

Caracterización sedimentológica y morfológica de la bahía de Cartagena (2000-2020)

Sedimentological and morphological characterization of the bay of Cartagena (2000-2020)

DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2022.587> Fecha de recepción: 2021-12-31 / Fecha de aceptación: 2022-08-22

Estefany Paola Villanueva-García¹; Nila Parra-León²; Jansy Parodi Jaramillo³; Juan Camilo Restrepo López⁴

CITAR COMO:

Villanueva-García, E. P.; Parra-León, N.; Parodi Jaramillo, J.; Restrepo López, J. C. (2022). Caracterización sedimentológica y morfológica de la bahía de Cartagena (2000-2020). *Bol. Cient. CIOH*; 41(1): 33-47. ISSN impreso 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045. DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2022.587>

RESUMEN

Esta investigación se centró en la identificación de las unidades morfológicas y la caracterización textural y composicional de los sedimentos de fondo de la bahía de Cartagena, con información del año 2020. Se recolectaron los datos batimétricos disponibles de los últimos 20 años en el Servicio Hidrográfico Nacional, obteniendo datos de levantamientos con tecnología monohaz de los años 2000, 2004 y 2012, y un levantamiento con tecnología multihaz del año 2020. Con esta información se generaron modelos digitales de elevación con los cuales se realizó un proceso de interpretación de geoformas del fondo marino y comparación batimétrica. En este proceso se concluyó que uno de los principales cambios de las geoformas del fondo de la bahía de Cartagena es la progradación del delta y la sedimentación de hasta 18.5 m durante el periodo estudiado, lo cual fue ocasionado por el aporte sedimentario del Canal del Dique. Adicionalmente, se presentan aumentos de profundidad en sectores cercanos a puertos, los cuales pueden deberse a dragados realizados para garantizar la navegabilidad y funcionalidad de los puertos de Cartagena. Con la información textural y composicional de 85 muestras de la bahía, recolectadas cada 1 km en febrero de 2020, se identificó que en la bahía se presenta una gran influencia de sedimentos tipo litoclástico, ya que el 73 % de las muestras se encuentra en esta clasificación; mientras que solo el 4 % de las muestras se clasifica como material bioclástico. De igual forma se observó una predominancia de sedimentos lodosos, con un 65.26 % de muestras clasificadas en este rango de tamaño (4 ϕ a 10 ϕ), seguido de un 31.10 % de arena (-1 ϕ a 4 ϕ) y solo un 3.64 % de grava ($\phi < -1$). Resaltando la prevalencia de sedimentos finos y dando soporte al argumento de varios autores, afirmando que los sedimentos calcáreos presentes en la bahía están siendo cubiertos por sedimentos terrígenos transportados principalmente por el Canal del Dique, el cual cumple un papel fundamental en la sedimentación del área.

PALABRAS CLAVE: morfología, bahía de Cartagena, sedimentos, Canal del Dique.

ABSTRACT

This research focused on the identification of the morphological units and the textural and compositional characterization of the bottom sediments of the Bay of Cartagena, with information from the year 2020. The bathymetric data available for the last 20 years were collected from the National Hydrographic

¹ Orcid: 0000-0001-9584-4721. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH). Correo electrónico: epvillanueva@uninorte.edu.co

² Orcid: 0000-0002-4103-1757. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH). Correo electrónico: nparral@dimar.mil.co

³ Orcid: 0000-0003-1482-162X. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH). Correo electrónico: jparodi@dimar.mil.co

⁴ Orcid: 0000-0001-5696-8625. Universidad del Norte (UniNorte). Correo electrónico: restrepojc@uninorte.edu.co

Service, obtaining data from surveys with single beam technology from the years 2000, 2004, and 2012, and a survey with multibeam technology from the year 2020. With this information, digital elevation models were generated, using which seabed geofoms and bathymetric comparison were interpreted. As a result of this process, it was concluded that one of the main changes in the geofoms of the bottom of Cartagena Bay is the progradation of the delta and sedimentation of up to 18.5 m during the period studied, which was caused by the sediment contribution of the Canal del Dique. In addition, there are increases in depth in sectors near ports, which may be due to dredging carried out to ensure the navigability and functionality of the ports of Cartagena. With the textural and compositional information of 85 samples from the bay, collected every 1 km in February 2020, it was identified that the bay is greatly influenced by lithoclastic sediments, making up 73% of the samples, while only 4% of the samples are classified as being of bioclastic material. Similarly, a predominance of muddy sediments was observed, with 65.26% of samples classified in this size range (4ϕ to 10ϕ); followed by 31.10% sand (-1ϕ to 4ϕ) and only 3.64% gravel ($\phi < -1$). This highlights the prevalence of fine sediments and gives support to the argument of several authors stating that the calcareous sediments present in the bay are being covered by terrigenous sediments transported mainly by the Canal del Dique, which plays a fundamental role in the sedimentation of the area.

KEYWORDS: Morphology, Bay of Cartagena, sediments, Canal del Dique.

INTRODUCCIÓN

Cartagena es uno de los centros de desarrollo económico, urbano, turístico y portuario más importantes del Caribe colombiano. Estas actividades han influenciado en la evolución sedimentológica y morfológica de la bahía de Cartagena. La distribución y caracterización de sus sedimentos fue estudiada por Klingebiel y Vernette (1979) y por Vernette, Lesueur y Klingebiel (1984), quienes generaron la primera carta sedimentológica del país, y, recientemente, por Andrade *et al.* (2004), Franco, Restrepo, Sanabria y Gutiérrez (2013) y Restrepo *et al.* (2013).

Estudios sobre las geofomas de la bahía y sus cambios batimétricos (Vernette, Buitrago, Campos y Llano, 1977; Andrade *et al.*, 2004; Mora, Carvajal, Ferrero, León y Andrade, 2018) y sobre la circulación de la pluma turbia del Canal del Dique (Andrade, Arias y Thomas, 1988; Lonin, Parra, Andrade y Torres, 2004) han sido realizados principalmente debido a la preocupación de los efectos generados por el aporte fluvial del Canal del Dique a la bahía de Cartagena. Estos autores han encontrado cambios en la batimetría y en la distribución de los sedimentos de la bahía. Se ha señalado que el delta del Canal del Dique avanzó más de 3 km hacia la bahía entre los años 1977 y 2004, empezando a comprometer el canal de navegación (Andrade *et al.*, 2004).

El presente estudio tiene como objetivo principal identificar las geofomas del fondo marino de la bahía de Cartagena, así como su caracterización sedimentaria y evolución batimétrica en las últimas dos décadas, con el fin de entender las mayores afectaciones en los procesos de sedimentación y/o erosión en la bahía, principalmente en el sector del Canal del Dique. En el documento se interpretan las geofomas que actualmente presenta el fondo marino de la bahía de Cartagena, y se describen y comparan batimetrías disponibles a partir de información recolectada por el Servicio Hidrográfico Nacional (SHN) en los años 2000, 2004, 2012 y 2020. Además, se presenta un análisis de las propiedades texturales y composicionales de los sedimentos de fondo con base en información recolectada por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH) durante el año 2020, asociando su distribución a las características morfológicas del fondo de la bahía.

ÁREA DE ESTUDIO

La bahía de Cartagena cuenta con un área aproximada de 85.74 km² y se ubica en la plataforma continental del Caribe colombiano, al norte de Suramérica. Se localiza geográficamente entre las coordenadas 10° 16', 10° 26' N y 75° 30', 75° 35' W, con profundidades promedio y máximas de 16 m y 34 m, respectivamente. Geológicamente se encuentra dentro de la

geomorfoestructura del Caribe Suroccidental, en una zona compleja de la provincia del cinturón de San Jacinto. La bahía está separada del mar

Caribe por la isla de Tierrabomba, contando con una conexión al norte en el canal de Bocagrande y al sur en el canal de Bocachica (Fig. 1).

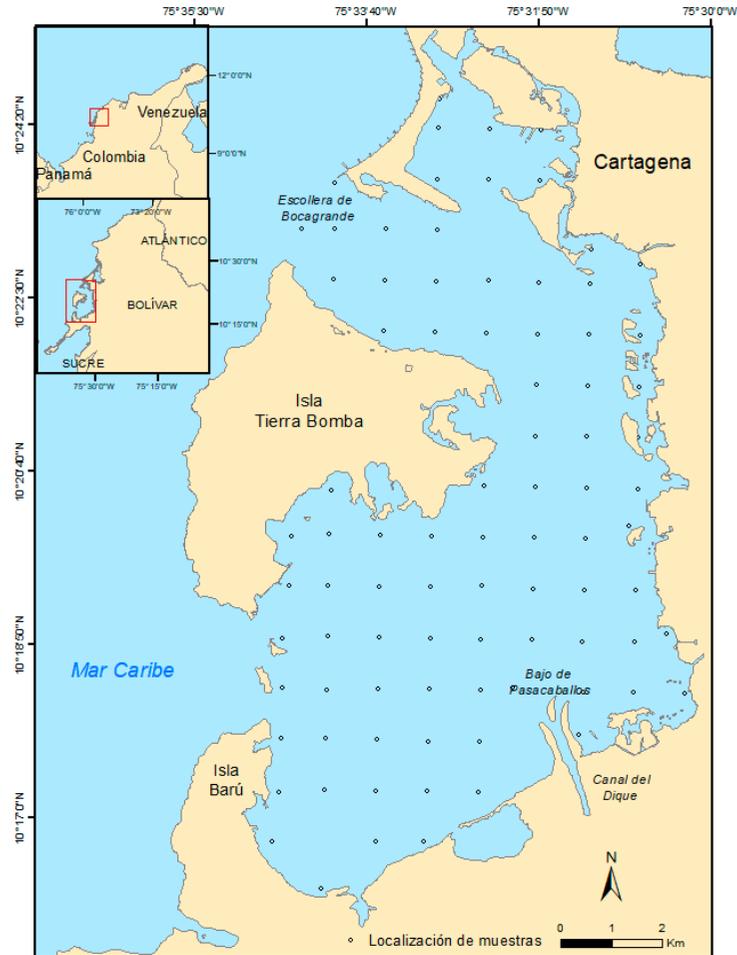


Figura 1. Ubicación del área de estudio y los puntos de muestreo (puntos negros).

El canal de Bocagrande tiene profundidades que varían entre 1 m y 7 m, y está limitado por una escollera submarina construida en la época de la Colonia, entre los años 1768 y 1786, con el fin de impedir la entrada de embarcaciones por la abertura de Bocagrande, entre la punta de la isla de Tierrabomba y la punta de Icacos (Díaz y Serrat, 2019). El canal de Bocachica es el principal sector navegable que conecta la bahía de Cartagena, por lo que es una zona en la que se evidencian dragados con los que se han logrado profundidades máximas de 30 m (Andrade *et al.*, 2004).

En la bahía se presentan dos temporadas climáticas principales y un periodo de transición. La época seca comprende desde diciembre hasta abril, caracterizándose por una disminución de las precipitaciones y aumento en las velocidades de vientos. La época húmeda se extiende desde agosto hasta noviembre, presentándose un aumento en las precipitaciones y disminución en las velocidades de los vientos. Finalmente, el periodo de transición se presenta entre abril y julio, caracterizándose por iniciar con vientos del norte para finalizar con vientos del sur (Molares, 2004). La marea en la bahía es semidiurna,

mixta y micromareal, con un rango de amplitud promedio de 33.5 cm (Rueda, Otero y Pierini, 2013).

METODOLOGÍA

Para realizar el análisis de la evolución batimétrica de la bahía de Cartagena se recolectó la información disponible de los últimos 20 años en el SHN. Se adquirieron datos de levantamientos con tecnología monohaz realizados en los años 2000, 2004, y 2012, con los cuales se generaron modelos digitales de elevación (MDE) a una resolución de 10 m. Además, se obtuvo información de un levantamiento con tecnología multihaz para aguas someras llevado a cabo en el año 2020, con una resolución de 5 m.

Los MDE fueron generados en el software CARIS HIPS and SIPS 11.3 para cada periodo disponible. Estos modelos representan la batimetría referida que consiste en la profundidad del suelo oceánico en relación con el nivel del mar. En Colombia los levantamientos batimétricos y cartas náuticas oficiales realizadas por el SHN se encuentran referidos en la vertical al nivel medio de las bajamares de sicigia (MLWS, por sus siglas en inglés), garantizando el mismo nivel de referencia al momento de realizar la comparación entre los MDE de diferentes periodos. Esta corrección es efectuada utilizando las mediciones recolectadas por estaciones mareográficas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) y de la Dirección General Marítima (Dimar), con base en la metodología explicada en el estudio realizado por Pulido, De Lisa, Viteri y Guzmán (2013).

El insumo principal para la interpretación de las geoformas del fondo marino de la bahía fue el MDE del año 2020, con base en la información obtenida de un modelo de sombras y un modelo de pendientes generados con las herramientas disponibles del Software ArcGIS 10.8 y el módulo de observación en 3D del Software CARIS Base Editor 4.2. Un modelo de sombras es un archivo ráster de relieve sombreado. Se generó utilizando la función *Hillshade*, con ángulo azimutal de la fuente de luz de 315° y altitud con un ángulo de la fuente de luz sobre el horizonte de 45°. Un modelo de pendientes es un análisis del gradiente de inclinación del fondo oceánico. Este modelo se obtuvo por medio de la herramienta

Slope, estableciendo cinco rangos de inclinación en grados que incluyen desde plano, suavemente inclinado, hasta escarpado, basado en Smith y Taft (2000), como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de inclinación de ladera de geoformas submarinas. (Fuente: Smith y Taft, 2000).

Rango de pendiente	Descripción
0° - 3°	Plana, suavemente inclinada
3.01° - 6°	Inclinada
6.01° - 12°	Muy inclinada
12.01° - 19°	Abrupta
>19.01°	Escarpada

Se identificó la diferencia entre los MDE de cada año con relación al año posterior, mediante un proceso de comparación batimétrica, obteniendo la diferencia de profundidad entre los años 2000-2004, 2004-2012 y 2012-2020 con MDE a una resolución 10 m. Este procedimiento se realizó en el software CARIS HIPS and SIPS 11.3, empleando la herramienta *Difference*. Adicionalmente, se realizaron tres perfiles de profundidad de los años 2000 y 2012 en la zona cercana a la desembocadura del Canal del Dique, con el objetivo de comparar las diferencias batimétricas en los años seleccionados. Los perfiles se realizaron en las batimetrías de estos dos años debido a la densidad de datos en el área analizada.

La información de dragado y ampliación del canal de Bocachica suministrada por la Capitanía de Puerto de Cartagena (CP05), correspondiente al año 2005, registra una extracción aproximada de 2000 m³, en una longitud de 20 m; para el año 2010 realizaron dragado y ampliación del canal para la cual registran un volumen aproximado de 254 488 m³, alcanzando una profundidad promedio de 15 m (Dimar-CP5, 2010).

Los datos sedimentológicos disponibles corresponden a información recolectada por el CIOH para el proyecto Distribución del Sedimento de Fondo de la Bahía de Cartagena (Padilla y Villanueva, 2020). Durante el proyecto se recolectaron 85 muestras de sedimento de fondo distribuidas en una malla con espaciado de 1 km. En la campaña se utilizó un sistema GPS Garmin modelo 72 H, con una precisión de ± 2 m y una draga tipo Van Veen, que fue lanzada

manualmente desde una embarcación para cada recolección. A cada muestra se le realizó caracterización textural y determinación de contenido de CaCO₃ en los laboratorios del CIOH.

El contenido de CaCO₃ se determinó utilizando 0.25 g de sedimento normalizado con 4 ml de HCl (10 %) en un calcímetro de Bernad. La clasificación composicional se obtuvo siguiendo el esquema propuesto por Vernet (1978) (Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación composicional según el contenido de CaCO₃ establecido por Vernet (1978)

Nombre	Contenido de CaCO ₃	Nombre	Contenido de CaCO ₃
Bioclástico	Superior al 85 %	Litobioclástico	Entre 50 % y 15 %
Biolitoclástico	Entre 85 % y 50 %	Litoclástico	Menor al 15 %

La distribución de tamaño de grano se obtuvo implementando dos métodos: tamizaje y análisis de difracción laser LA-300. Los resultados obtenidos por ambos métodos se ingresaron al software GRADISTAT (Blott y Pye, 2001) para

determinar su clasificación textural de acuerdo con la escala de distribución de tamaño de Udden (1914) y Wentworth (1922), modificada y adaptada en el software GRADISTAT (Tabla 3).

Tabla 3. Escala de distribución tamaño de Udden (1914) and Wentworth (1922) modificada y adaptada en el software GRADISTAT.

Clase textural		Tamaño		Clase textural		Tamaño	
		µm	Phi (φ)			µm	Phi (φ)
Gravas	Gravas finas	4000	-2	Lodos	Limo muy grueso	31	5
	Gravas muy finas	2000	-1		Limo grueso	16	6
Arenas	Arenas muy gruesas	1000	0		Limo medio	8	7
	Arenas gruesas	500	1		Limo fino	4	8
	Arenas medias	250	2		Limo muy fino	2	9
	Arenas finas	125	3		Arcilla	0	10
	Arenas muy finas	63	4				

Finalmente, el tratamiento geoestadístico de la información sedimentológica se realizó por el método de interpolación Natural Neighbor, una de las herramientas del software ArcGis 10.8, que permite generar una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersos. Esta interpolación consiste en encontrar el subconjunto de muestras más cercano al punto de consulta, aplicando los pesos en función de las áreas proporcionadas para interpolar un valor (Sibson, 1981). De esta forma se generaron superficies con la clasificación textural y composicional de los sedimentos de fondo para determinar los patrones de distribución superficial de los sedimentos y complementar el análisis de la bahía de Cartagena.

RESULTADOS

Geoformas del fondo marino

El análisis cualitativo realizado con la batimetría del fondo marino del año 2020, con resolución de 5 m, permitió identificar diferentes unidades de geoformas en la bahía de Cartagena (Fig. 2). Esta, en su margen continental y las islas de Manzanillo, Tierrabomba, Barú y pequeñas islas está conformada por el plano de plataforma continental (PPC), una geoforma relativamente plana con profundidades inferiores a 7 m (figuras 2A y 2B). Esta unidad geomorfológica se conecta con el fondo de la bahía por medio de una ladera (LD) rugosa, que consiste en una franja amplia al

oeste de la bahía que alcanza hasta los 600 m de ancho y cuenta con pendientes escarpadas que oscilan entre los 20° y 25°. Mientras que en la zona oriental de la bahía se observa una ladera

más angosta, con 200 m de ancho y pendiente abrupta que oscilan entre los 10° y 20° (figuras 2A y 2B).

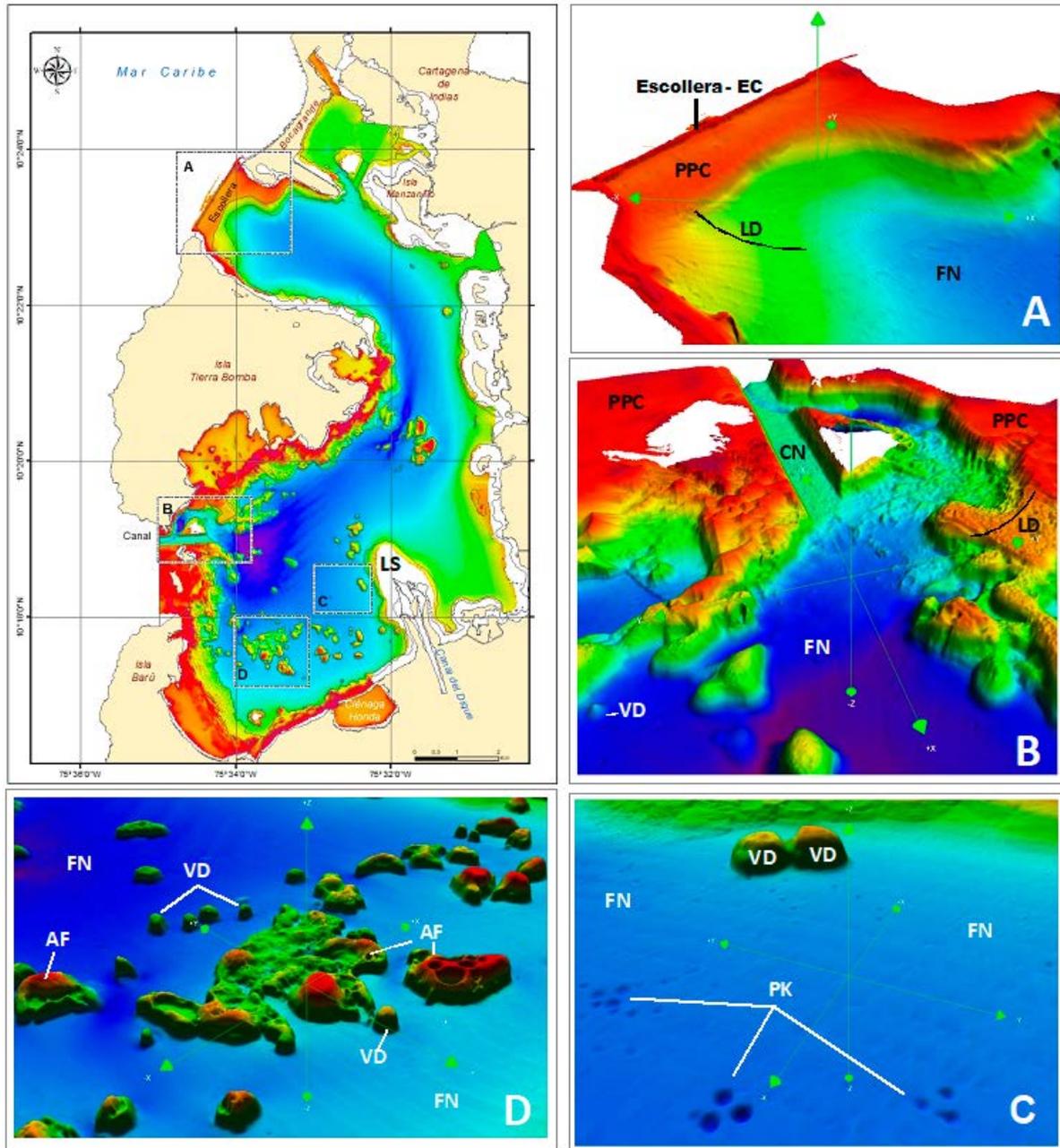


Figura 2. Unidades geomorfológicas: plano continental (PPC), ladera (LD), fondo (FN), arrecife (AF), volcán de lodo (VD), pockmarks (PK), canal (CN), lóbulo de sedimento (LS), escollera (EC).

La unidad geomorfológica más amplia identificada en la bahía de Cartagena es el fondo (FN), que cuenta con un área de 46 km² y presenta una superficie de plana a suavemente inclinada, con profundidades desde los 7 m hasta los 34 m (figuras 2A, 2B, 2C y 2D). Al sur de la bahía, dentro de esta unidad de fondo marino, se encuentran elevaciones que alcanzan aproximadamente los 20 m y conforman la unidad de arrecife (AF), que se evidencia principalmente en el centro y sur de la bahía con un área de cobertura de 2.3 km² (Fig. 2D).

Se identificaron en la zona sur de la bahía de Cartagena las geoformas producto la emanación de lodo y gases propuestos por Mora *et al.* (2018). Esta actividad diapírica se concentra al sur de la bahía, la conforman 42 montículos de base redondeada que se elevan en forma de cono hasta los 12 m, aproximadamente, con cimas redondeadas, posiblemente ocasionadas por las emanaciones de lodo, que constituyen la presencia de volcanes de lodo (VD) (Fig. 2C). Igualmente, se identificaron alrededor de 151 pockmarks (Pk) que consisten en depresiones circulares con diámetros entre los 20 m a 40 m, y profundidades que alcanzan los 3 m (figuras 2C y 2D). Estas geoformas, generalmente, son ocasionadas por actividad diapírica en una zona activa de emanación de gases (Mora *et al.* 2018).

Al sureste de la bahía de Cartagena se localiza la desembocadura del Canal del Dique. Esta descarga sedimentos directamente a la bahía, originando un lóbulo de sedimentos (LS) que consiste en un depósito sedimentario de origen fluvial, que por su condición lodosa y somera dificulta realizar el levantamiento batimétrico, por lo que se evidencia ausencia de datos en la zona más somera (Fig. 2).

El Canal de Bocachica, canal (CN), es una forma de relieve que constituye el principal canal de acceso al suroeste de la bahía de Cartagena, permitiendo el tránsito de embarcaciones. En esta zona se realizan dragados de manera periódica para mantener el dimensionamiento adecuado. A la fecha de recolección de la información batimétrica esta forma del relieve contaba con una profundidad aproximada de 20.5 m y ancho de solera entre 180 m y 200 m (Fig. 2B).

Finalmente, la escollera (EC) también es una

forma del relieve de origen antrópico, construida durante los siglos XVI y XVII en el fondo de la bahía de Cartagena (Fig. 2A). Es una obra de ingeniería subacuática localizada al norte de la bahía para restringir el paso de embarcaciones grandes por la abertura de Bocagrande (Díaz y Serrat, 2019). Esta estructura puede influir en el flujo de corrientes y sedimentos, principalmente en el norte de la bahía.

Evolución batimétrica

Las principales diferencias en las batimetrías del periodo A (2000-2004) se observan en un lóbulo formado al norte del Canal del Dique, donde se presentan disminuciones de las profundidades de hasta 13 m. Esto evidencia una fuerte sedimentación en una zona en la cual se observaban profundidades entre los 10 m y 20 m en el año 2000; mientras que en el año 2004 se presentaron profundidades entre los 2 m y 15 m (Fig. 3A).

Durante este periodo en el resto de la bahía se observan diferencias con valores promedio entre -2 m y 2 m; con excepción de las zonas cercanas a la costa de la isla de Tierrabomba, los bajos de Ciénaga Honda, y los bancos de Palito y Santa Cruz, donde se presenta principalmente el proceso de erosión, con aumentos de profundidad.

En el periodo B (2004-2012) se observa la creación de un lóbulo de sedimentación similar, localizado en el bajo Pasacaballos, con diferencias de profundidades entre los 4 m y 21 m. Adicionalmente, en el sector cercano al muelle Contecar se presenta una zona con valores que indican un aumento en la profundidad, lo cual puede estar relacionado a dragados realizados para garantizar la navegabilidad de la zona cercana al muelle. En el resto de la bahía no se observan diferencias en rangos tan elevados como los mencionados anteriormente (Fig. 3B).

En el periodo C (2012-2020) se presentan las mayores diferencias en los canales de acceso, los puertos, algunos bajos y, especialmente, en el bajo Pasacaballos. Se observa una diferencia marcada con valores negativos que indican una disminución en la profundidad de las áreas. En el canal de Bocachica se observan diferencias entre 3 m y 10 m, y en zonas cercanas al muelle de Contecar y Mamonal se presentan valores de diferencias de

hasta 13 m. Además, se observa un aumento de profundidad de hasta 8 m en la zona de acceso a la Sociedad Portuaria, localizada entre Castillogrande y la Isla de Manzanillo. Finalmente, existe una

progradación del delta de aproximadamente 500 m y la sedimentación genera una disminución de profundidad entre los 5.8 m y 18.3 m en el bajo de Pasacaballos (Fig. 3C).

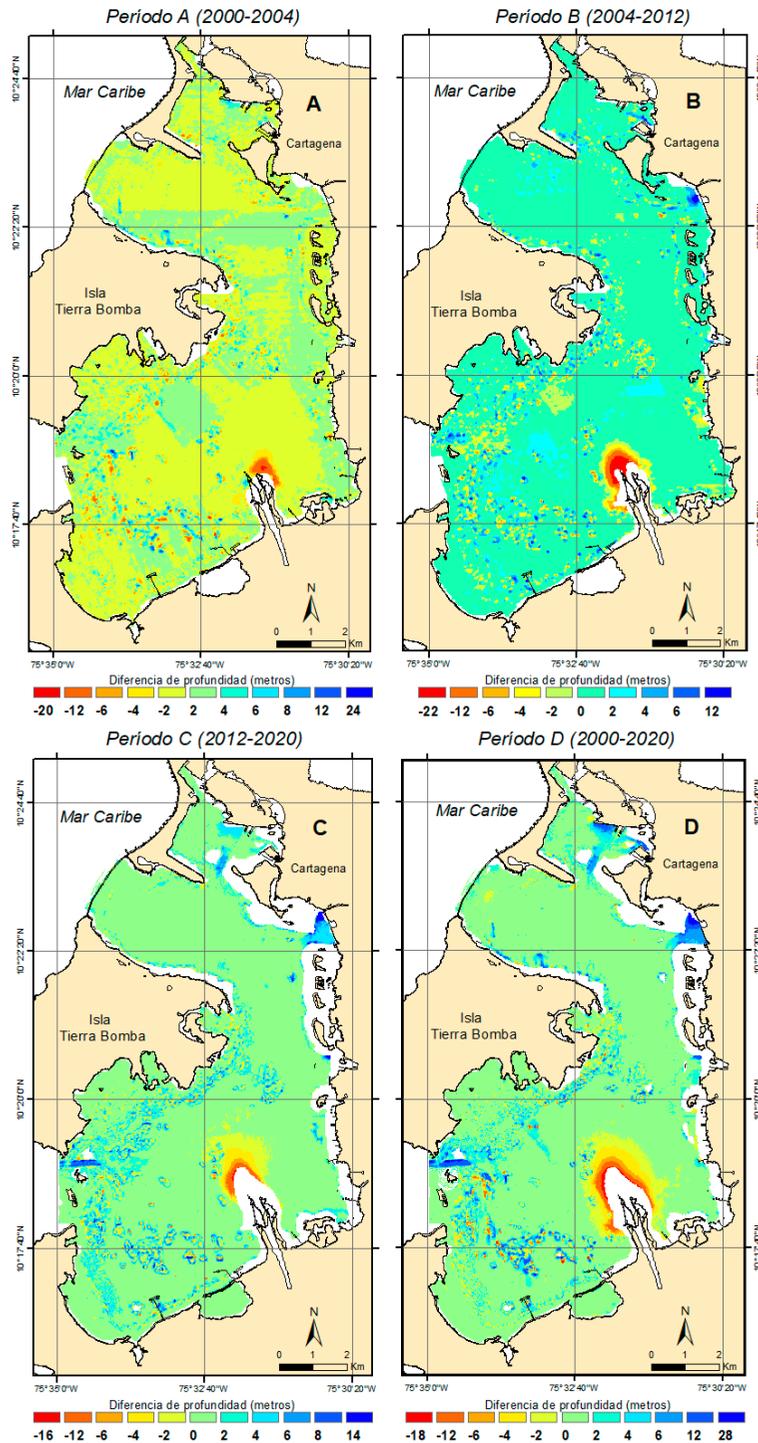


Figura 3. Vista 2D de la diferencia entre las batimetrías de la bahía de Cartagena en cuatro periodos de los últimos 20 años.

Al revisar las diferencias en las batimetrías de los últimos 20 años en la bahía de Cartagena se encuentran características similares a las descritas anteriormente en cada periodo. Se observan aumentos de profundidad con diferencias hasta de 16 m en las zonas cercanas al muelle de Contecar, la Sociedad Portuaria y Mamonal. De igual forma, en el sector navegable del Canal de Bocachica se presentan diferencias de profundidad entre 3.5 m y 17.2 m (Fig. 3D). Un caso opuesto es lo que se observa en el bajo de Pasacaballos, donde se presenta una progradación del delta de aproximadamente 1 km y una tasa de sedimentación que ha generado disminuciones de profundidad de hasta 18.5 m en el periodo D (2000-2020). Finalmente, se observan algunas diferencias de hasta 10 m en las zonas cercanas a la costa de la isla de Tierrabomba, los bajos

de Ciénaga Honda y los bancos de Palito y Santa Cruz (Fig. 3D).

Los perfiles de profundidad realizados para los años 2000 y 2012 evidencian una disminución de hasta 20 m en las profundidades alrededor de la desembocadura del Canal del Dique, indicando una tendencia de sedimentación en los 12 años estudiados (Fig. 4). Como se mencionó anteriormente, los perfiles fueron realizados con las batimetrías de estos dos años debido a la densidad de datos en el área analizada, siendo que en el levantamiento realizado en el año 2020 no se obtuvo información en la zona somera del bajo. Esto se evidencia en la Figura 3, donde se observa la ausencia de datos en la zona cercana a la desembocadura del Canal del Dique y algunos sectores cercanos a la costa.

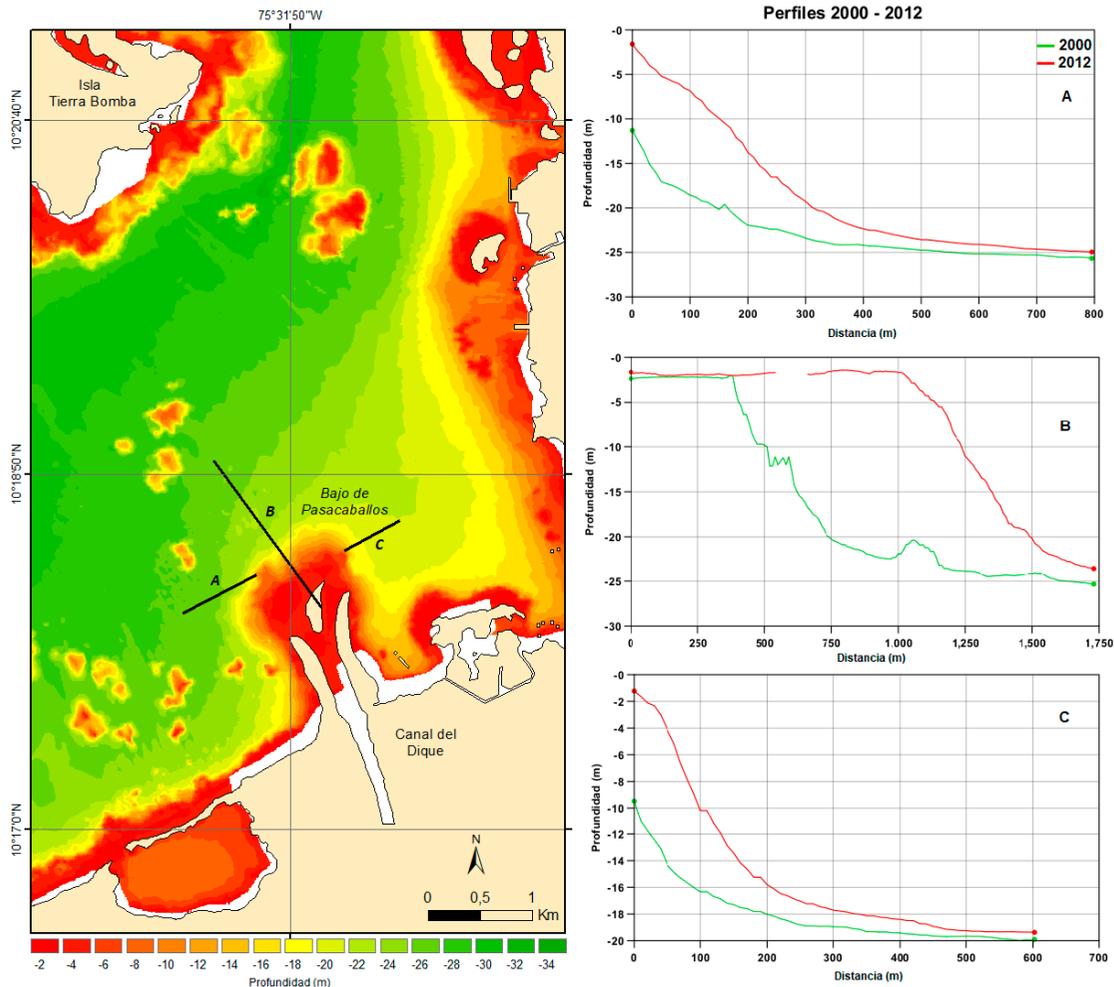


Figura 4. Perfiles de profundidad en las batimetrías de los años 2000 y 2012.

Los perfiles se realizaron en diferentes direcciones, como se observa en la Figura 4, donde se localizan sobre la batimetría del año 2000. Estas direcciones fueron seleccionadas con la intención de cubrir el talud del bajo de Pasacaballos y observar las diferencias de profundidades a cada lado; evidenciando un patrón de sedimentación similar en los perfiles A y C, con disminuciones de profundidad de hasta 10 m (figuras 4A y 4C). Sin embargo, en el perfil B, localizado en el frente del Canal del Dique, se observa una fuerte sedimentación que genera un desplazamiento del talud de aproximadamente 600 m costa afuera, demostrando una progradación del delta con diferencias de profundidades de hasta 20 m (Fig. 4B).

Análisis sedimentario

Los sedimentos recolectados en la bahía de Cartagena se clasificaron por medio del software GRADISTAT de acuerdo con el tamaño de grano, su selección, asimetría y curtosis. En las muestras recolectadas en la bahía de Cartagena se observa

una predominancia de sedimentos de lodo con un 65.26 % de muestras clasificadas en este rango de tamaño (4ϕ a 10ϕ), seguido de un 31.10 % de arena (-1ϕ a 4ϕ) y solo un 3.64 % de grava ($\phi < -1$). Con esta distribución se resalta la prevalencia de sedimentos finos en la zona, presentándose un tamaño de grano promedio de 5.08ϕ , que fluctúa entre -2.36ϕ y 9.85ϕ .

La selección de los sedimentos recolectados se clasifica desde muy bien seleccionados hasta muy pobremente seleccionados, con una predominancia en sedimentos pobremente seleccionados ($\phi = 1.46 \pm 0.61$). Además, el 35 % de las muestras recolectadas evidencian simetría ($-0.1 \leq \phi \leq 0.1$), con un valor promedio de asimetría de 0.05 ± 0.28 . Finalmente, el valor de curtosis clasificó los sedimentos desde muy platicúrticos hasta extremadamente leptocúrticos, con una curtosis media de 1.30 ± 1.51 (Tabla 4). La proyección de estas variables se representa en la Figura 5, donde se observa su distribución en la bahía.

Tabla 4. Características texturales de los sedimentos superficiales de la bahía de Cartagena.

Características texturales	Parámetros estadísticos			
	Promedio	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo
Tamaño de grano (ϕ)	5.08	2.55	-2.36	9.85
Selección (ϕ)	1.46	0.61	0.04	2.87
Asimetría (ϕ)	0.05	0.28	-0.72	0.85
Curtosis (ϕ)	1.30	1.51	0.58	10.63
Grava (%)	3.64	12.57	0.00	100.0
Arena (%)	31.10	36.52	0.00	100.0
Lodo (%)	65.26	40.60	0.00	100.0

Se identificó que el sedimento en el rango de tamaño de grava se encuentra únicamente en la Escollera de Bocagrande, siendo sedimentos con buena selección, simétricos y muy platicúrticos; mientras que el sedimento fino se observa en la costa sur de la isla de Tierrabomba, donde se encuentran limos y arcillas pobremente seleccionados, simétricos y mesocúrticos. En otros sectores como la bahía interna en Bocagrande, el muelle Contecar, el bajo de Pasacaballos y la franja costera de Mamonal se observan sedimentos arenosos, con selección de pobre a moderada y asimetría hacia los finos. Por su parte, en el canal de Bocachica se encuentran

arenas con selección de muy pobre a pobre, simetría hacia los gruesos y leptocúrticas. El resto de la bahía está conformada principalmente por sedimentos lodosos con selección pobre, simétricos y mesocúrticos (Fig. 5).

La distribución de los contenidos de carbonato de calcio ($\%CaCO_3$) evidenció que el área presenta una gran influencia de sedimentos de tipo litoclástico, ya que el 73 % de las muestras se encuentra en esta clasificación, correspondiente a menos del 15 % de contenido de $CaCO_3$; seguido de un 13 % de sedimentos clasificados como litobioclástico y un 10 % como biolitoclástico.

Solamente un 4 % de las muestras se clasifica como material bioclástico, presentando más de un 85 % de CaCO_3 (Fig. 6).

El material biolitoclástico y litobioclástico se observa distribuido principalmente en las zonas costeras como la bahía interna de Bocagrande,

la franja costera entre el muelle Contecar y Mamonal, la costa de la isla de Barú, Ciénaga Honda y del noreste de la isla de Tierrabomba. De igual forma también se observa una agrupación de este material en el canal de Bocachica. El resto de las zonas de la bahía de Cartagena se caracteriza por sedimento litoclástico (Fig. 6).

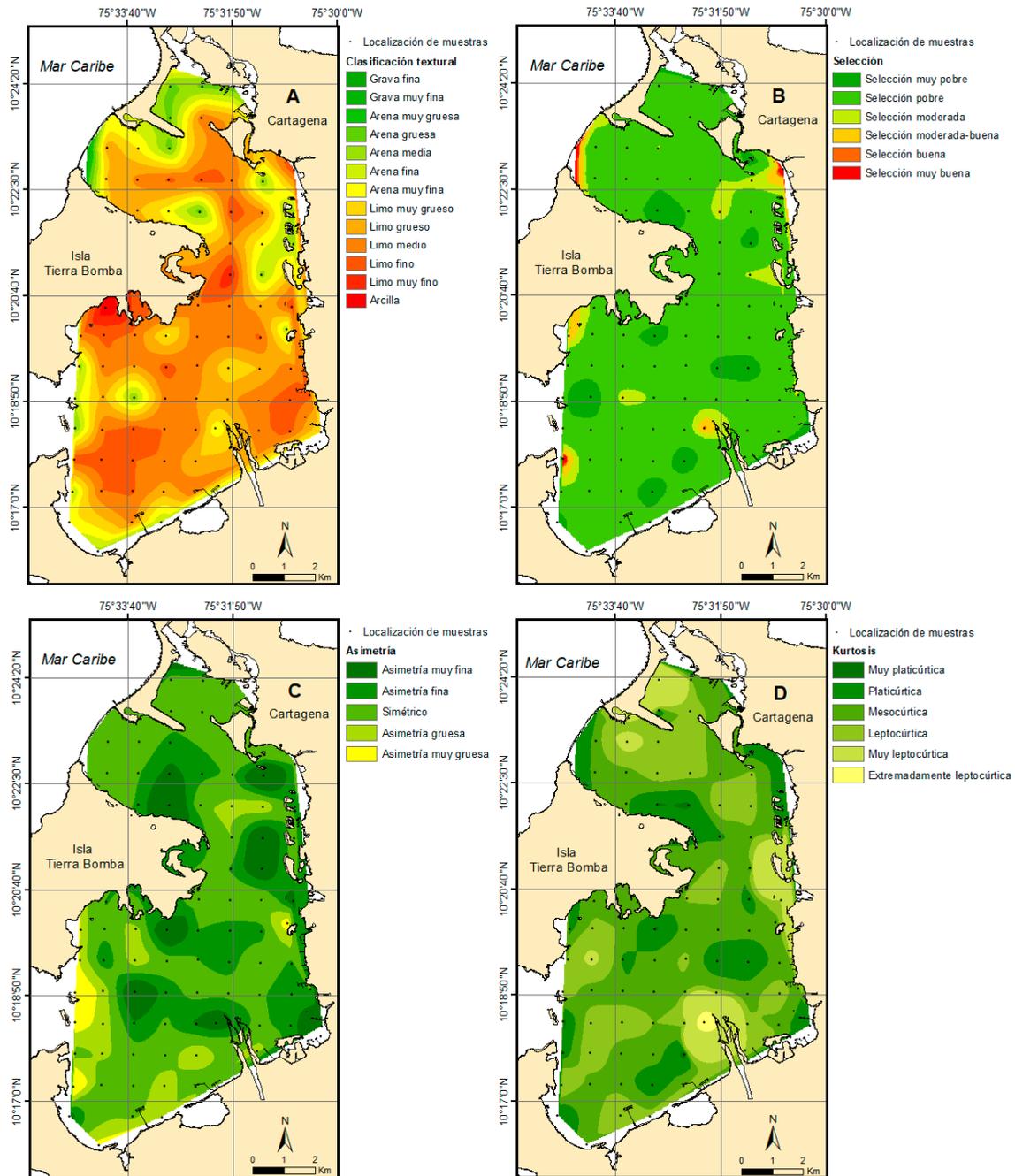


Figura 5. Visualización de la distribución de las características texturales de los sedimentos superficiales de la bahía de Cartagena.

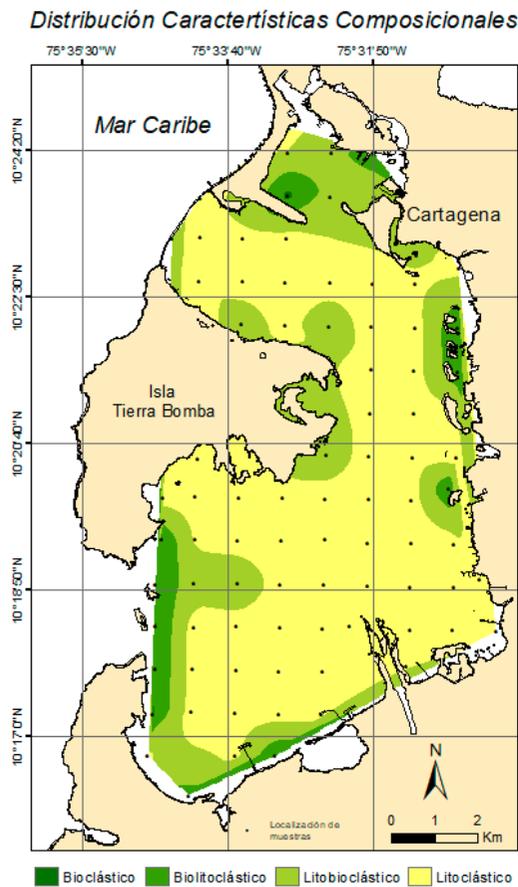


Figura 6. Visualización de la distribución de las características composicionales de los sedimentos superficiales de la bahía de Cartagena.

DISCUSIÓN

La bahía de Cartagena es considerada un estuario debido a la presencia e influencia del Canal del Dique, una estructura antrópica que genera aportes fluviales en la zona (Lonin *et al.*, 2004). Esta estructura fue construida en la época de la Colonia, con el objetivo de conectar directamente el río Magdalena con la bahía (Bell-Lemus, 1989). Desde entonces, el canal, su desembocadura y algunos sectores han sido dragados constantemente para garantizar la navegabilidad de las áreas y la estabilidad económica y funcionalidad de los puertos de la ciudad de Cartagena (Andrade *et al.*, 2004; Lonin *et al.*, 2004; Restrepo *et al.*, 2013). Siendo así, se asocia que los principales cambios batimétricos durante el periodo estudiado pudieron ser

ocasionados por los dragados realizados en el área de estudio y por la carga de sedimentos aportada por el Canal del Dique y su alteración en la dinámica sedimentaria de la bahía, principalmente en el bajo de Pasacaballos.

El Canal del Dique representa un aporte fluvial con transporte de sedimentos terrígenos finos (0 - 31 μm) (Lonin y Giraldo, 1996). De acuerdo con Tosic, Restrepo, Lonin, Izquierdo y Martins (2018), los registros históricos indican un caudal promedio de $397 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ durante los años 1984-2000 y un incremento a $508 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ durante el periodo 2000-2010. De igual forma, la carga de sedimentos antes del año 2000 era de $16135 \text{ ton dia}^{-1}$ y aumentó a $23906 \text{ ton dia}^{-1}$ durante el periodo 2000-2010. Además se estimó una tasa de sedimentación de 0.7 cm año^{-1} a 0.8 cm año^{-1} en la desembocadura del canal. Este sedimento de origen fluvial ha alcanzado e impactado los ecosistemas costeros de la bahía, así como las áreas con presencia de arrecifes coralinos, generando un impacto en dichos ecosistemas (Restrepo, Escobar y Tosic, 2018).

De acuerdo con estudios de comparación batimétrica realizados anteriormente por Andrade *et al.*, (2004), en el frente del Canal del Dique se observan las mayores diferencias en profundidades, puesto que en las últimas décadas se ha desarrollado un ambiente tipo deltaico que genera una acumulación de sedimentos de hasta 22 m de espesor. Esto concuerda con lo observado en este estudio donde se evidenció, a través de los perfiles batimétricos, una disminución de hasta 20 m en las profundidades alrededor de la desembocadura del Canal del Dique (Fig. 4B).

En estudios previos de la bahía de Cartagena realizados por Mora *et al.* (2018) se reportan emanaciones de lodo y gas, que evidencian la actividad diapírica y presencia de manaderos de fluido y gas. En esta investigación se utilizó la batimetría multihaz del año 2020 para identificar, cuantificar y georreferenciar en la zona centro y sur de la bahía 42 volcanes de lodo (VD) (Fig. 7A), siendo geformas con influencia a presentar un cambio en las facies sedimentarias por su aporte de material lodoso.

Adicionalmente, en este estudio se identificaron un total de 151 pockmarks (PK) (Fig. 7B), caracterizados como depresiones circulares que

se localizan principalmente al sur la bahía, con diámetros entre los 20 m y 40 m, y profundidades variables que van desde 0.60 m hasta los 3 m de profundidad. Mora *et al.* (2018) propone un posible control estructural en profundidad de los pockmarks, debido a que los identificaron agrupados o alineados a 3 m de profundidad. Sin embargo, en este estudio no se evidencia

una tendencia en las profundidades que pueda confirmar el posible control estructural propuesto por dichos autores. No se descarta la posibilidad de lo propuesto por Mora *et al.* (2018), debido a que algunas depresiones existentes podrían estar siendo cubiertas por sedimentos provenientes del Canal del Dique y no se estarían observando.

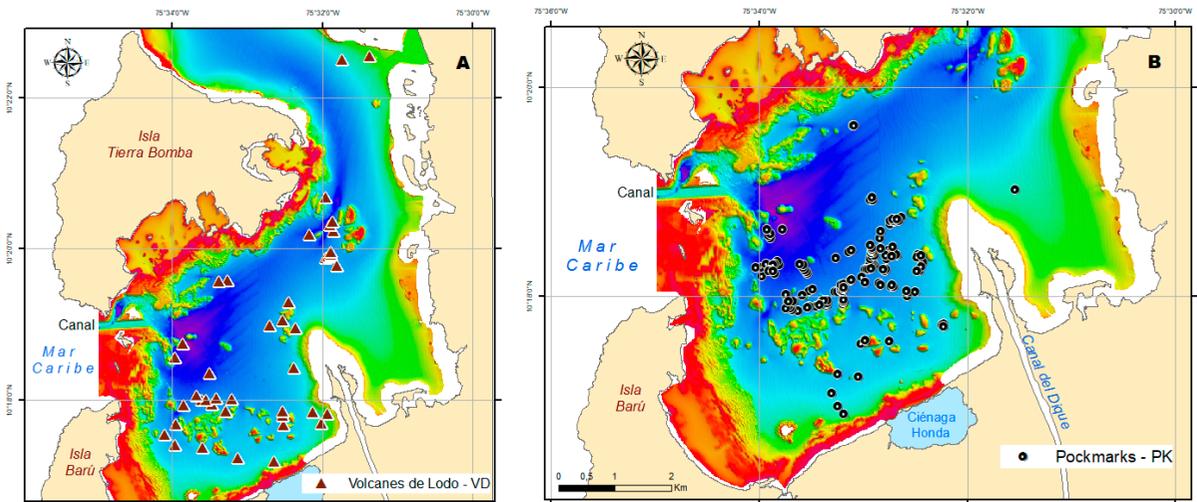


Figura 7. Localización de volcanes de lodo (VD) y pockmarks (PK) en la bahía de Cartagena.

Estudios relacionados a la caracterización de los sedimentos de fondo de la bahía de Cartagena han concluido que la distribución de sus facies sedimentarias ha cambiado en las últimas décadas (Vernette, 1978; Andrade *et al.*, 2004; Restrepo *et al.*, 2013; Franco *et al.*, 2013). Autores afirman que el contenido de CaCO_3 ha disminuido en toda la bahía y en la zona suroeste, también ha disminuido el tamaño de grano; señalando como principal causante de estas variaciones el creciente aporte de sedimentos por parte del Canal del Dique y las condiciones oceanográficas de la zona (Franco *et al.*, 2013).

Siendo así, los sedimentos calcáreos presentes en la bahía están siendo cubiertos por sedimentos terrígenos transportados por el canal, cumpliendo un papel fundamental en la sedimentación del área (Restrepo *et al.*, 2013). Los contenidos de $\% \text{CaCO}_3$ observados en este estudio contribuyen a lo mencionado anteriormente, siendo que solo un 4 % de las muestras recolectadas se clasificó como material bioclástico, mientras que el 73 % tiene una composición litoclástica.

Adicionalmente, es importante recalcar que en este estudio se observa una tendencia de sedimentos calcáreos y con mayor tamaño de grano en la zona del Canal de Bocachica (figuras 5A y 6), lo cual puede relacionarse a que el dragado realizado en el sector removió el material terrígeno transportado por el Canal del Dique y dejó descubierto el material calcáreo arenoso del fondo. Considerando que en los sectores cercanos a las costas de las islas y a los puertos, donde se presenta erosión y dragados, también se observa una prevalencia de este material calcáreo con respecto al resto de la bahía.

Finalmente, la distribución sedimentológica de la bahía de Cartagena puede verse alterada debido a la presencia de estructuras antrópicas, como lo son la Escollera de Bocagrande y el mencionado Canal del Dique. Esto se debe a que estas estructuras generan una influencia en la distribución de las facies, principalmente por el aporte de sedimentos terrígenos que representa el Canal del Dique, como fue mencionado anteriormente por Andrade *et al.* (2004). En

este estudio se determinó que la distribución de tamaño de sedimento en la bahía es predominada por material lodoso, proveniente del Canal del Dique y depositado fundamentalmente en su desembocadura y la zona central de la bahía, mientras que las arenas se encuentran en los sedimentos de la playa de Bocagrande y sectores cercanos a la costa.

CONCLUSIONES

De acuerdo con lo evidenciado en este estudio, la evolución morfológica del fondo de la bahía de Cartagena puede verse afectada por tres factores principales. En primer lugar se demuestran cambios en las profundidades de las zonas de acceso, como lo son canales y muelles; teniendo en cuenta el material reportado por la Capitanía de Puerto de Cartagena para los años 2005 y 2010, se puede decir que esta intervención antrópica influye directamente en la profundidad de las diferentes zonas de la bahía y representan una alteración en su morfología.

En segundo lugar se observa la presencia de volcanes de lodo y pockmarks, identificados principalmente al sur de la bahía de Cartagena. Estas geoformas ocasionan cambios morfogénicos característicos evidenciados en el área que se presentan y a su vez alteran las facies sedimentarias por su contenido lodoso. Finalmente, la intervención antrópica que ha sufrido la bahía de Cartagena, como es la presencia de la Escollera y el Canal de Dique, acentúan cambios observados en la distribución de las facies sedimentológicas identificadas en la bahía.

El Canal del Dique es un aporte fluvial que representa una carga de sedimentos de 23906 ton día⁻¹, lo cual se refleja en la predominancia de sedimentos terrígenos en la bahía de Cartagena. La distribución obtenida de las características de los sedimentos revela que el 65 % de los sedimentos son clasificados en el rango de tamaño de lodos y el 73 % tiene una composición litoclástica. Además, la carga de sedimento transportada por el Canal del Dique define la forma de relieve y la profundidad del bajo de Pasacaballos, identificándose las profundidades más someras en el último año estudiado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, C.; Arias, F.; Thomas, Y.F. (1988). Nota sobre la turbidez, circulación y erosión en la región de Cartagena (Colombia). *Bol. Cient. CIOH*, 8: 71-82. <https://doi.org/10.26640/22159045.29>
- Andrade, C.; Thomas, Y. F.; Lonin, S.; Parra, C.; Kunesch, S.; Ménanteau, L.; Andriau, A.; Piñeros C.; Velasco, S. (2004). Aspectos morfoodinámicos de la bahía de Cartagena de Indias. *Bol. Cient. CIOH*, 22: 90-104. <https://doi.org/10.26640/22159045.131>
- Bell-Lemus, G. A. (1989). El Canal del Dique 1810-1840: el viacrucis de Cartagena. *Boletín Cultural y Bibliográfico*, 27(21):15-23. Recuperado de: https://publicaciones.banrepcultural.org/index.php/boletin_cultural/article/view/2585
- Blott, S. J.; Pye, K. (2001). GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth surface processes and Landforms*, 26(11):1237-1248. <https://doi.org/10.1002/esp.261>
- Díaz, J. G.; Serrat, J. F. (2019). La Escollera de Bocagrande en Cartagena de Indias (Colombia): una obra maestra de la ingeniería española en ultramar (s. XVIII). In: *Actas del Undécimo Congreso Nacional de Historia de la Construcción: Soria*, 9-12 octubre 2019 (pp. 459-468). Instituto Juan de Herrera.
- Dirección General Marítima, Capitanía de Puerto de Cartagena. (2010). *Dragado de ampliación del canal de acceso de la Bahía de Cartagena-Sector Bocachica entre las abscisas del proyecto K0+330 al K1+620*. Dimar-CP5.
- Franco, D. A; Restrepo, J. C., Sanabria, N. Y; Gutiérrez, J. C. (2013). Caracterización y distribución de facies sedimentarias en la bahía de Cartagena, Colombia. *Boletín de Geología*, 35(1):43-53. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/6632>
- Klingebliel, A.; Vernet, G. (1979). Estudio batimétrico y sedimentológico en la plataforma continental entre Cartagena y la desembocadura del río Magdalena (Colombia). *Bol. Cient. CIOH*, 2: 55-70. <https://doi.org/10.26640/22159045.8>

- Lonin, S. A.; Giraldo, L. (1996). Influencia de los efectos térmicos en la circulación de la bahía interna de Cartagena. *Bol. Cient. CIOH*, 17: 47-56. https://doi.org/10.26640/01200542.17.47_56
- Lonin, S.; Parra, C.; Andrade, C.; Thomas, Y. F. (2004). Patrones de la pluma turbia del Canal del Dique en la Bahía de Cartagena. *Bol. Cient. CIOH*, 22: 77-89. <https://doi.org/10.26640/22159045.130>
- Molares, R. (2004). Clasificación e identificación de las componentes de marea del Caribe colombiano. *Bol. Cient. CIOH*, 22:105-114. <https://doi.org/10.26640/22159045.132>
- Mora, H.; Carvajal, J. H.; Ferrero, A.; León, H.; Andrade, C. A. (2018). Sobre emanaciones de gas natural y la evidencia preliminar de subsidencia en la bahía Cartagena de Indias (Colombia). *Bol. Cient. CIOH*, 37(2):35-51. <https://doi.org/10.26640/22159045.2018.448>
- Padilla N.; Villanueva E. (2020). *Distribución del sedimento de fondo de la Bahía de Cartagena*. Recuperado de: Repositorio Universidad del Norte.
- Pulido, D. A.; De Lisa, A.; Viteri, D.; Guzmán, R. (2013). Determinación de los datums de referencia vertical con fines hidrográficos para la Bahía de Cartagena. *Bol. Cient. CIOH*, (31):175-190. <https://doi.org/10.26640/22159045.258>
- Restrepo, J. C.; Franco, D.; Escobar, J.; Correa, I. D.; Otero, L.; Gutiérrez, J. (2013). Bahía de Cartagena (Colombia): distribución de sedimentos superficiales y ambientes sedimentarios. *Latin american journal of aquatic research*, 41(1), 99-112. <https://doi.org/10.3856/vol41-issue1-fulltext-8>
- Restrepo, J. D.; Escobar, R.; Tasic, M. (2018). Fluvial fluxes from the Magdalena River into Cartagena Bay, Caribbean Colombia: Trends, future scenarios, and connections with upstream human impacts. *Geomorphology*, 302:92-105. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.11.007>
- Rueda, J. G.; Otero, L. J.; Pierini, J. O. (2013). Caracterización hidrodinámica en un estuario tropical de Suramérica con régimen micro-mareal mixto (Bahía de Cartagena, Colombia). *Bol. Cient. CIOH*, 31:159-174. <https://doi.org/10.26640/22159045.257>
- Sibson, R. (1981). *A brief description of natural neighbour interpolation. Interpreting multivariate data*.
- Smith, R.; Taft, G. (2000). Legal Aspects of the Continental Shelf, in Peter J Cook, and Chris Carleton (eds), *Continental Shelf Limits: The Scientific and Legal Interface online* end. Oxford Academic. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195117820.003.0007>
- Tosic, M.; Restrepo, J. D.; Lonin, S.; Izquierdo, A.; Martins, F. (2018). Water and sediment quality in Cartagena Bay, Colombia: Seasonal variability and potential impacts of pollution. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 216, 187-203. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.08.013>
- Udden, J. A. (1914). Mechanical composition of clastic sediments. *Bulletin of the Geological Society of America*, 25(1): 655-744. <https://doi.org/10.1130/GSAB-25-6555>
- Vernette, G. (1978). Cartografía de los fondos en la plataforma continental: estandarización de los criterios sedimentológicos. *Bol. Cient. CIOH*, 4: 3-13.
- Vernette, G.; Buitrago, J.; Campos, N.; Llano, M. (1977). Variaciones morfológicas de las costas de la Bahía de Cartagena a partir del siglo XVI. *Bol. Cient. CIOH*, (1):21-40. <https://doi.org/10.26640/22159045.5>
- Vernette, G.; Lesueur, P.; Klingebiel, A. (1984). Evolución morfológica y sedimentológica de la flecha litoral del laguito (Bahía de Cartagena). *Bol. Cient. CIOH*, (5): 3-23. https://doi.org/10.26640/01200542.5.3_23
- Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology*, 30(5): 377-392. <https://doi.org/10.1086/622910>