

ARTÍCULO CORTO

Mapeando el fondo marino del Caribe colombiano: propuesta de un esquema cartográfico de la geomorfología submarina de Colombia (sección sur y central del margen continental)***Mapping the seabed of the Colombian Caribbean: Proposal for a cartographic scheme of the underwater geomorphology of Colombia (South and Central Section of the continental margin)***DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2023.605> Fecha de recepción: 2022-09-23 / Fecha de aceptación: 2023-05-03Yerinelys Santos Barrera¹; María Fernanda Calderón Grande²; Eliana Lizeth Gutiérrez Rincón³; Diana M. Sánchez Reyes⁴; Ómar Sebastián Álvarez Orduz⁵; Dagoberto David Viteri⁶; Jefferson Jean Gianni Uribe Rivera⁷

CITAR COMO:

Santos-Barrera, Y.; Calderón Grande, M. F.; Gutiérrez Rincón, E. L.; Sánchez Reyes, D. M.; Álvarez Orduz, O. S.; David Viteri, D; Uribe Rivera, J. J. G. (2023). Mapeando el fondo marino del Caribe colombiano: propuesta de un esquema cartográfico de la geomorfología submarina de Colombia (sección sur y central del margen continental). *Bol. Cient. CIOH*, 42(1): 39-50. ISSN en línea 2215-9045. DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2023.605>

RESUMEN

Esta publicación muestra los avances obtenidos en el proyecto de mapeado geomorfológico y estructural submarino del territorio marítimo colombiano, el cual parte desde el diseño de un esquema cartográfico para el Caribe que se dividió en 22 cartas a escala 1:250 000. En este trabajo se avanza con la presentación de dos primeras cartas desarrolladas entre los años 2020 y 2021. La elaboración de estas cartas se realizó con el uso de información batimétrica, sísmica 2D, anomalías magnéticas y gravimétricas, y datos satelitales, todo integrado bajo herramientas de sistemas de información geográficas (SIG). Como resultado se obtuvieron las unidades geomorfológicas que caracterizan la parte sur-central del margen continental del Caribe colombiano en dos cartas temáticas enumeradas 1408 y 1409, acorde a lo establecido en el esquema cartográfico diseñado para tal propósito.

PALABRAS CLAVES: geomorfología submarina, Caribe, margen continental, Sinú, abanico del Magdalena, batimetría.

¹ Orcid: 0000-0002-3300-4281. Investigadora Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", isla de Manzanillo, barrio El Bosque, Colombia. Correo electrónico: ysantosb@dimar.mil.co

² Orcid: 0000-0002-2030-5210. Investigadora Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", isla de Manzanillo, barrio El Bosque, Colombia. Correo electrónico: mcalderong@dimar.mil.co

³ Orcid: 0000-0002-0504-6847. Investigadora Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", isla de Manzanillo, barrio El Bosque, Colombia. Correo electrónico: eliana.l.gutierrez@gmail.com

⁴ Orcid: 0000-0003-1537-8981. Investigadora Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", isla de Manzanillo, barrio El Bosque, Colombia. Correo electrónico: ciohshn@dimar.mil.co

⁵ Orcid: 0000-0002-4744-9740. Investigador Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", isla de Manzanillo, barrio El Bosque, Colombia. Correo electrónico: ovalvarezo@dimar.mil.co

⁶ Orcid: 0000-0002-8898-3202. Investigador Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", isla de Manzanillo, barrio El Bosque, Colombia. Correo electrónico: ddavid@dimar.mil.co

⁷ Orcid: 0000-0001-8467-4720. Investigador Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", isla de Manzanillo, barrio El Bosque, Colombia. Correo electrónico: juribe@dimar.mil.co

ABSTRACT

This paper shows the progress made in relation to the project to carry out submarine geomorphological and structural mapping of Colombian maritime territory, which started with the design of a cartographic grid divided into 22 charts at a scale of 1:250 000. This paper presents the first two charts developed between the years 2020-2021. These charts were prepared with the use of bathymetric information, 2D seismic data, magnetic and gravimetric anomalies, and satellite data, all integrated in Geographic Information Systems (GIS). As a result, the geomorphological units that characterize the southern and central part of the continental margin of the Colombian Caribbean were published in two thematic charts numbered 1408 and 1409, as established in the cartographic grid designed for this purpose.

KEYWORDS: *Submarine geomorphology, Caribbean, continental margin, Sinú, Magdalena Fan, bathymetry*

INTRODUCCIÓN

El conocimiento sólido del paisaje geomorfológico del fondo marino es clave para la planificación espacial marítima, la designación de áreas marinas protegidas, la construcción y operación de infraestructura en alta mar y la implementación de programas de monitoreo ambiental (Micallef, Krastel y Savini, 2017). La recolección de información de acceso remoto para mapear el fondo marino resulta difícil de obtener por los altos costos que representa; sin embargo, en la última década, la Dirección General Marítima (Dimar), a través del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH) y el Servicio Hidrográfico Nacional (SHN), ha realizado esfuerzos para fortalecer sus capacidades tecnológicas de investigación en la adquisición de sonares, cuyos datos ayudan a la generación de nuevo conocimiento sobre el fondo marino profundo del Caribe y Pacífico colombiano.

La Dimar tiene la responsabilidad de producir la cartografía náutica nacional, de acuerdo con el numeral 4 del artículo 5° del Decreto-ley N°. 2324 de 1984, y los numerales 2 y 6 del artículo 2° del Decreto N°. 5057 de 2009, igualmente dando cumplimiento del Capítulo V "Seguridad de la Navegación" (Dimar, 2021). De esta forma, desde el CIOH se ha planteado el desarrollo de un esquema cartográfico temático geomorfológico y estructural del territorio marítimo, que consta de 22 cartas a escala 1:250 000 y que poseen la numeración 1400 para el Caribe, en las cuales se delimitan y describen las unidades geomorfológicas del fondo marino del Caribe colombiano.

Este artículo presenta los primeros avances que se han obtenido en el desarrollo del esquema cartográfico para el mar Caribe colombiano, según el mapeo geomorfológico por colores, en el que se delimitan las unidades geomorfológicas y se trazan los lineamientos de fallas de dos sectores ubicados entre los departamentos de Córdoba y Atlántico. El mapeo incluyó el uso de información batimétrica de 250 m de resolución (monohaz), en la plataforma continental, y de 10 m a 50 m (multihaz), en los sectores del talud continental y la llanura abisal del Caribe colombiano; así como interpretación de líneas sísmicas 2D adquiridas y procesadas en el marco de los proyectos de exploración de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), almacenada en el Banco de Información Petrolera (EPIS); información de gravimetría y magnetometría satelital obtenida de la base de datos SEQUEN, correspondiente a los modelos regionales de Sandwell *et al.* (2014), y EMAG2 V3 y el uso de soluciones SIG para el procesamiento y manejo de información georreferenciada.

ÁREA DE ESTUDIO

El cubrimiento de las cartas temáticas 1408 y 1409 abarca la parte marítima de cinco departamentos del Caribe colombiano (Fig. 1), con un área total de cobertura de aproximadamente 33027 km². La carta temática 1408 de geomorfología submarina, en su límite continental, se extiende desde el corte de la costa del departamento de Córdoba, en cercanías de bahía Rada, hasta la zona costera cercana a Galerazamba, en el departamento de Bolívar; en su límite marítimo o área sumergida va hasta

una profundidad de 3300 m, según la batimetría adquirida y procesada por el CIOH. Por su parte, la carta 1409 comprende desde el corte de la costa de Galerazamba, en el departamento de

Bolívar, en el contacto con la carta 1408, hasta las cercanías de Tasajera, Magdalena; en su sección sumergida alcanza la profundidad de 3700 m.

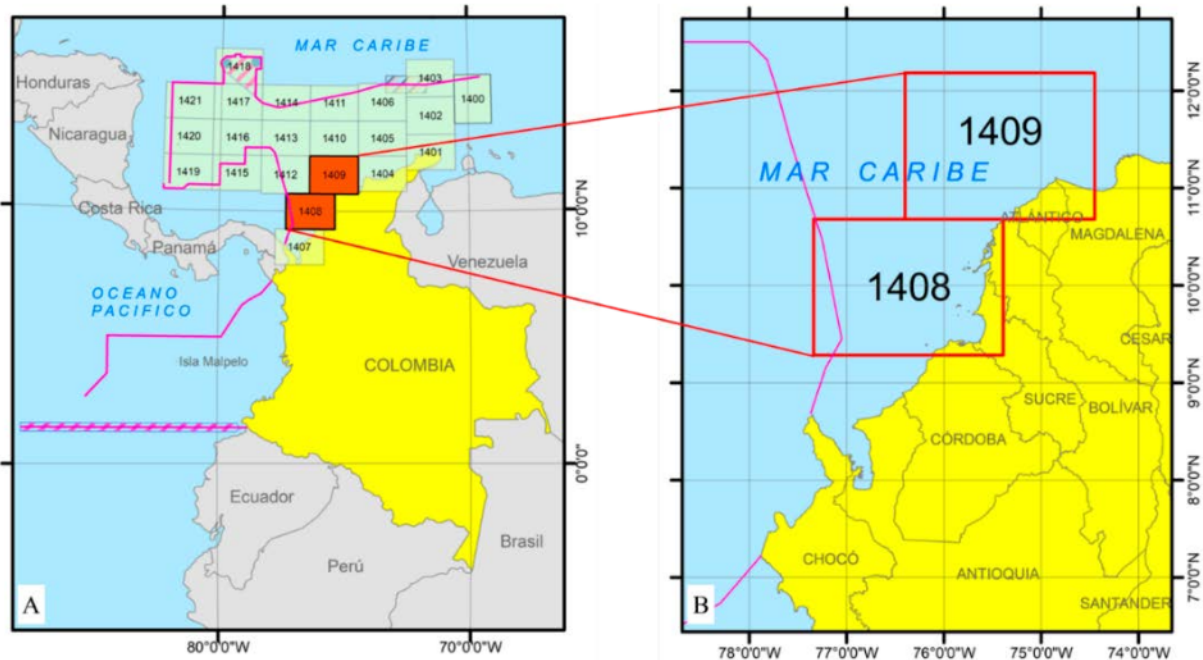


Figura 1. (A). Distribución del esquema cartográfico geomorfológico submarino del Caribe colombiano, 22 cartas a escala 1: 250 000. **(B)** Cartas geomorfológicas 1408 y 1409.

Aspectos geológicos generales del área mapeada

Desde su contexto geológico, el área mapeada se ubica en la zona de influencia del cinturón deformado del Caribe colombiano, el cual, en su sección sur, se encuentra formando el prisma de acreción del Sinú en su parte submarina, producto de la interacción compresiva entre la placa Caribe y la placa Suramericana (Veloza *et al.*, 2012). Hacia el norte continua con la estructura del abanico del río Magdalena, hasta llegar a la Sierra Nevada de Santa Marta, en donde tienen influencia las fallas de Santa Marta, Bucaramanga y de Oca (Cediel, Shaw y Cáceres, 2003). En el continente, las provincias estructurales predominantes son: Serranía del Sinú, San Jacinto, Plato y Sierra Nevada de Santa Marta (Carvajal, 2012). El margen continental es variado y se marca en la isóbata de 200 m, en línea recta, aproximadamente a 79.70 km desde Coveñas, sufriendo un adelgazamiento hacia la sección norte. Se evidencian diferentes procesos

asociados a diques, canales con fenómeno de transportes de masas importantes (Rangel-Buitrago e Idárraga-García, 2010), así como zonas de predominancia escarpada, principalmente en las paredes de cañones y elevaciones importantes del relieve (Vinnels *et al.*, 2010).

El abanico del Magdalena, cuya sección mayor la ocupa la carta 1409, se extiende en un radio de 181.22 km desde la costa del departamento del Atlántico. Esta extensión no es precisa, toda vez que este dato se obtiene a partir del cambio en la batimetría que se observa en los datos analizados, pero se atribuye a lo mapeado y presentado parcialmente en esta carta geomorfológica. Sin embargo, desde el contexto geofísico, se ha dividido la sección total del abanico del Magdalena en abanico superior, medio y bajo. Esto sugiere un cubrimiento en profundidad hasta aproximadamente 4500 m en su sección baja, zona en la cual son escasas las expresiones del relieve en comparación con el talud (Idárraga-García *et al.*, 2019).

METODOLOGÍA

Con el fin de representar las características del relieve submarino, se realizó el mapeo

geomorfológico en el área de cubrimiento, el cual inició en el año 2020, aplicando el flujo de trabajo diseñado por los autores para la elaboración de las cartas temáticas (Fig. 2).

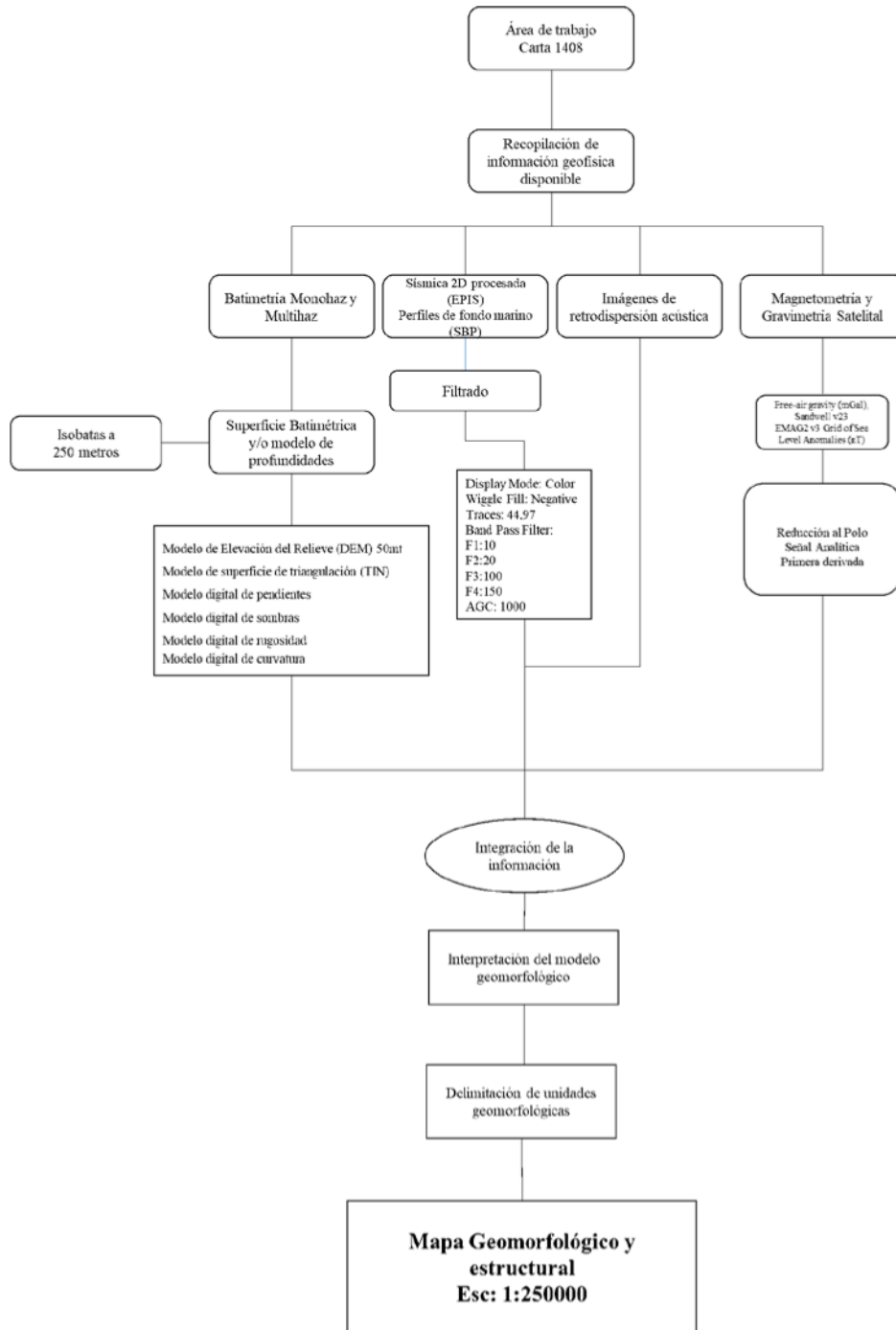


Figura 2. Flujograma metodológico usado para elaboración de cartas de geomorfología submarina del mar Caribe colombiano.

La metodología empleada se basó en los criterios planteados por Micallef *et al.* (2017), que establecen técnicas y métodos para la identificación y mapeo de geoformas submarinas con el uso de sonares. El principal insumo para este trabajo, fue la batimetría suministrada por el CIOH, con la cual se generaron los modelos digitales de profundidad que dieron una visión real en 3D del fondo marino. A esta información se le sumó la sísmica que permitió determinar aquellos procesos de deformación que dieron origen a la configuración del relieve; tales como elevaciones, depresiones, diapiros, deslizamientos, lineamientos y saltos de fallas, entre otros.

Los datos de gravimetría y magnetometría corresponden a una malla de datos satelitales del modelo Sandwell *et al.* (2014) y EMAG2 V3, respectivamente, en una sección del Caribe que incluyó el margen continental, con lo que se obtuvieron lineamientos estructurales regionales y fallamientos. La sísmica usada fue procesada y, por lo tanto, se hizo aprovechamiento de las imágenes con aplicación de filtros para su interpretación (Fig. 2). La interpretación se hizo a partir del modelo Free-air gravity (mGal). Este modelo, basado en datos satelitales, tiene una resolución espacial de $\frac{1}{2}$ longitud de onda de 7 km (Sandwell *et al.*, 2014); la magnetometría (EMAG2V3) tiene resolución de 2 minutos de arco y la altitud de 4 km sobre el geoide (Meyer, Saltus y Chulliat, 2017).

Se generaron imágenes tipo ráster, a partir del modelo de profundidades basado en la superficie, con una resolución espacial de 100 m en aquellas zonas de profundidades mayores a 200 m. Esta superficie en 3D permite la identificación de geoformas y características del terreno submarino, con las cuales se delimitó cada geometría de tipo polígono. La información vectorial digitalizada se incorporó en una geodatabase, con una estructura de almacenamiento definido de tipo feature dataset por temáticas, la cual permitió la estandarización de la información y el ordenamiento de las estructuras, de acuerdo con el esquema de jerarquización geomorfológica propuesto por Carvajal (2012). De esta manera se obtuvo la información temática básica para la elaboración del mapa geomorfológico del área.

Los modelos de profundidades permitieron obtener representaciones digitales del relieve submarino, a partir de las cuales se obtuvieron variables como: la pendiente, rugosidad, sombras y perfiles transversales, entre otras. La integración de datos se realizó considerando la batimetría de menor resolución en la plataforma continental, pero con el máximo aprovechamiento de identificación de estructuras en las zonas de mayor resolución en el talud y la llanura abisal; de modo que con base en la resolución de los datos se estimó prudente desarrollar el mapeo a escala 1:250 000.

Modelamiento SIG

El primer modelo obtenido corresponde al modelo de elevación digital (DEM); el cual, según Olaya (2020), es la pieza clave del análisis geomorfométrico y es el equivalente informático de la cartografía clásica de elevaciones, representada mediante curvas de nivel, que van desde la profundidad de 10 m a 200 m en la plataforma continental y de 200 m a 3700 m del talud a la llanura abisal. Para este caso, el DEM, insumo principal en la ejecución de los demás modelos digitales, fue obtenido a partir de las isóbatas o isóbatas, y la resolución o tamaño de celda de la imagen dependió de la distancia entre ellas.

Los modelos digitales generados incluyeron: modelo de pendientes, en el cuales se identifica el gradiente o rango máximo de cambio en el eje Z para cada celda; modelo de sombras, en el cual se crea un relieve sombreado, considerando el ángulo de incidencia de la fuente de iluminación; modelo de curvatura, el cual aporta la información sobre la concavidad o convexidad de la superficie; modelo de aspectos, el cual brinda la dirección de la pendiente, y el modelo de rugosidad, el cual denota la irregularidad o la accidentalidad del terreno.

La integración de las interpretaciones a los datos geofísicos (batimetría, sísmica 2D, retrodispersión acústica, SBP 2D y herramientas SIG) dio como resultado el mapa geomorfológico de dos secciones, a escala 1:250 000, correspondiente a las cartas temáticas 1408 y 1409. La nomenclatura implementada en la caracterización de las geomorfoestructuras se basó en la jerarquización geomorfológica

planteada por Carvajal (2012). En esta se propone la clasificación de zonas o terrenos de acuerdo con el tamaño y el área que esta ocupe, y al nivel de estudio, o escala, con el que se desee trabajar; es así como se plantea que cada categoría constituye un sistema, y los sistemas inferiores están contenidos en los superiores.

Para el caso de este estudio, realizado a escala 1:250 000, se clasificaron las áreas en unidades. La unidad es la geoforma individual, genéticamente homogénea, generada por un proceso geomorfológico de acumulación o erosión. Para nombrar a cada unidad en la carta temática se utilizó la nomenclatura que contiene el proceso principal de formación o ambiente (denominado región en la jerarquización), más las iniciales del nombre de la geoforma. De esta manera, las unidades geomorfológicas caracterizadas como denudacionales, como por ejemplo, los complejos de flujos detríticos (cfd), complejos de flujos turbidíticos (cft), los depósitos de talud (dt), diques (d) y deslizamientos (dz) se les antepone en mayúscula la letra D; las unidades geomorfológicas caracterizadas como morfoestructurales, por ejemplo, los escarpes (e), depresiones (dp), sierras homoclinales (sh), terrazas (t) y volcanes de lodo (vl) se les antepone en mayúscula las letras MS.

Así las cosas, es importante mencionar los procesos observados en esta clasificación geomorfológica submarina: Denudacional (D), Marino (M), Marino Costero (MC), Marino Denudacional (MD), Marino Morfo Estructural (MMS), Morfo Estructural (MS); y mencionar las geoformas observadas: Área Coralina (ac), Canal (ca), Cañon (cñ), Complejo de flujos de detritos (cfd), Complejo de flujos turbidíticos (cft), Depósito Holoceno (dh), Depósitos de Talud (dt), Deslizamiento (dz), Dique (di), Escarpe (e), Llanura Abisal (lla), Plataforma Continental (pc), Sierra Homoclinal (sh), Valle (v), Volcán de Lodo (vl).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las cartas temáticas obtenidas son producto de la interpretación de variables geofísicas (batimetría, sísmica 2D, magnetometría y gravimetría satelital) y su integración mediante herramientas SIG. La información batimétrica tiene una resolución espacial en rangos de entre

15 m a 250 m, esta última en las zonas más someras como la plataforma continental. A partir de esta se generaron modelos de elevación del relieve (DEM), visualizaciones 3D, perfiles transversales e imágenes GeoTIFF, analizadas con herramientas SIG, de las cuales se extrajeron perfiles, datos de profundidad e isóbatas, que se generaron cada 50 m y 250 m de profundidad para sumarse al modelo.

Interpretación magnetometría y gravimetría satelital

Estas variables mostraron importantes campos anómalos en el prisma de acreción sumergido y el abanico del Magdalena. Las anomalías gravimétricas más importantes presentan valores entre 13.0 mGal y 80.4 mGal, y el comportamiento geomagnético entre 21.9 nT a 94.09 nT; en concentraciones importantes hacia la estructura del abanico, y anomalías negativas o bajas hacia la llanura abisal de la cuenca Caribe (Fig. 3).

La interpretación gravimétrica y geomagnética, determinada por los cambios texturales de las imágenes, permitió la identificación de tres cuencas diferenciadas claramente por el comportamiento y distribución de las anomalías. La Figura 3A, correspondiente a la gravimetría de aire libre, marca anomalías altas en la sección del margen continental, en los puntos anteriormente mencionados, y bajas hacia la zona profunda de la llanura abisal, y sigue aumentado hacia el NW, en dirección de la cuenca Cayos. Una tendencia similar se observa en la magnetometría (Fig. 3B); sin embargo, las mayores anomalías altas definidas se ubican al sur del margen continental, mientras que, las anomalías magnéticas bajas se reflejan hacia la zona de la cuenca Caribe. Como rasgo importante se evidencia coincidencia de las anomalías altas gravimétrica y magnética en la zona del cinturón deformado del Sinú, al sur del área mapeada, tomando gran parte de la sección cartografiada.

Interpretación sísmica 2D

En la sección de las zonas mapeadas se presentan dos estructuras importantes: al norte el abanico del Magdalena y al sur el prisma acrecionado como parte del cinturón deformado

del Sinú. La plataforma continental presenta un adelgazamiento a lo largo de la sección norte de la carta, con evidencias de unidades de coral visibles en la batimetría. Estructuralmente se presenta el fondo marino con importantes elevaciones y depresiones, así como procesos propios de la actividad sedimentaria del abanico del Magdalena (Fig. 4).

La superposición de la información del subfondo, obtenida con la sísmica y la batimetría, permitió la identificación de canales generados por el flujo de sedimentos (Fig. 4), principalmente en el talud continental; así como la presencia a gran escala de estratificación cruzada en la sección del talud (Fig. 5). Estas líneas sísmicas pertenecen a la sección de la carta 1409 del abanico del Magdalena.

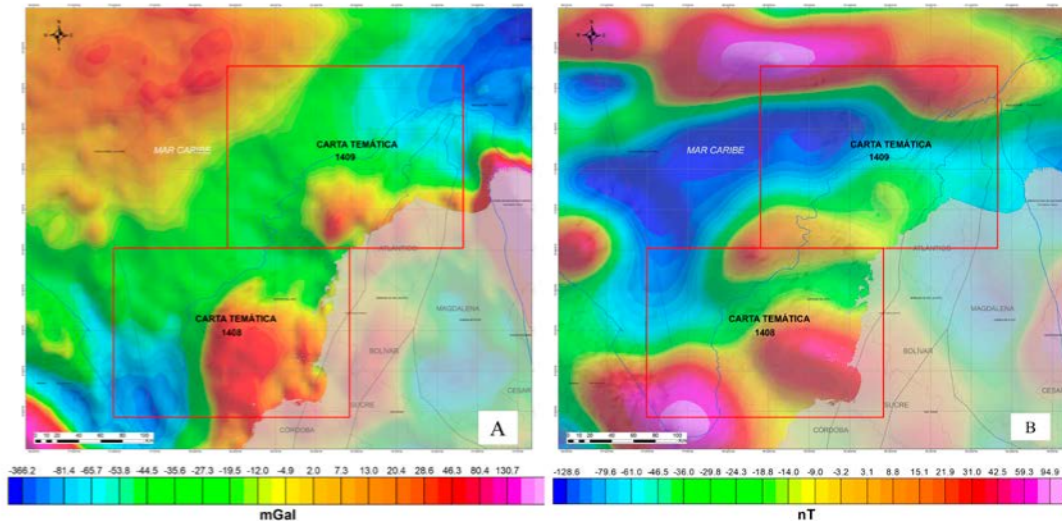


Figura 3. (A) Anomalías de gravedad de aire libre, modelo Sandwell, (B) Anomalía magnética a nivel del mar EMAG v3. Grid tomados de base de datos SEEQUENT. <https://public.dap.seequent.com/>

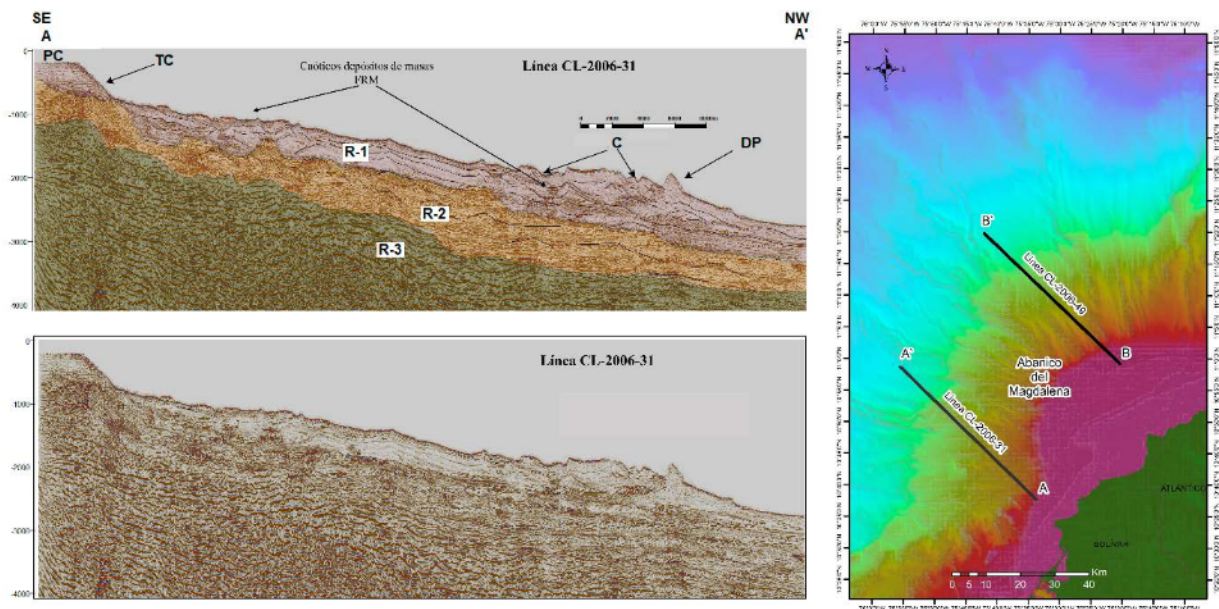


Figura 4. La sección AA' muestra los depósitos sedimentarios del abanico del Magdalena, representado en reflectores sísmicos que dan muestras de la deposición caótica en R-1 y R2, que se asocian con fenómenos de remoción en masa (FRM) y una marcada actividad diapírica. El reflector R-3 corresponde al basamento en la zona. PC: plataforma continental, TC: sección del talud continental, C: canal, DL: Diapiro de lodo.

La sección sur mapeada está constituida por elevaciones sucesivas continuadas y valles orientados en dirección NE-SW, disectadas por canales asociados a un sistema de fallas inversas o de cabalgamiento. Este plegamiento se evidencia hacia la parte más distal de la línea de costa, en límites con la zona abisal, donde se infiere la continuidad del frente de deformación, y se logra identificar algunas fallas normales cubiertas hacia la parte de la plataforma y en la mitad del depósito. Este último se extiende hasta la zona abisal dentro de la cuenca Colombia (Fig. 4).

Esta zona se encuentra afectada por fallas normales hacia la línea de costa y fallas inversas o de cabalgamiento hacia el límite entre la plataforma y el talud continental; sobre este último se identifica el replegamiento importante del cinturón deformado del Sinú sur (Fig. 6).

Continuando hacia el NE vuelve a aparecer el cinturón deformado del Sinú. A este replegamiento, producto de los procesos de deformación de la zona, se denominó sierras homoclinales, debido a la configuración de las capas que a su vez están separadas por valles y disectadas por canales correspondientes a los bloques caídos del sector (Fig. 6). En esta área es más evidente la actividad diapírica, ya que se evidencian protuberancias asociadas a volcanes de lodo. Por otro lado, esta área es afectada por el sistema de fallas de rumbo sinistral de Bucaramanga-Santa Marta, la cual se extiende desde la parte continental (Cediél *et al.*, 2003) hasta la parte submarina. Este sistema genera fallas normales satelitales que afectan el área en la cual la plataforma continental se adelgaza.

Finalmente, las cartas temáticas (Fig. 7) muestran las unidades geomorfológicas en escala de colores, cuyo detalle se identifica en la Tabla 1 y el Anexo 1.

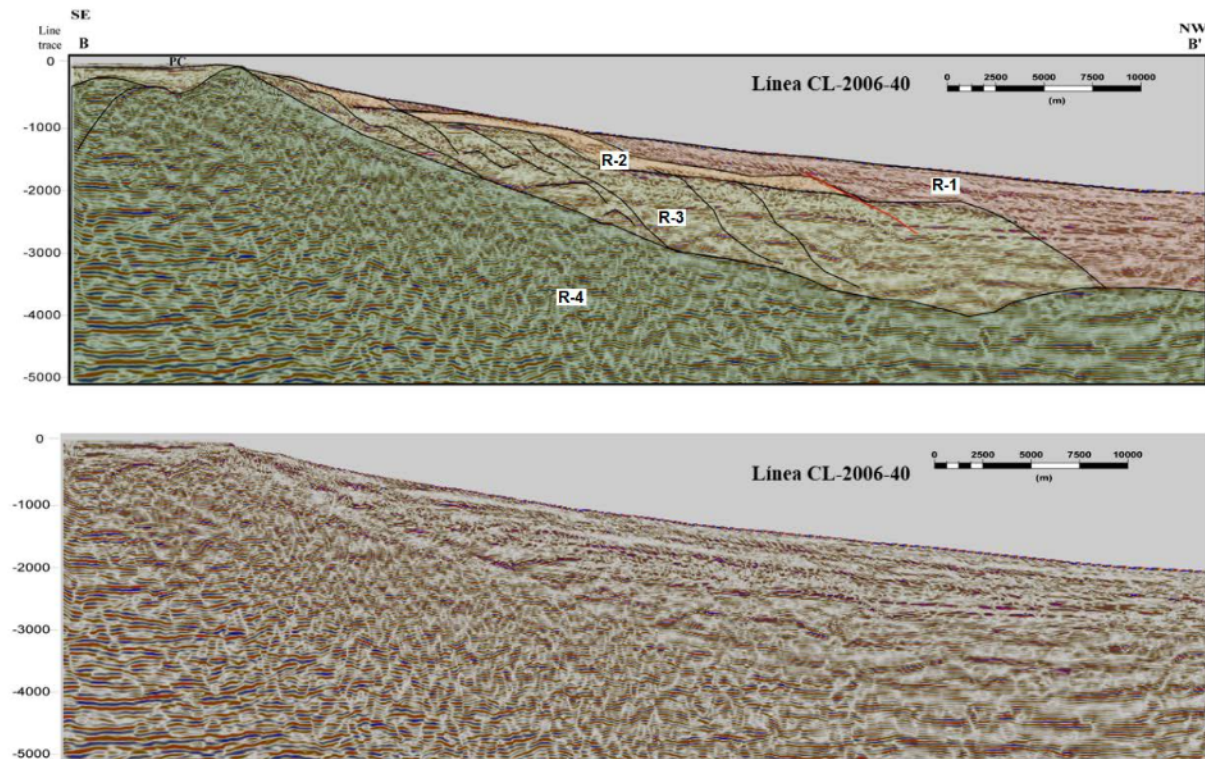


Figura 5. Los reflectores sísmicos R-1, R-2, R-3 evidencian procesos de deposición a escala regional, con reflectores discontinuos, sugiriendo el fallamiento y desplazamiento de las capas. El último reflector R-4 se asocia a la estructura del basamento en la zona.

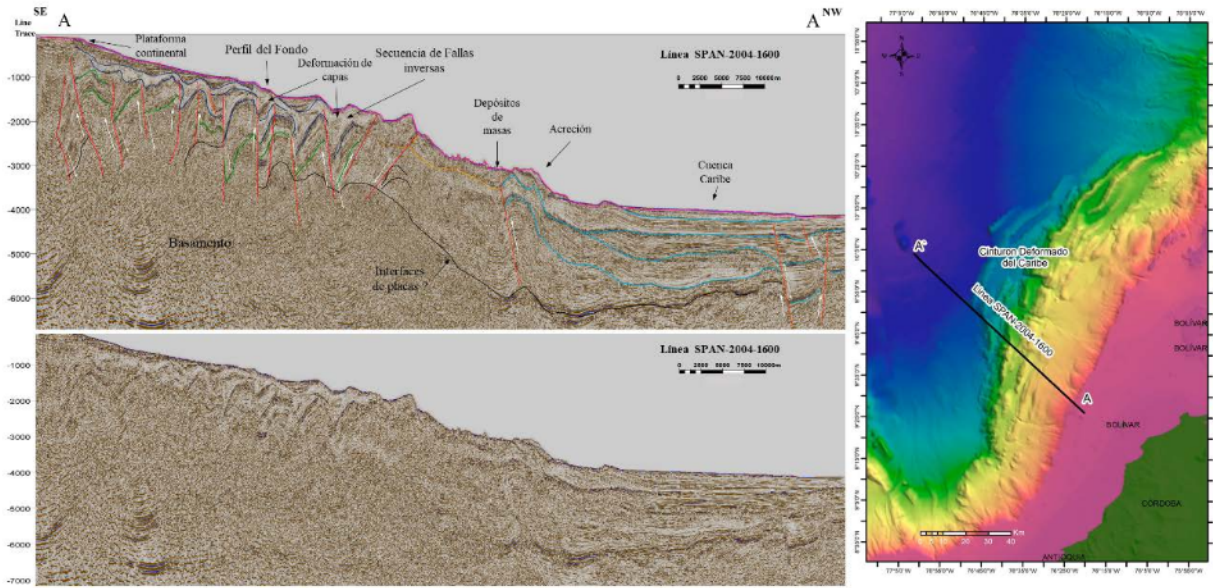


Figura 6. Los reflectores sísmicos son discontinuos cabalgados y deformados hacia el talud, presentado una secuencia de fallas inversa y normales, depósitos de masas junto a acrecionamiento de la placa oceánica en la cuenca Caribe. La línea A-A' corresponde a la sección sur carta 1608.

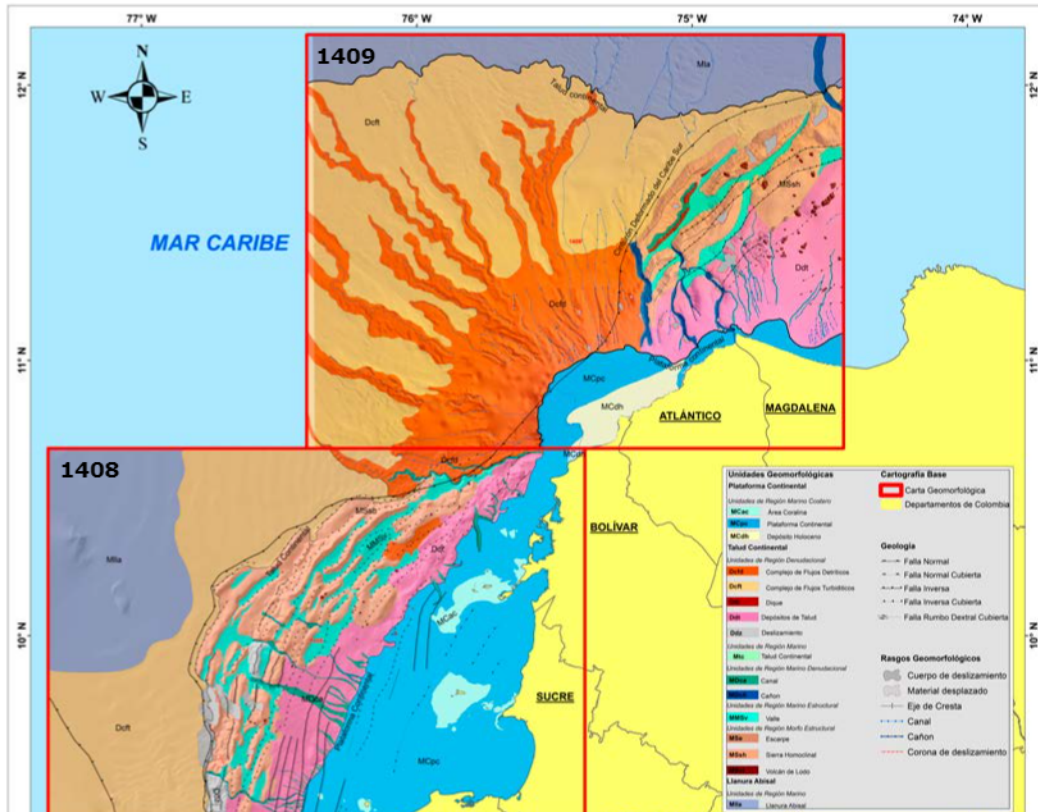


Figura 7. Carta de unidades geomorfológica 1408 y 1409 del mar Caribe colombiano, escala 1:250 000.

Tabla 1. Nomenclatura propuesta para las 229 unidades geomorfológicas delimitadas en las dos cartas geomorfológicas.

| | REGIÓN / PROCESO | UNIDAD GEOMORFOLOGICA | NOMENCLATURA DE UNIDAD | NÚMERO DE UNIDADES |
|--|--------------------------|---------------------------------|------------------------|------------------------|
| CARTA TEMÁTICA 1408 Cinturón deformado del Sinú | MARINO COSTERO | Área Coralina | MCac | 18 |
| | MARINO DENUDACIONAL | Canal | MDca | 40 |
| | DENUDACIONAL | Complejo de flujos de detritos | Dcfd | 2 |
| | DENUDACIONAL | Complejo de flujos turbidíticos | Dcft | 2 |
| | MARINO COSTERO | Depósito Holoceno | MCdh | 1 |
| | DENUDACIONAL | Depósitos de Talud | Ddt | 22 |
| | DENUDACIONAL | Deslizamiento | Ddz | 8 |
| | MARINO | Llanura Abisal | Mla | 1 |
| | MORFO ESTRUCTURAL | Sierra Homoclinal | MSsh | 21 |
| | MARINO MORFO ESTRUCTURAL | Valle | MMSv | 13 |
| MARINO MORFO ESTRUCTURAL | Volcán de Lodo | MSvl | 31 | |
| | | | | Total de Unidades: 159 |
| | REGIÓN / PROCESO | UNIDAD GEOMORFOLOGICA | NOMENCLATURA DE UNIDAD | NÚMERO DE UNIDADES |
| CARTA TEMÁTICA 1409 Abanico Río Magdalena | MARINO DENUDACIONAL | Canal | MDca | 8 |
| | MARINO DENUDACIONAL | Cañon | MDcñ | 4 |
| | DENUDACIONAL | Complejo de flujos de detritos | Dcfd | 1 |
| | DENUDACIONAL | Complejo de flujos turbidíticos | Dcft | 1 |
| | MARINO COSTERO | Depósito Holoceno | MCdh | 1 |
| | DENUDACIONAL | Depósitos de Talud | Ddt | 2 |
| | DENUDACIONAL | Dique | Ddi | 1 |
| | MORFO ESTRUCTURAL | Escarpe | MSe | 1 |
| | MARINO | Llanura Abisal | Mla | 1 |
| | MARINO COSTERO | Plataforma Continental | MCpc | 3 |
| | MORFO ESTRUCTURAL | Sierra Homoclinal | MSsh | 6 |
| | MARINO MORFO ESTRUCTURAL | Valle | MMSv | 5 |
| | MARINO MORFO ESTRUCTURAL | Volcán de Lodo | MSvl | 36 |
| | | | | Total de unidades: 70 |

CONCLUSIONES

Se determinaron 229 unidades geomorfológicas en las cartas 1408 y 1409, las cuales corresponden a procesos estructurales y denudacionales asociados a los ambientes de la plataforma y el talud del margen continental; entre los que se encuentran sierras homoclinales, depósitos de talud, volcanes de lodo, etc., y rasgos geomorfológicos de tipo lineal, tales como canales y cañones.

Asimismo, se identificaron los movimientos en masa y se trazaron los rasgos tectónicos observados en la sísmica 2D, asociados a lineamientos de fallas normales, inversas y de rumbo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al geólogo Henry Carvajal Perico, por su colaboración y orientación con su experiencia y conocimiento

en la interpretación y mapeo de unidades geomorfológicas; al Banco de Información Petrolera, por el suministro de imágenes de sísmica para el desarrollo de interpretación estructural.

FUENTE FINANCIADORA

Este proyecto fue financiado con recursos de funcionamiento y comercialización asignados al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe - Servicio hidrográfico Nacional de la Dirección General Marítima.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: Y. S.; metodología: Y. S.; software: Y. S., M. C., E. G.; visualización: M. C.; análisis: Y. S.; curación de datos: D. S., O. A., D. D., J. U.; redacción y preparación del borrador original: Y. S., M. C., E. G.; redacción, revisión y edición: Y. S. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carvajal, J. H. (Ed.). (2012). *Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia*. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá. 83 pp. <https://doi.org/10.32685/9789589952825>
- Cediel, F.; Shaw, R.; Cáceres, C. (2003). Tectonic assembly of the northern Andean Block. 2003. En: Bartolini C., R. Buffler y J. Blickwede (Eds.). *The Circum-Gulf of Mexico and Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation and plate tectonics, AAPG Memoir 79: 815-848*. <https://doi.org/10.1306/M79877C37>
- Dirección General Marítima. (2021). *Esquema de Cartografía Náutica Nacional*. Cuarta actualización. Dimar. 89 pp. Bogotá.
- Idárraga-García, J.; Masson, D.; García, J.; León, H.; Vargas, C. (2019). Architecture and development of the Magdalena Submarine Fan (southwestern Caribbean). *Marine Geology*, 414: 18-33. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.05.005>
- Meyer, B.; Saltus, R.; Chulliat, A. (2017). *EMAG2v3: Earth Magnetic Anomaly Grid (2-arc-minute resolution)*. Version 3. NOAA National Centers for Environmental Information. <https://doi.org/10.7289/V5H70CVX>
- Micallef, A.; Krastel, S.; Savini, A. (Eds.). (2017). *Submarine geomorphology*. Springer. 556 pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-57852-1>
- Olaya, V. (2020). Sistemas de información geográfica. *Un libro libre de Víctor Olaya*. volaya.github.io/libro-sig/index.html
- Rangel-Buitrago, N.; Idárraga-García, J. (2010). Geología general, morfología submarina y facies sedimentarias en el margen continental y los fondos oceánicos del mar Caribe colombiano. En: INVEMAR (Eds.). *Biodiversidad del margen continental del Caribe colombiano*, 29-51.
- Sandwell, D.; Müller, R.; Smith, W.; García, E.; Francis, R. (2014). New global marine gravity model from Cryo-Sat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure. *Science*, 346: 65-67 <https://doi.org/10.1126/science.1258213>. PMID:25278606
- Veloza, G.; Styron, R.; Taylor, M.; Mora, A. (2012). Open-source archive of active faults for northwest South America. *GSA Today*, 22(10): 4-10. <https://doi.org/10.1130/GSAT-G156A.1>
- Vinnels, J.; Butler, R.; McCaffrey, W.; Paton, D. (2010). Depositional processes across the Sinú accretionary prism, offshore Colombia. *Marine and Petroleum Geology*, 27(4): 794-809. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.12.008>

Anexo 1 - Detalle de las unidades geomorfológicas y cartografía base de las cartas de unidades geomorfológicas 1408 y 1409 del mar Caribe colombiano escala 1:250 000.

| Unidades Geomorfológicas | Cartografía Base |
|---|---|
| Plataforma Continental |  Carta Geomorfológica  Departamentos de Colombia |
| <i>Unidades de Región Marino Costero</i> | |
|  MCac Área Coralina | |
|  MCpc Plataforma Continental | |
|  MCdh Depósito Holoceno | |
| Talud Continental | Geología  Falla Normal  Falla Normal Cubierta  Falla Inversa  Falla Inversa Cubierta  Falla Rumbo Dextral Cubierta |
| <i>Unidades de Región Denudacional</i> | |
|  Dcfd Complejo de Flujos Detríticos | |
|  Dcft Complejo de Flujos Turbidíticos | |
|  Ddi Dique | |
|  Ddt Depósitos de Talud | |
|  Ddz Deslizamiento | |
| <i>Unidades de Región Marino</i> | |
|  Mtc Talud Continental | |
| <i>Unidades de Región Marino Denudacional</i> | |
|  MDca Canal | Rasgos Geomorfológicos  Cuerpo de deslizamiento  Material desplazado  Eje de Cresta  Canal  Cañon  Corona de deslizamiento |
| <i>Unidades de Región Marino Estructural</i> | |
|  MMSv Valle | |
| <i>Unidades de Región Morfo Estructural</i> | |
|  MSe Escarpe | |
|  MSsh Sierra Homoclinal | |
|  MSvl Volcán de Lodo | |
| Llanura Abisal | |
| <i>Unidades de Región Marino</i> | |
|  Mlla Llanura Abisal | |