de velocidades RMS, en el programa informático Petrel 2018, mediante la extrapolación de los valores de velocidades conocidos del procesamiento de las líneas de BGP-CUPET 2016-2017. Con los modelos elaborados se realizó la migración en tiempo después de la suma y la conversión a profundidad de las líneas sísmicas en el programa informático Vista 2019.

Se realizó la interpretación sísmica sobre las líneas sísmicas en el dominio de la profundidad: GOM 039, GOM 035, GOM 047, GOM 043, GOM 058, GOM 055, GOM 053, GOM 052 y GOM 062, del levantamiento BGP 2016-2017 y las líneas GT2-15C1a, GT2-15C1b y MC 19, de los levantamientos realizados por la Universidad de Texas. En la Figura 1 se muestra la ubicación de las líneas sísmicas utilizadas pertenecientes a los distintos levantamientos.

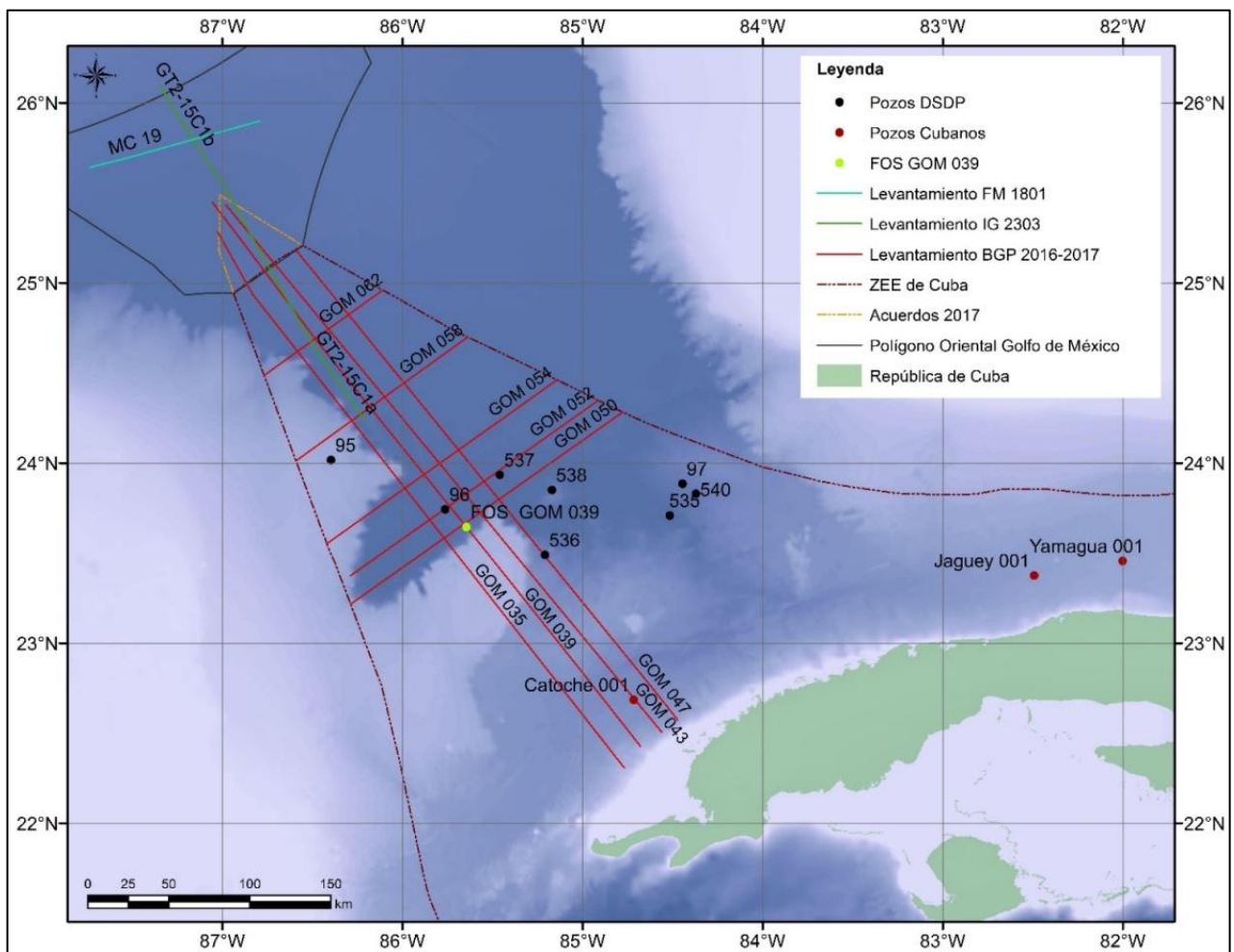


Figura 1. Ubicación de las líneas sísmicas de reflexión utilizadas

El empleo de las líneas sísmicas de los levantamientos realizados por la Universidad de Texas, fueron imprescindibles para demostrar la extensión y potencia de los sedimentos hasta el interior del Polígono Oriental. Ello garantizó la consistencia de la demostración de la extensión del margen continental cubano más allá de las 200M, sobre la base de la fórmula del 1% de espesor sedimentario que figura, en el párrafo 4 del artículo 76 de la CONVEMAR.

A partir de la interpretación del fondo marino y un horizonte identificado como basamento sísmico en las líneas sísmicas citadas, se elaboró un mapa de espesor sedimentario de la región. Para la elaboración del mapa se empleó una red de puntos de 50 x50 y el método de interpolación Kriging.

Posteriormente, se evaluó la fórmula del 1% del espesor sedimentario en los puntos seleccionados sobre la línea sísmica más septentrional: la MC 19. En cada punto se debe cumplir que el espesor sedimentario sea al menos el 1% de la distancia más corta entre pie del talud continental y dicho punto, según estipula el inciso i, párrafo 4, del artículo 76 de la CONVEMAR. Los puntos que cumplen con la formulación anterior, ubicados a una distancia que no supere las 60 M entre ellos constituyen puntos fijos del borde exterior del margen continental. El punto del pie del talud continental (FOS), utilizado para la aplicación de la fórmula se muestra en la Figura 1

Naciones Unidas (1999, 2006) le atribuyen una gran importancia a la evaluación de los márgenes de incertidumbre y el cálculo del error en la posición de los puntos fijos del borde exterior del margen. Para cuantificar el error en los puntos fijos proponen una expresión matemática que considera la incidencia de los errores verticales y horizontales de posición implicados en el proceso.

La principal fuente de error en el posicionamiento horizontal de los puntos se asocia con la exactitud de los datos de navegación y en consecuencia con la antigüedad del levantamiento sísmico. Por su parte, los errores de posicionamiento vertical surgen de la interpretación de los reflectores sísmicos del fondo marino y el tope del basamento; así como del procedimiento de conversión a profundidad, este último de mayor peso, por la incidencia del modelo de velocidades y del método de conversión a profundidad empleado. Según explica Naciones Unidas (2006), los errores verticales se propagan en la componente horizontal, fenómeno que se explica a través de una función geométrica que depende del ángulo de buzamiento del basamento hacia el pie del talud, el ángulo de buzamiento del fondo marino desde el pie del talud y el ángulo de la línea del 1% de espesor de sedimentos. La ecuación 1 constituye la expresión para determinar el error total en el posicionamiento horizontal de los puntos fijos, incluyendo los de componente vertical.

$$Error = \pm \sqrt{((Var(Interp. sísm.))^2 + (Var(Conv. a prof.))^2 + (Var(Nav.))^2)} \dots\dots\dots(1)$$

Para la determinación del borde exterior del margen continental se utilizaron e integraron todos los datos y materiales referidos anteriormente. A continuación, se detalla el flujo de trabajo que se empleó:

- Revisión bibliográfica y análisis de las principales sismosecuencias descritas por Buffler (1991), Feng (1995) y Ludin et al., (2025). Se correlacionaron los límites de las principales unidades geológicas definidos para el sureste del Golfo de México con la información sísmica. Se utilizaron además los resultados de la investigación de Stanek *et al.* (2009) y Snedden y Galloway (2019).
- Análisis de las velocidades de los datos sísmicos de la campaña de BGP-CUPET. Se realizó además la conversión a profundidad de las líneas sísmicas públicas GT2-15C1a, GT2-15C1b y MC 19, pertenecientes a los respectivos levantamientos IG2303 y FM1801 de la Universidad de Texas.
- Interpretación sísmica de las líneas GOM 039, GOM 035, GOM 047, GOM 043, GOM 058, GOM 055, GOM 053, GOM 052 y GOM 062 en formato SEG Y migradas en profundidad. Correlación e interpretación entre los levantamientos de BGP-CUPET, IG2303 y FM1801.
- Interpretación de un horizonte que indique la base de un espesor de sedimentos evidente, denominado “basamento sísmico”.

- Correlación de todos los horizontes y confección del mapa de distribución horizontal de los espesores sedimentarios desde el basamento sísmico hasta el fondo marino.
- Análisis cualitativo de los datos y materiales gravimétricos y magnéticos, como complemento para la interpretación sísmica, obtenidos durante la campaña sísmica BGP y de investigaciones nacionales e internacionales precedentes.
- Cálculo de los espesores de sedimentos.
- Evaluación de la continuidad del espesor de sedimentos desde el pie del talud hasta los puntos fijos a partir de la composición de las líneas sísmicas GOM 039, GT2-15C1a, GT2-15C1b y MC 19.
- Aplicación de la fórmula del 1% del espesor sedimentario a partir de la ubicación del pie del talud (artículo 76, párrafo 4, inciso a, numeral i). Este criterio se aplica sobre los puntos fijos situados sobre la línea sísmica MC 19.
- Evaluación del error en la posición de los puntos fijos que definen la línea del borde exterior del margen continental.

3. Resultados y Discusión

3.1 Interpretación integrada para la caracterización del margen continental cubano

El análisis cualitativo e integral de los datos de campos potenciales permitió identificar los principales elementos geólogo-estructurales que componen el margen continental de Cuba en el sureste del Golfo de México: Cinturón Plegado y Cabalgado Cubano, cuenca de antepaís, el abombamiento delantero y el espolón de Catoche que sede su lugar a la llanura abisal del Golfo de México que se desarrolla sobre corteza de transición y oceánica. Para dicha interpretación se consideraron como referencia los análisis realizados por COPLA (2017) y Gristo *et al.* (2024). En la Figura 2 se muestra la interpretación realizada para la línea GOM 039, cuya ubicación se observa también en la Figura 1.

Como se muestra en la Figura 2, el inicio de la corteza de transición se marca por el mínimo de anomalía de aire libre (línea de puntos morada) según argumenta COPLA (2017) para márgenes continentales pasivos. El inicio de la corteza de transición coincide con una zona de valores máximos del filtro de señal analítica y se encuentra dentro de una zona de efecto de borde caracterizada por presentar semi-grábenes profundos que se pueden identificar en la sección sísmica. La variación brusca de los valores de la primera derivada horizontal del campo magnético y las variaciones descendentes en el filtro de señal analítica que se encuentran en la zona de efecto de borde, son consecuencia del adelgazamiento de la corteza, comportamiento explicado por Izquierdo-Llavall *et al.* (2021). El comportamiento irregular de dichas curvas en este caso se debe a la posición relativa de la línea GOM 039 respecto al Escarpe de Campeche, que determina la gran extensión de la zona de transición.

La aparición de la corteza oceánica se reconoce por la presencia del valor mínimo de anomalía magnética reducida al polo, inferior a -400 nT, que se interpreta como la respuesta del límite entre el basamento oceánico magnético y el basamento continental (COPLA, 2017). El comportamiento ascendente y con ligeros gradientes de las curvas de anomalía de Bouguer, su continuación analítica ascendente y la anomalía de aire libre hacia el noroeste concuerda con la prolongación de la corteza oceánica en esta dirección.

Se demostró también la existencia de grandes espesores de sedimentos, que aumentan hacia el interior de la cuenca de Sigsbee como resultado del proceso de subsidencia experimentado por la cuenca luego del cese de la apertura.

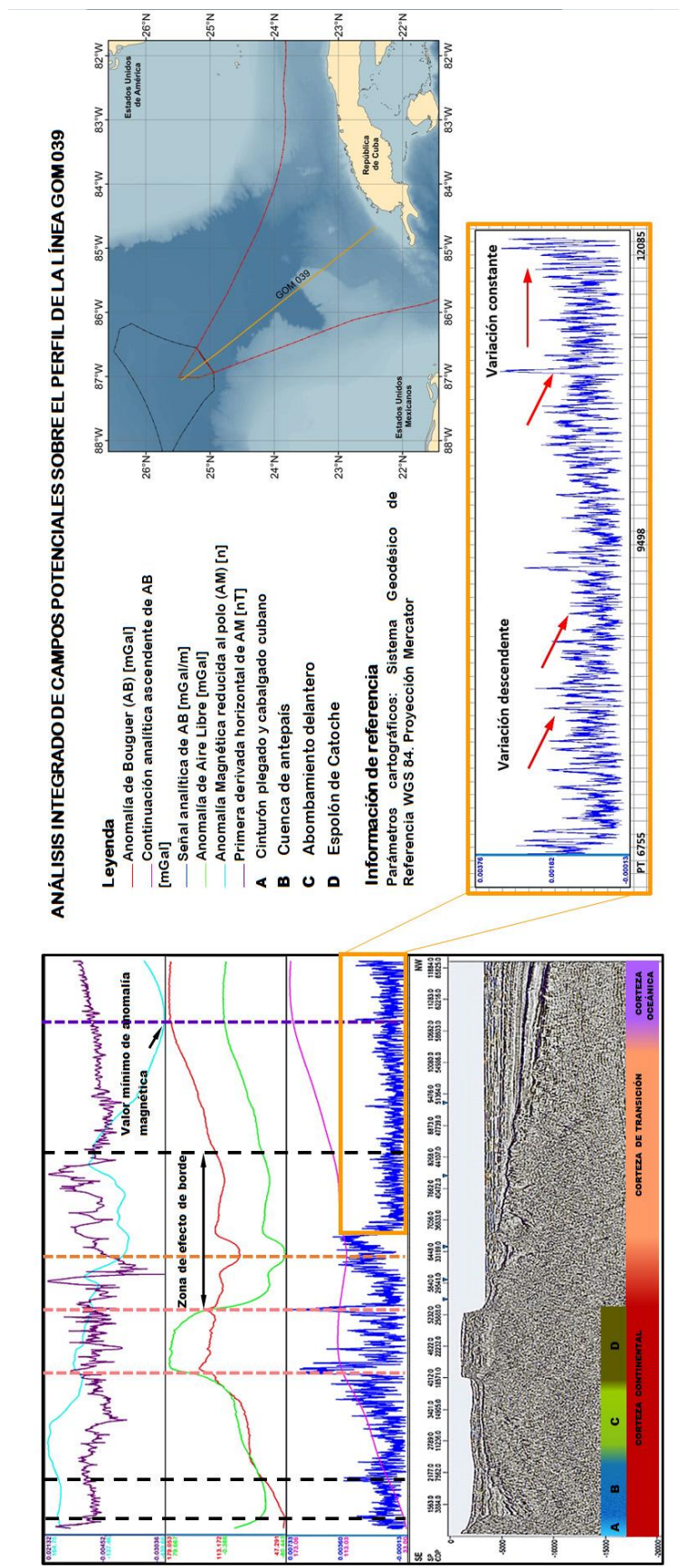


Figura 2. Interpretación integrada de campos potenciales con datos sísmicos en la línea GOM 039

3.2 Interpretación sísmica y determinación del borde exterior del margen continental

La aplicación de la fórmula del 1% de espesor de sedimentos para la determinación del borde exterior del margen continental más allá de las 200 M, demanda conocer los espesores de sedimentos en el área de interés, que resultan de la interpretación de los datos sísmicos de reflexión.

Los datos sísmicos de reflexión multicanal constituyen una de las fuentes de datos recomendadas por la Directrices Científicas y Técnicas de la CONVEMAR (NACIONES UNIDAS, 2006) para la cartografía del basamento y la determinación de los espesores sedimentarios; pues contiene -con un margen de incertidumbre aceptables- información sobre el fondo marino, el basamento, así como de toda la secuencia sedimentaria.

Con dicho fin, se realizó la interpretación de las líneas sísmicas representadas en la Figura 1. Se interpretó el fondo marino y el tope del basamento sísmico que permite calcular los espesores de sedimentos en la región.

La calidad y el alcance del dato sísmico disponible, las grandes profundidades en las que se ubica el basamento ígneo-metamórfico y el potente espesor sedimentario; determinaron que se dificultara la interpretación del tope del basamento y, aunque puede ser cartografiado, genera cierta incertidumbre. Como vía de solución a la problemática de la ubicación del basamento, siguiendo lo planteado por las Directrices, se seleccionó un reflector suprayacente más expresivo que cumple el criterio para la fundamentación del espesor sedimentario y es denominado en lo adelante como “basamento sísmico”. Este reflector marca la existencia de sedimentos por encima de él, que son suficientes para demostrar el cumplimiento de la fórmula de Gardiner.

La identificación del reflector sísmico reconocido como basamento sísmico se apoyó en los atributos sísmicos intensidad de la reflexión, frecuencia instantánea y velocidad RMS, que garantizan resaltar su continuidad.

En la Figura 3 se muestra la interpretación de una composición de las líneas sísmicas GOM 039, GT2-15C1a, GT12-15c1b y MC 19 en su extremo oeste que demuestra la continuidad de los espesores de sedimentos desde un pie del talud determinado al norte del espolón de Catoche y representado en la Figura 1.

A partir de la interpretación de las líneas sísmicas referidas y que se muestran en la Figura 1, fue posible elaborar un mapa con la distribución de los espesores de sedimentos en la región (Figura 4). El mapa de espesor sedimentario permitió constatar que los espesores de sedimentos se incrementan hacia el norte de la región de estudio, de forma concordante con los análisis de los datos de campos potenciales

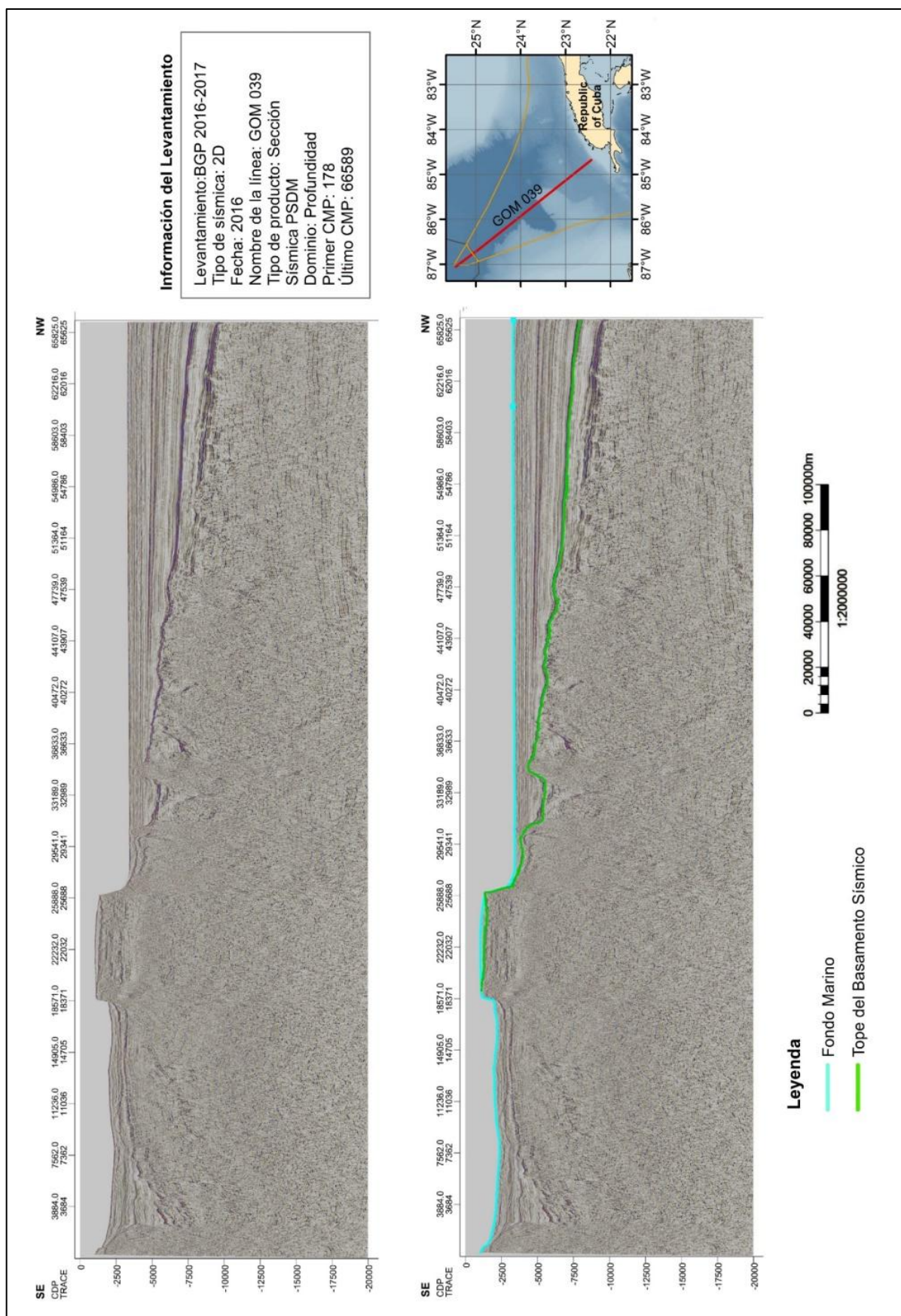


Figura 3. Interpretación sísmica de la composición de las líneas sísmicas GOM 039, GT2-15C1a, GT12-15c1b y MC 19 en su extremo oeste

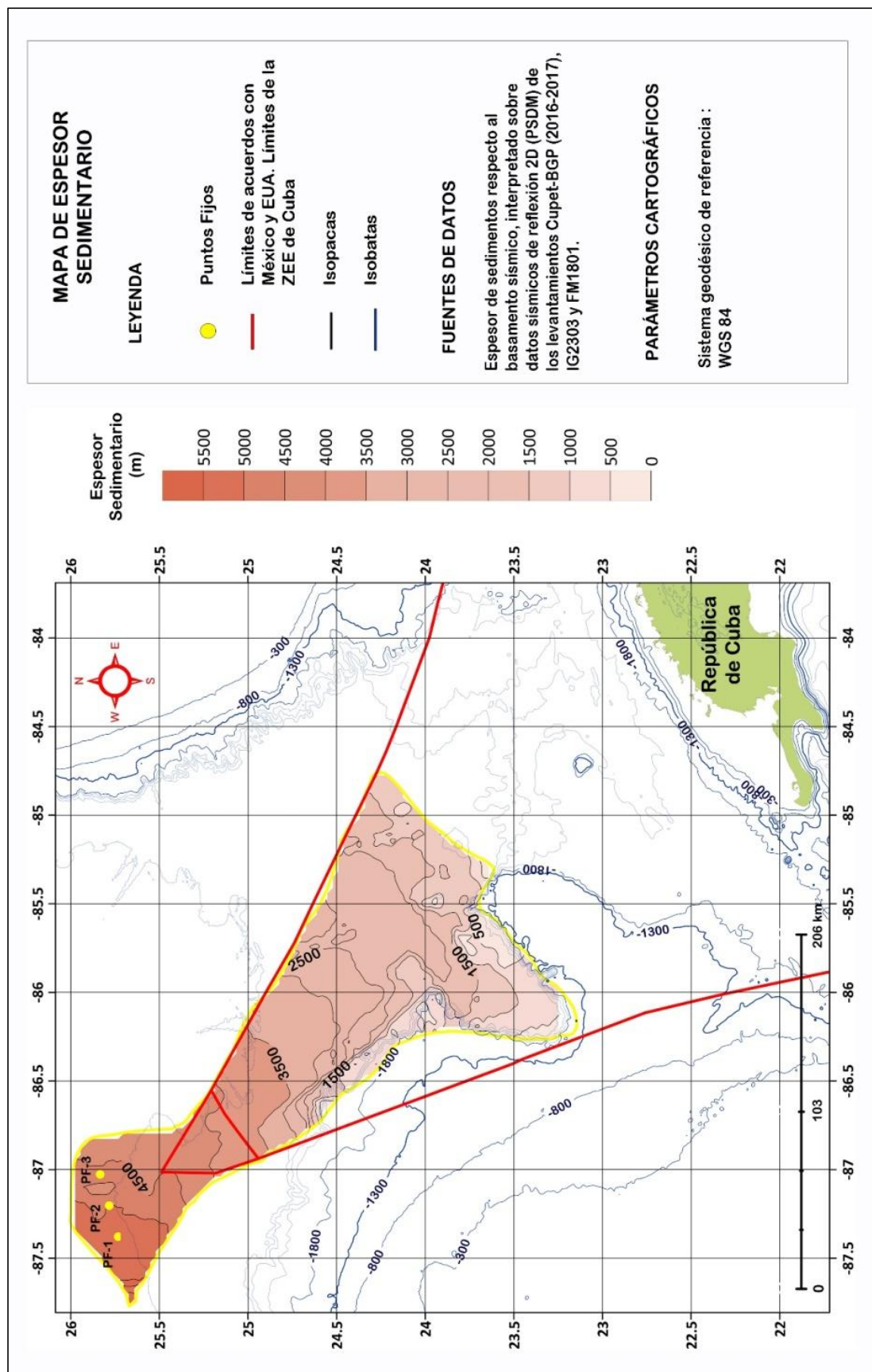


Figura 4. Mapa de espesor sedimentario en la Zona Económica Exclusiva de Cuba en el Golfo de México y la plataforma más allá de las 200 M considerando el basamento sísmico definido

Se determinó el espesor sedimentario en los puntos fijos seleccionados. Los puntos fijos (Figura 4 y 5) se ubican sobre la línea sísmica más septentrional disponible: la MC 19, separados a una distancia que no supera las 10M y de forma que su distribución permite cubrir los límites de los acuerdos de establecidos Cuba-México y Cuba-EUA.

Los valores de espesor sedimentario en los puntos fijos superan los 4600 m, permitiendo sobrecumplir la relación del 1% entre el espesor de sedimento respecto a la distancia al pie del talud. Fue posible demostrar, por tanto, el cumplimiento de la fórmula de Gardiner para los tres puntos fijos y la continuidad de los espesores de los sedimentos desde el pie del talud al norte del espolón de Catoche hasta dichos puntos, como se muestra en la Figura 3. Por tales argumentos los puntos fijos evaluados se consideran puntos del borde exterior del margen continental cubano, que se muestra en la Figura 5.

Se evaluaron los márgenes de incertidumbres en el posicionamiento de los tres puntos fijos considerando las componentes horizontales y verticales del error y acorde con la metodología establecidas en las Directrices Científicas y Técnicas de la CONVEMAR (Naciones Unidas, 2006).

Los valores de incertidumbres en la posición de los puntos fijos son elevados y se comportan en concordancia con los porcentajes de error asumidos, dado el proceso de conversión a profundidad y la antigüedad del sistema de posicionamiento del levantamiento FM1801 al que pertenece la línea sísmica MC 19, realizado en 1992. Los ángulos de buzamiento del tope del basamento sísmico y del fondo marino son bajos, lo que influye también en el aumento sustancial del error durante el cálculo de la propagación del error vertical en la horizontal. A pesar de ello, los valores de errores no superan los 14 km y no sobrepasan la línea de las restricciones de 350 M asumida para el caso de Cuba, según disponen las Directrices Científicas y Técnicas, que se muestra en la Figura 5.

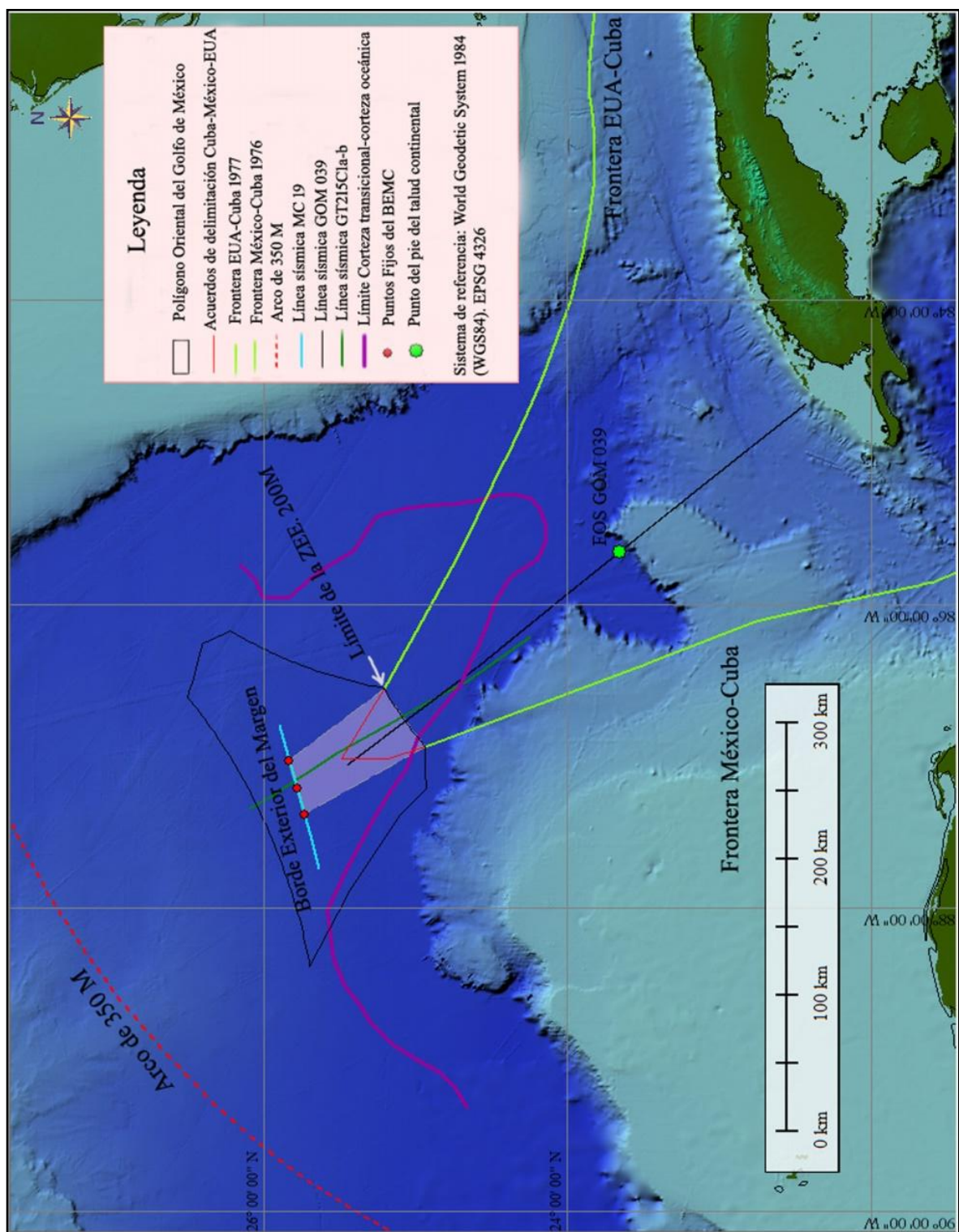


Figura 5. Ubicación del borde exterior del margen continental cubano en el sureste del Golfo de México, determinado según la fórmula del 1% de espesor sedimentario

4. Conclusiones

- El flujo de trabajo seguido para determinar el borde exterior del margen continental de Cuba en el sureste del Golfo de México, abarca la caracterización cualitativa del margen continental de Cuba en el sureste del Golfo, la interpretación de las líneas sísmicas convertidas a profundidad, el cálculo de los espesores de sedimentos, aplicación de la fórmula de Gardiner y el análisis de las incertidumbres
- El papel de los métodos geofísicos en la determinación del borde exterior del margen continental de Cuba en el sureste del Golfo de México fue determinante.
Los métodos sísmicos de reflexión fueron vitales en la determinación de los espesores sedimentarios y en la demostración de su continuidad desde el pie del talud, hasta los puntos fijos. Los espesores sedimentarios se utilizaron para demostrar el cumplimiento de la fórmula de Gardiner y establecer los puntos fijos del borde exterior del margen continental, que constituyen la base para la determinación del límite exterior de la plataforma continental cubana.
El análisis de los datos de campos potenciales posibilitó identificar de forma cualitativa los elementos del margen continental de Cuba en el sureste del Golfo de México: cinturón plegado y cabalgado cubano, cuenca de antepaís, abombamiento delantero, el espolón de Catoche y la llanura abisal. Permitió también, identificar los límites de las cortezas continental, de transición y oceánica, respaldando el desarrollo del margen continental cubano en la región.

Referencias

1. Yuxing, Y. *Gravity and magnetic data acquisition report of CUBA2D-MC2016 Phase I for CUPET/BGP MULTICLIENT*. BGP GRI. China National Petroleum Corporation (CNPC), 2017.
2. BGP MULTI-CLIENT. *2D seismic data pre-stack time migration and pre-stack depth migration processing offshore, Cuba2D-MC2016*. BGP GRI. China National Petroleum Corporation (CNPC), 2018.
3. Buffler, R.T. *Seismic stratigraphy of the deep Gulf of Mexico basin and adjacent margins*. En: Salvador A., *The Geology of North America, Vol. J. The Gulf of Mexico Basin*. The Geological Society of America. 1991. p. 353- 387.
4. CLCS. *Summary of recommendations of the Commission on the Limits of the Continental Shelf in regard to the partial submission made by France in respect of La Réunion Island and Saint-Paul and Amsterdam islands on 8 may 2009*. 2020a. Disponible en: <https://docs.un.org/clcs/52/2>
5. CLCS. *Summary of recommendations of the Commission on the Limits of the Continental shelf in regard to the amended submission made by the Republic of Côte d'Ivoire on 24 march 2016*. 2020b. Disponible en: <https://docs.un.org/clcs/52/2>
6. CLCS. *Summary of recommendations of the Commission on the Limits of the Continental Shelf in regard to the partial joint submission made by the French Republic and the Republic of South Africa in respect of the area of the Crozet archipelago and the Prince Edward islands on 6 may 2009*. 2023a. Disponible en: <https://docs.un.org/clcs/57/2>

7. CLCS. *Summary of recommendations of the Commission on the Limits of the Continental Shelf in regard to the submission made by the Republic of Kenya on 6 may 2009*. 2023b. Disponible en: <https://docs.un.org/clcs/57/2>
8. CLCS. *Summary of recommendations of the Commission on the Limits of the Continental Shelf in regard to the submission made by the Federal Republic of Nigeria on 7 may 2009*. 2023c. Disponible en: <https://docs.un.org/clcs/58/2>
9. CLCS. *Summary of recommendations of the Commission on the Limits of the Continental Shelf in regard to the submission made by the Republic of Cuba in respect of the Eastern Polygon in the Gulf of Mexico on 1 june 2009 and amended on 15 february 2024*. 2025. Disponible en: <https://docs.un.org/clcs/63/2>
10. COPLA. *El margen continental argentino: entre los 33°S y los 55°S en el contexto del artículo 76 de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar*, 2017. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto. Comisión Nacional del Límite Exterior de la Plataforma Continental. ISBN: 978-987-1767-32-8
11. Curry, ME., Hudec, M., Peel, F. y Fernández, N. *Structural Restorations of the Complete Conjugate US-Mexico Eastern Gulf of Mexico Margin*. Tectonics, 2024. 43(1). DOI: <https://doi.org/10.1029/2023TC007897>
12. Feng, J., *Post Mid-Cretaceous Seismic Stratigraphy and Depositional History, Deep Gulf of Mexico*. PhD thesis, 1995. University of Texas at Austin.
13. Gristo, P., Veroslavsky, G. y de Santa Ana, H. *Territorio marítimo uruguayo: soberanía, naturaleza y recursos*, 2024. Montevideo, ANCAP. ISBN: 978-9915-689-22-7
14. Izquierdo-Llavall, E., Ringenbach, J.C., Sapin, F., Rives, T. y Callot, J.P. *Crustal structure and lateral variations in the Gulf of Mexico conjugate margins: from rifting to break-up*. Elsevier, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.105484>
15. Ludin, E., Karner, G., Johnson, C., Doré, A. *Distribution and timing of lithospheric breakup across the Gulf of Mexico: The role of seaward-dipping reflectors, spreading propagators, and crustal shear zones*. Geosphere, 2025. 21(3). DOI: <https://doi.org/10.1130/GES02828.1>
16. Naciones Unidas. *Directrices Científico - Técnicas de la Comisión de Límites de la Plataforma Continental*, 1999. CLCS/11. Disponible en: https://www.un.org.depts/los/clcs_new/documents/Guidelines/CLCS_11A1.htm
17. Naciones Unidas. *Manual de capacitación sobre el trazado de los límites exteriores de la plataforma continental más allá de las 200 millas marinas y para la preparación de presentaciones de información a la Comisión de Límites de la Plataforma Continental, de la División de Asuntos Oceánicos y del Derecho del Mar*, 2006. Nueva York. ISBN: 92-1-333369-2
18. Snedden J.W., W.E. Galloway. *The Gulf of Mexico Sedimentary Basin*. Cambridge University Press. University Printing House, 2019, Cambridge CB2 8BS, United Kingdom. ISBN 978-1-108-41902-4 Hardback.

19. Stanek, K.P., Maresch, W.V. y Pindell, J.L. *The geotectonic story of the northwestern branch of the Caribbean Arc: implications from structural and geochronological data of Cuba*. Sociedad Geológica de Londres, Publicaciones Especiales, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1114/SP328.15>
20. United States Department of State. *The Outer Limits of the Extended Continental Shelf of the United States of America: Executive Summary*. 2023. Washington. Disponible en: Department of State website: <https://www.state.gov/shelf>
21. Vasileiou, A., Gouiza, M., Mortimer, E., Paton, D., Nanfity, A., y Lewis, D. *New insights into the crustal architecture and tectonic evolution of the Eastern Gulf of Mexico*. 2024 Basin Research, 36, e12812. <https://doi.org/10.1111/bre.1281>

Conflicto de Intereses

No existen conflictos de intereses para la publicación del presente artículo.

Contribución de los autores

Liana Ordaz Sánchez. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9452-8764>

Participó en la investigación bibliográfica, la interpretación de los datos gravimétricos y magnetométricos, así como de las líneas sísmicas de reflexión.

Carlos Veiga Bravo. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5249-0458>

Participó en procesamiento (curación) de los datos sísmicos y determinación de los modelos de velocidades sísmicas para la posterior conversión a profundidad de las líneas sísmicas

José Luis Gemen Prol Betancourt. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9283-879X>

Participó durante la investigación y asesoró la posterior interpretación de los datos gravimétricos y magnetométricos.