



# Dinámica morfológica reciente de la boca de la Ciénaga Grande de Santa Marta: evolución, tendencias y causas

## Recent morphological dynamics of Ciénaga Grande de Santa Marta mouth: evolution, trends, and causes

Marco González-Arteaga\* y Constanza Ricaurte-Villota

0000-0002-6554-328X

0000-0003-1554-4994

Programa Geociencias Marinas y Costeras, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andrés".  
Calle 25 No. 2-55 Sector Salguero, Santa Marta-Colombia, marco.gonzález@invemar.org.co\*, constanza.ricaurte@invemar.org.co

\* Autor de correspondencia / Corresponding Author

### RESUMEN

La Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) es uno de los ecosistemas más productivos del Caribe colombiano. En el contexto nacional y mundial se encuentra enmarcada en cinco figuras de conservación, que la convierte en un área de especial interés para la investigación básica y aplicada. Actualmente se comunica con el mar a través de la Boca de la Barra; esta desembocadura ha tenido en los últimos 65 años una dinámica morfológica con una serie de tendencias en la configuración de la línea de costa. La presente investigación tuvo como objetivo estudiar los cambios de la línea de costa en el período 1953 a 2020 y aproximar una relación con eventos El Niño oscilación del sur (ENOS) y la variación intra-anual de la precipitación a nivel local. Los resultados se obtuvieron mediante imágenes de satélite, fotografías aéreas y la posterior digitalización de líneas de costa para la generación de las tasas de cambio con la herramienta DSAS. Los resultados evidencian procesos cíclicos de erosión y acreción a largo plazo, que reflejan un balance morfológico en el área de la Boca de la Barra; no obstante, la manifestación de eventos ENOS y períodos de fuerte sequía inciden en el dominio de la erosión costera.

**PALABRAS CLAVES:** línea de costa, morfología, tasas de cambio, desembocadura

### ABSTRACT

The Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) is one of the most productive ecosystems in the Colombian Caribbean. In the national and world context, it is framed in five conservation figures, which make it an area of special interest for basic and applied research. Currently communicates with the sea through the Boca de la Barra; this mouth has had in the last 65 years one morphological dynamics with a series of trends in the configuration of the coastline. The objective of this research was to study the changes in the coastline between the period 1953 to 2020 and approximate a relationship with El Niño Southern Oscillation events (ENSO) and the intrannual variation of rainfall at local level. The results were obtained using satellite images, aerial photographs and the subsequent digitization of coastlines to generate change rates using the DSAS. The results show long-term cyclic processes of erosion and accretion, which reflect a morphological balance in the Boca de la Barra area, however, the manifestation of ENSO events and periods of strong drought affect the domain of coastal erosion.

**KEYWORDS:** coastline, morphology, exchange rates, mouth

## INTRODUCCIÓN

El área de la Boca de la Barra está ubicada al occidente de la isla de Salamanca y actualmente es la única conexión permanente entre la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) y el mar Caribe. Este cuerpo de agua (CGSM) tiene una extensión de 450 km<sup>2</sup>, es reconocida a nivel mundial, nacional y regional al estar enmarcada dentro de cinco figuras de conservación, entre ellas la declaratoria como humedal RAMSAR (1998) y reserva de Biosfera (2000) (Vilardy-Quiroga y González-Novoa, 2011). La Boca de la Barra es para este ecosistema el punto de interacción entre la dinámica de circulación interna del complejo lagunar y los procesos costeros de la plataforma somera adyacente, presenta un ancho promedio de 210 m y profundidades en el canal de hasta 6 m (Invemar, 2015b). A través del canal ocurren las entradas de agua desde y hacia la Ciénaga, estos flujos son controlados por la marea y transportan caudales entre 200 m<sup>3</sup>/s y 700 m<sup>3</sup>/s según la época del año (Invemar-Corpamag, 2018). Es decir que también son condicionados por la compleja dinámica hidrológica que se origina entre los aportes del río Magdalena, sobre la llanura de inundación y que finalmente llegan hasta el complejo lagunar, con las descargas a la ciénaga principal provenientes de los ríos que drenan la vertiente occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), siendo una de las fuentes de mayor aporte de sedimentos originada por las características geológicas de este relieve costero (Cardona *et al.*, 2010).

En este contexto, el comportamiento morfológico del área de la Boca de la Barra juega un papel importante en la dinámica de intercambio hídrico y sedimentológico, que es fundamental para el funcionamiento del ecosistema y los procesos de rehabilitación adelantados, posteriores al deterioro ambiental causado por la construcción de la vía Ciénaga-Barranquilla y vía Palermo-Sitio Nuevo en las décadas de los años 1950 y 1970, respectivamente, cuyos efectos fueron la pérdida de manglar, disminución de la biodiversidad, hipersalinización, disminución de los recursos hidrobiológicos y rompimiento del balance hídrico de todo el sistema (Gónima *et al.*, 1998; Botero y Salzwedel, 1999; Polanía *et al.*, 2001; Rivera-Monroy *et al.*, 2006). Desde la apertura del canal la línea de costa ha estado sometida a la compleja dinámica litoral por estar totalmente expuesta a la acción directa de los procesos oceanográficos y climáticos a lo largo de la isla de Salamanca (Martínez y Molina, 1992; Gómez *et al.*, 2017).

Por otra parte, los estudios sobre la dinámica de la Boca de la Barra desde un punto de vista morfológico son

## INTRODUCTION

Boca de la Barra area is located to the west of Salamanca Island and is currently the only permanent connection between the Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) and the Caribbean Sea. This water body (CGSM) has an extension of 450 km<sup>2</sup>, and it is recognized at the world, national, and regional levels for being included in five conservation figures, among which there is its declaration as a RAMSAR (1998) wetland and biosphere reserve (2000) (Vilardy-Quiroga and González-Novoa, 2011). For this ecosystem, Boca de la Barra is the point of interaction between the internal circulation dynamics of the lagoon complex and the coastal processes of the adjacent shallow platform. It has an average width of 210 m, and depths in the channel of up to 6 m (Invemar, 2015b). Water inlets run through the channel from and to the marsh, which flows are controlled by the tide and transport flows, which are between 200 m<sup>3</sup>/s and 700 m<sup>3</sup>/s according to the time of the year (Invemar-Corpamag, 2018). This is to say that those flows are also conditioned by the complex hydrologic dynamics originated in the Magdalena River's contributions to the flood plain, which finally arrive at the lagoon complex, with discharges on the main marsh stemming from rivers that drain the western watershed of the Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), one of the major sources of sediment inputs originated by the geological characteristics of this coastal relief (Cardona *et al.*, 2010).

In this context, the morphological behavior of Boca de la Barra plays an important role in the hydric and sedimentologic exchange dynamics, which are fundamental for the functioning of the ecosystem and the advanced rehabilitation processes carried out after the environmental deterioration caused by the building of the Ciénaga-Barranquilla and Palermo-Sitio Nuevo roads in the 1950s and 1970s, respectively, which effects were mangrove loss, decreased biodiversity, hyper-salinization, reduced hydrobiological resources, and a broken hydric balance in the whole system (Gónima *et al.*, 1998; Botero and Salzwedel, 1999; Polanía *et al.*, 2001; Rivera-Monroy *et al.*, 2006). Since the opening of the channel, the coastline has been subjected to complex coastal dynamics, as it is completely exposed to the direct action of oceanographic and climatic processes along the Salamanca Island (Martínez and Molina, 1992; Gómez *et al.*, 2017).

On the other hand, studies on the dynamics of Boca de la Barra from a morphological point of view are

escasos; se destaca el realizado por Erffa (1973), que describe el seguimiento multitemporal de la línea de costa durante el proceso de configuración del canal por las condiciones de un régimen de corrientes variable y el efecto de las obras de protección en la desembocadura, registrando cambios (erosión/acreción) a corto plazo de hasta 10 m posteriores a la construcción de la vía Ciénaga-Barranquilla. Bernal (1996) describió el cambio de posición de la boca natural en 1953, 1987 y 1993 encontrando indicadores morfológicos de una tendencia a la erosión del lado oeste y de acreción en el lado este. Otros estudios recientes hacen parte de los desarrollados por el Invemar, los cuales aportan conocimiento sobre aspectos hidrológicos, sedimentológicos, batimétricos, climáticos y oceanográficos (Invemar-GEO, 2015, 2016 y 2017). De igual forma, se cuenta con los avances en la implementación de un modelo hidro-sedimentológico del complejo lagunar, para el entendimiento de la dinámica de los flujos de agua y sedimentos de acuerdo a las condiciones hidrológicas y de marea (Invemar-Corpamag, 2018). Por último, los estudios y proyectos alineados con los enfoques de rehabilitación de la CGSM fundamentan la necesidad del seguimiento de la Boca de la Barra para garantizar el intercambio hídrico con el mar Caribe (Rivillas-Ospina *et al.*, 2020). En este sentido, la presente investigación pretende contribuir al conocimiento de la dinámica de la boca, para el planteamiento de estrategias de gestión y toma de decisiones por parte de las autoridades ambientales, frente a las problemáticas de uno de los ecosistemas más productivos de la región Caribe.

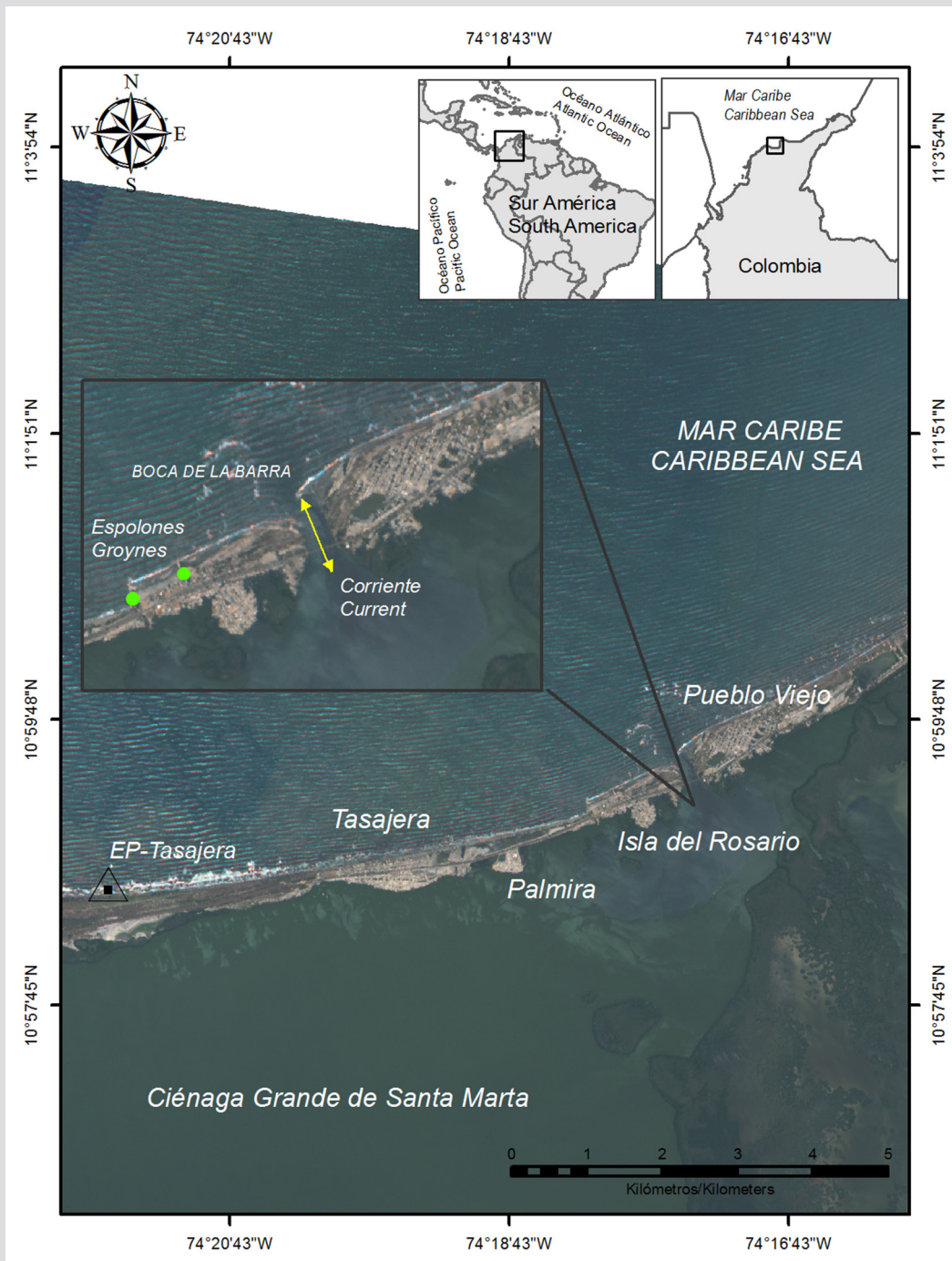
## MATERIALES Y MÉTODOS

El análisis de la evolución de la línea de costa permite conocer las variaciones espacio-temporales que resultan de la compleja morfodinámica en la entrada de una isla barrera y la costa adyacente. La presente investigación seleccionó el área de la Boca de la Barra para el análisis de los cambios y evolución de la línea de costa entre el período 1953-2020. Esta desembocadura está ubicada al occidente de la isla de Salamanca, al norte de Colombia en  $10^{\circ} 59' 25,26''$  N y  $74^{\circ} 17' 26,51''$  W (Figura 1), constituye una de las principales fronteras hidrológicas de vital relevancia en las funciones integrales de los ecosistemas de la ecorregión CGSM. En ella se puede diferenciar la costa occidental, que se encuentra intervenida con obras de protección para el control de la erosión, y la costa oriental, que aún conserva características naturales en la línea de costa, razón por la cual son tratadas por separado para su comparación.

scarce. The one conducted by Erffa (1973) stands out, which describes the multitemporal monitoring of the coastline during the channel configuration process under the conditions of a variable flow regime and the effect of protection works in the mouth, recording short-term changes (erosion/accretion) of up to 10 m after the construction of the Ciénaga-Barranquilla road. Bernal (1966) described the natural mouth's change of position in 1953, 1987, and 1993, finding morphological indicators of a trend towards erosion on the west side and accretion on the east side. Other recent studies are those conducted by Invemar, which provide knowledge on hydrological, sedimentologic, bathymetric, climatic, and oceanographic aspects (Invemar-GEO, 2015, 2016, 2017). Likewise, there is progress in the implementation of a hydro-sedimentologic model of the lagoon complex, with the aim to understand water flow and sediment dynamics according to the hydrological and tidal conditions (Invemar-Corpamag, 2018). Finally, studies and projects aligned with the CGSM rehabilitation approaches are based on the need for monitoring Boca de la Barra to ensure hydric exchange with the Caribbean Sea (Rivillas-Ospina *et al.*, 2020). In this sense, this research aims to contribute to the knowledge of the mouth dynamics for management strategies and decision-making by environmental authorities, in the face of the problems of one of the most productive ecosystems in the Caribbean region.

## MATERIALS AND METHODS

The analysis of the coastline's evolution allows understanding the spatial-temporal variations resulting from the complex morphodynamics at the entrance of a barrier island and the adjacent coast. The area of Boca de la Barra was selected in this research in order to analyze the changes and evolution of the coastline in the 1953-2020 period. This mouth is located to the west of Salamanca Island, northern Colombia, in the coordinates  $10^{\circ}59'25.26''$  N and  $74^{\circ}17'26.51''$  W (Figure 1). It constitutes one of the main hydrological borders, and it is of vital relevance in the integral functions of the ecosystems of the CGSM ecoregion. In it, the west coast can be distinguished, which has been intervened with protection works for erosion control, as well as the east coast, which keeps its natural characteristics in the coastline, which is why they are separately treated for the sake of comparison.



**Figura 1.** Localización general del área de estudio. EP, estación pluviométrica Tasajera. Imagen RapiDEye 2015. Fuente LabSIS-Invemar.

**Figure 1.** General location of the study area. EP, Tasajera pluviometric station. Image: RapiDEye 2015. Source: LabSIS-Invemar.

Para el estudio se utilizó una colección de imágenes de satélite de los sensores SPOT, RapiDEye, Sentinel 2, Google Earth y fotografías áreas de diferentes escalas, que fueron seleccionadas a partir de los criterios de resolución espacial entre 5 y 20 m, porcentaje de nubosidad menor a 15 % y la fecha de la toma del sensor, esta última según su correspondencia con diferentes épocas climáticas, y años

A collection of satellite images from the sensors SPOT, RapiDEye, Sentinel 2, and Google Earth were used for the study, as well as aerial photographs at different scales, which selection was based on spatial resolution criteria between 5 and 20 m, a percentage of cloudiness lower than 15 %, and the date on which the sensor obtained the data. The latter, in accordance with its correspondence

contrastantes por la presencia de eventos El Niño Oscilación del Sur (ENOS), como los acontecidos en 2010-11 (La Niña) y 2015-16 (El Niño), los cuales pueden causar períodos de fuertes lluvias/sequías. Las imágenes fueron rectificadas en el mismo sistema de coordenadas (Moore, 2000), mediante 25 puntos de control (GCP) adquiridos en terreno con un Sistema de Posicionamiento Global Diferencial (DGPS), por sus siglas en inglés de referencia Topcon GRS 1 ( $\pm 0,3$  m) a la referencia del Sistema Geodésico Mundial (WGS84) y proyectadas utilizando el sistema Universal Transversal Mercator (zona UTM 18 Norte). De igual manera con el DGPS fueron levantadas en campo líneas de costa que se ajustaron mediante post-proceso a la Red Geodésica Nacional. A partir de las imágenes se interpretaron y digitalizaron las posiciones de la línea de costa siguiendo los criterios propuestos por Ojeda *et al.* (2013) y se aplicaron los siguientes procedimientos: 1. Generación de siete bases de datos geográficas (GDB), 2. Cálculo de la tasa de regresión lineal (LRR) y el Movimiento Neto de la línea de costa (NMS). La generación de las GDBs se realizó en un entorno GIS (ArcGIS 10.1) y se importaron a las mismas las líneas de costa previamente agrupadas en los periodos 1953-1997, 1997-2013, 2013-2020 y 1953-2020 para los análisis interanuales (líneas de costa anuales) y 2010-2016, 2016-2019 y 2010-2016 para los intra-anuales (líneas de costa mensuales en el mismo año).

Los cálculos de los valores de cambio de la costa para cada periodo se obtuvieron utilizando la extensión Digital Shoreline Analysis System (DSAS) desarrollada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos USGS (Thieler y Danforth, 1994; Thieler *et al.*, 2005, 2009), ampliamente aplicada en estudios del litoral (Del Río *et al.*, 2013; Rangel-Buitrago *et al.*, 2015). Los datos obtenidos fueron comparados entre periodos para entender la dinámica morfológica del área de estudio, destacando los resultados de estudios previos y complementando la discusión con información sobre el Índice de Oscilación del Sur para los últimos 70 años y series de datos Ideam (2010-2019) sobre la variación interanual de la precipitación, las cuales fueron extraídas de la estación pluviométrica de Tasajera al norte de la CGSM en el corregimiento del mismo nombre.

## RESULTADOS

### Evolución y tendencia interanual de la línea de costa

Para el análisis interanual se utilizaron las series digitalizadas de líneas de costa entre el periodo 1953-2020 y se realizaron los cálculos de los cambios netos (NMS) y las tasas de regresión (LRR) originadas por la configuración

with different climatic seasons and contrasting years, given the presence of El Niño Southern Oscillation (ENSO) events, such as those that occurred in 2010-2011 (La Niña) and 2015-2016 (El Niño), which can cause periods of strong rainfall/drought. The images were rectified in the same coordinate system (Moore, 2000) to the reference of the World Geodesic System (WGS84) through 25 control points (GCP) acquired in the field with a Topcon GRS 1 ( $\pm 0.3$  m) Differential Global Positioning System (DGPS), and they were projected using the Universal Transversal Mercator (zone UTM 18 North). Likewise, the coastlines were surveyed in the field with the DGPS, and then adjusted to the National Geodesic Network via post-processing. Based on the images, the coastline positions were interpreted and digitized following the criteria proposed by Ojeda *et al.* (2013), and the following procedures were applied: 1. Generation of seven geographical databases (GDB), 2. Calculation of the linear regression rate (LRR) and the Net Movement of the Shoreline (NMS). GDB generation was carried out with a GIS (ArcGIS 10.1), and the same coastlines were imported, which were previously grouped into the periods 1953-1997, 1997-2013, 2013-2020, and 1953-2020 for interannual analyses (annual coastlines); as well as into 2010-2016, 2016-2019, and 2010-2016 for intra-annual analyses (monthly coastlines within the same year).

The calculations of coast change values for each period were obtained using the extension Digital Shoreline Analysis System (DSAS), which was developed by the United States Geological Service (USGS) (Thieler and Danforth, 1994; Thieler *et al.*, 2005, 2009) and is widely applied in coast studies (Del Río *et al.*, 2013; Rangel-Buitrago *et al.*, 2015). The obtained data were compared between periods in order to understand the morphological dynamics of the study area, highlighting the results of previous studies and complementing the discussion with information about the Oscillation Index for the last 70 years and the Ideam data series (2010-2019) on the interannual rainfall variation, which were extracted from the Tasajera pluviometric station, to the north of CGSM, in the village with the same name.

## RESULTS

### Evolution and interannual trend of the coastline

For the interannual analysis, the digitized series of the coastlines in the 1953-2020 period were used, and the calculation of the net changes (NMS) and the regression rates (LRR) originated by the configuration of the west

de la costa occidental (playa de Isla del Rosario) y oriental (playa de Pueblo Viejo) en el área de la desembocadura de la ciénaga. En el estudio de la línea de costa para el periodo 1953-1997, se observaron las diferencias en la distribución de los procesos de erosión y acreción en las playas adyacentes a la Boca de la Barra. Sin embargo, por la disponibilidad de imágenes y fotografías aéreas los valores calculados de la línea de costa en la parte interna de la desembocadura en este periodo, solo se obtuvieron a partir de 1987. El costado occidental experimentó una tendencia a la erosión costera con un patrón de incremento en dirección O-E, registrando cambios netos de hasta -207,5 m y tasas de erosión entre -0,5 m/año y -5,7 m/año en el área de la actual desembocadura. Las menores variaciones se presentaron en el extremo occidental de la playa de Isla del Rosario con tasas de erosión inferiores a los -2 m/año (Figura 2a). En contraste, en el costado oriental a la desembocadura la dinámica de la línea de costa estuvo dominada en mayor parte por los procesos de acreción de la playa de Pueblo Viejo, con cambios máximos de 103,4 m y una tasa de 8,7 m/año en la zona próxima a la desembocadura. La parte interna del canal alcanzó un cambio neto y tasa de erosión de -256,8 m y -7,1 m/año respectivamente (Figura 2b). Se destaca que durante este primer periodo la línea de costa fue intervenida con la construcción de espolones en las décadas de los años 50 y 60 del siglo pasado, los cuales originaron cambios en la costa adyacente a la desembocadura.

En el periodo 1997-2013, a diferencia del anterior, los cambios de la línea de costa fueron controlados por la acreción en ambos costados de la desembocadura de la ciénaga. La incidencia del proceso erosivo de las décadas anteriores conllevó a la realización de nuevas obras de protección tipo espolón para la protección de la costa en la playa de Isla del Rosario, las cuales favorecieron la retención de sedimentos e influyeron en la morfodinámica de la playa y las barras contiguas. Esta nueva configuración de la costa generó cambios anuales en el costado occidental con ganancias que alcanzaron 233,9 m y una tendencia a la acreción entre 1,9 y 12,2 m/año (Figura 2c). Del mismo modo la línea de costa oriental evidenció procesos de aportes de sedimentos sobre la playa de Pueblo Viejo que favorecieron cambios de hasta 185,6 m y una tendencia a la acreción con tasas entre 2,2 y 7,0 m/año, presentado los más bajos valores al interior de la desembocadura e indicando una estabilidad morfológica (Figura 2d).

Durante el periodo siguiente (2013-2020) el comportamiento de la línea de costa adquiere un dominio de la tendencia erosiva en las playas de Islas de Rosario y

(Rosario Island beach) and east (Pueblo Viejo beach) coasts in the marsh mouth were carried out. By studying the coastline for the 1953-1997 period, differences were observed in the distribution of erosion and accretion processes in the beaches adjacent to Boca de la Barra. However, due to the availability of aerial images and photographs, the calculated values of the coastline in the internal part of the mouth for this period were only obtained from 1987 onward. The west side experienced a trend towards coastal erosion, with an increasing pattern in the W-E direction, recording net changes of up to -207.5 m and erosion rates between -0.5 m/year and -5.7 m/year in the current mouth area. The least variations occurred in the west end of Isla del Rosario beach, with erosion rates lower than -2 m/year (Figure 2a). In contrast, in the east side of the mouth, the dynamics of the coastline were mostly dominated by the accretion processes in Pueblo Viejo beach, with maximum changes of 103.4 m and a rate of 8.7 m/year in the area next to the mouth. The internal part of the channel reached a net change and erosion rate of -256.8 m and -7.2 m/year, respectively (Figure 2b). It can be highlighted that, during this first period, the coastline was intervened with the construction of groynes in the 1950s and 1960s, which caused changes in the coast adjacent to the mouth.

In the 1997-2013 period, unlike the previous one, changes in the coastline were controlled by accretion in both sides of the marsh mouth. The incidence of the erosive process of previous decades led to new groyne-type protection works in order to safeguard the coast in Isla del Rosario beach, which were favored with sediment retention and influenced the morpho-dynamics of the beach and adjacent barriers. This new coast configuration generated annual changes in the west side, with gains that reached 233.9 m and a trend towards accretion between 1.9 m/year and 12.2 m/year (Figure 2c). In the same way, the east coastline evidenced processes of sediment supply on Pueblo Viejo beach, which favored changes of up to 185.6 m and a trend towards accretion, with rates between 2.2 m/year and 7.0 m/year and the lowest values inside the mouth, as well as indicating morphological stability (Figure 2d).

During the next period (2013-2020), the coastline behavior was dominated by an erosive trend in Islas del Rosario and Pueblo Viejo beaches, which changed the gain conditions shown in the previous period. Specifically, accretion processes on the west side were only significant

Pueblo Viejo, que cambiaron las condiciones de ganancia mostradas en el periodo anterior. Específicamente en el costado occidental los procesos de acreción solo fueron significativos en el área delimitada por los espolones a tasas de cambio de 8,1 m/año y el borde interno de la desembocadura, donde alcanzó un valor de hasta 20,4 m/año, cuya tendencia estuvo asociada con el proceso de sedimentación al inicio del período y posterior dinámica morfológica de las barras en la entrada del canal desde el mar Caribe. La línea de costa sobre la playa de Isla del Rosario presentó cambios que alcanzaron -170,6 m y una tendencia general alrededor de -18,7 m/año, mostrando un incremento de la erosión con respecto al periodo anterior (Figura 2e). Así mismo el costado oriental, que venía obteniendo durante los últimos 60 años una tendencia a la acreción, registró cambios de la línea de costa de hasta -62,2 m y una tasa máxima de erosión de -24,5 m/año en el borde de la desembocadura (Figura 2f). Para este periodo la tendencia erosiva en el área de la Boca de la Barra fue marcada por un cambio acelerado de la línea de costa entre 2015-2016, principalmente en el costado oriental.

De acuerdo con lo anterior, en el análisis interanual los cambios de la línea de costa de la Boca de la Barra muestran un sistema dinámico, que presenta una serie de fluctuaciones en el dominio de las tendencias de erosión y acreción para distintos periodos de tiempo. Esta dinámica refleja unas condiciones de estabilidad en ambos costados de la desembocadura con respecto a la línea de costa de 1953, expresadas en tendencias de acreción entre 0,4 y 3,1 m/año asociadas a la línea de costa occidental y 0,5 y 2 m/año en la línea de costa oriental (Figura 2g). Así mismo, se presentó una tasa máxima de acreción de hasta 4,9 m/año en el borde de la desembocadura donde por condiciones naturales ocurren los intercambios hídricos y sedimentológicos entre la Ciénaga y el Caribe (Figura 2h).

in the area delimited by the groynes, at change rates of 8.1 m/year and the internal edge of the mouth, where they reached a value of up to 20.4 m/year, a trend that was associated with the sedimentation process at the beginning of the period, and later with the morphological dynamics of the barriers in the channel input from the Caribbean Sea. The coastline on Isla del Rosario beach exhibit changes that reached -170.6 m and a general trend of about -18.7 m/year, showing an erosion increase with respect to the previous period (Figure 2e). Likewise, the east side, which reported a trend towards accretion over the last 60 years, recorded changes in the coastline of up to -62.2 m and a maximum erosion rate of -24.5 m/year in the mouth edge (Figure 2f). For this period, the erosive trend in Boca de la Barra area was marked by an accelerated change in the coastline between 2015 and 2016, mainly on the east side.

According to the above, the changes in the Boca de la Barra coastline show a dynamic system in the interannual analysis, with a series of fluctuations in the dominating trends of erosion and accretion for different periods of time. These dynamics reflect conditions of stability on both sides of the mouth with respect to the coastline in 1953, expressed in accretion trends between 0.4 m/year and 3.1 m/year for the west coastline and 0.5 m/year and 2 m/year for the east coastline (Figure 2g). Likewise, there was a maximum accretion rate of up to 4.9 m/year in the mouth edge, where the hydric and sedimentologic exchanges between the lagoon and the Caribbean Sea are due to natural conditions (Figure 2h).

**Tabla 1.** Valores promedios por periodos de evolución interanual de la línea de costa de la Boca de la Barra, cambios netos (NMS) y tasa de regresión lineal (LRR).

**Table 1.** Average values of the interannual evolution periods of the Boca de la Barra coastline, net changes (NMS), and linear regression rate (LRR).

Período / Period	Costa occidental / West Coast				Costa oriental / East Coast			
	NMS (m)	Tasa / Rate LRR (m/año)	NMS (m)	Tasa / Rate LRR (m/año)	NSM(m)	Tasa / Rate LRR (m/año)	NMS (m)	Tasa / Rate LRR (m/año)
1953-1997	11.8	1.5	-75.6	-1.8	35.9	1.8	-53.0	-3.0
1997-2013	126.0	7.8	-15.1	-1.0	92.	5.4	0	0
2013-2020	51.0	7.7	-126.8	-18.7	0	0	-31.5	-10.0
1953-2020	24.6	0.7	-50.6	-0.5	93.4	1.8	-22.3	0.4

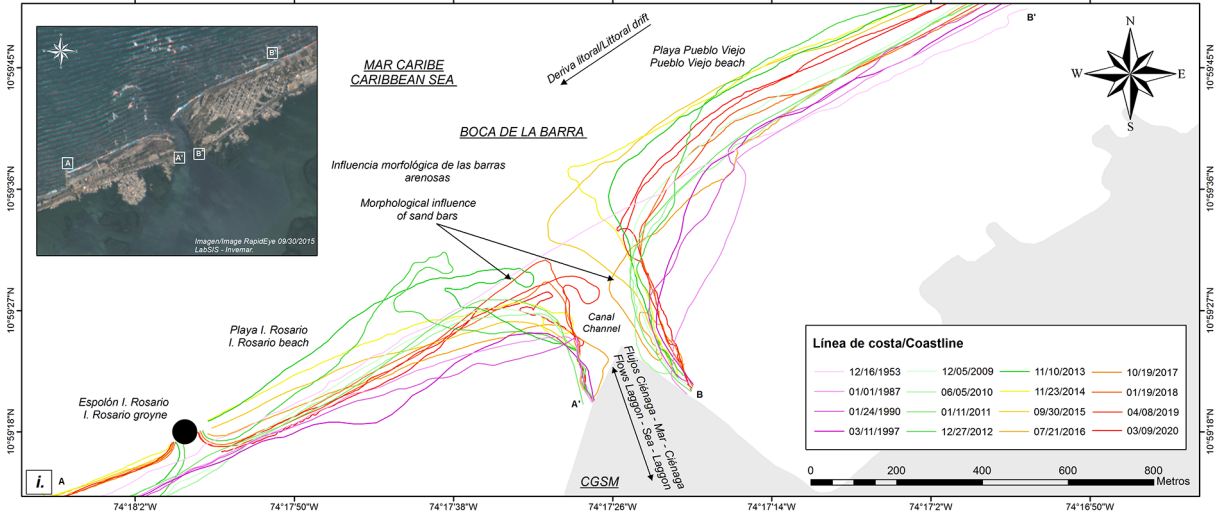
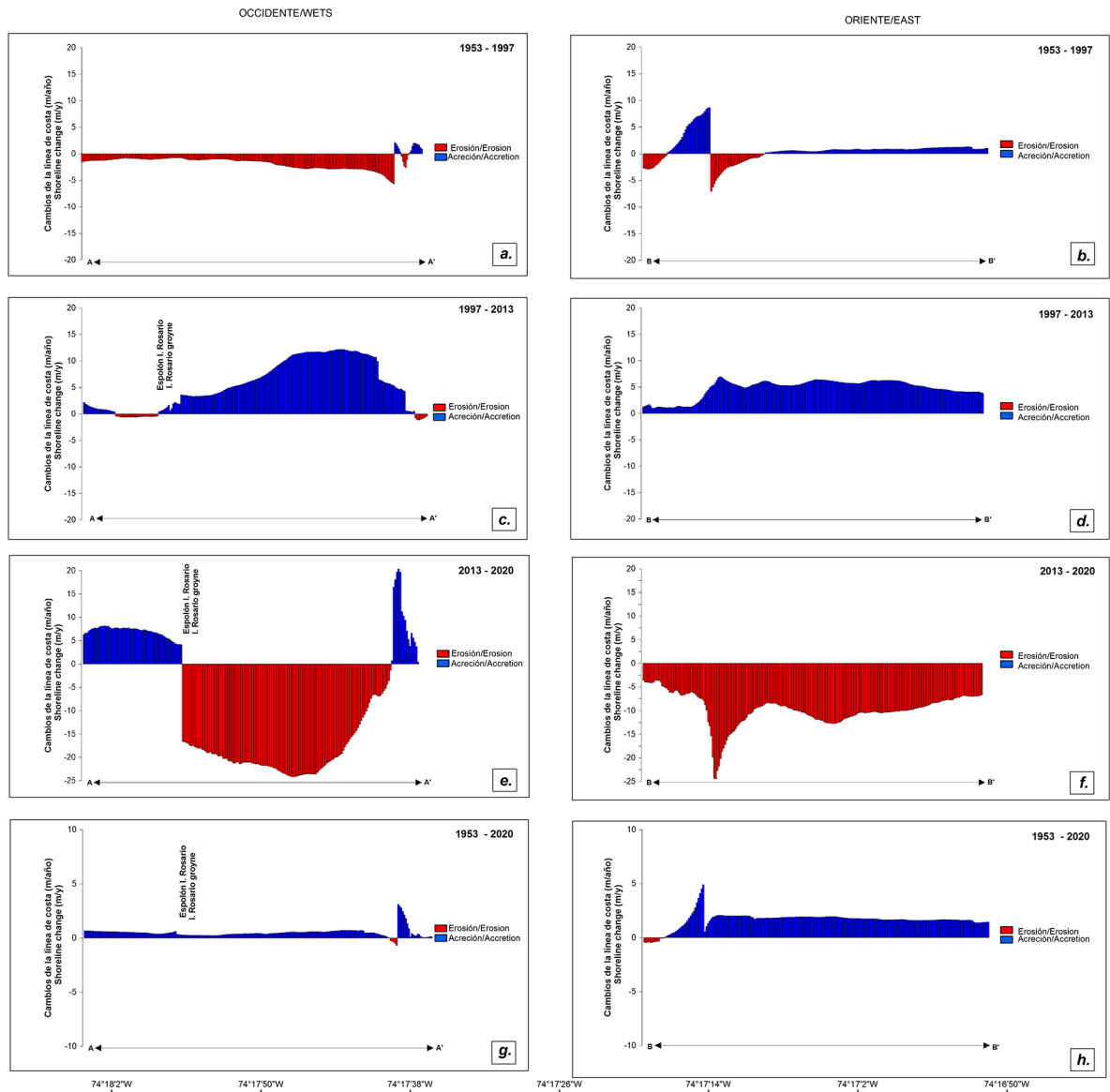


Figura 2. Tendencias evolutivas interanuales de la línea de costa de la Boca de la Barra para el periodo 1953-2020.

Figure 2. Interannual evolution trends of the Boca de la Barra coastline for the 1953-2020 period.



### **Evolución y tendencia intra-anual de la línea de costa en relación con eventos ENOS**

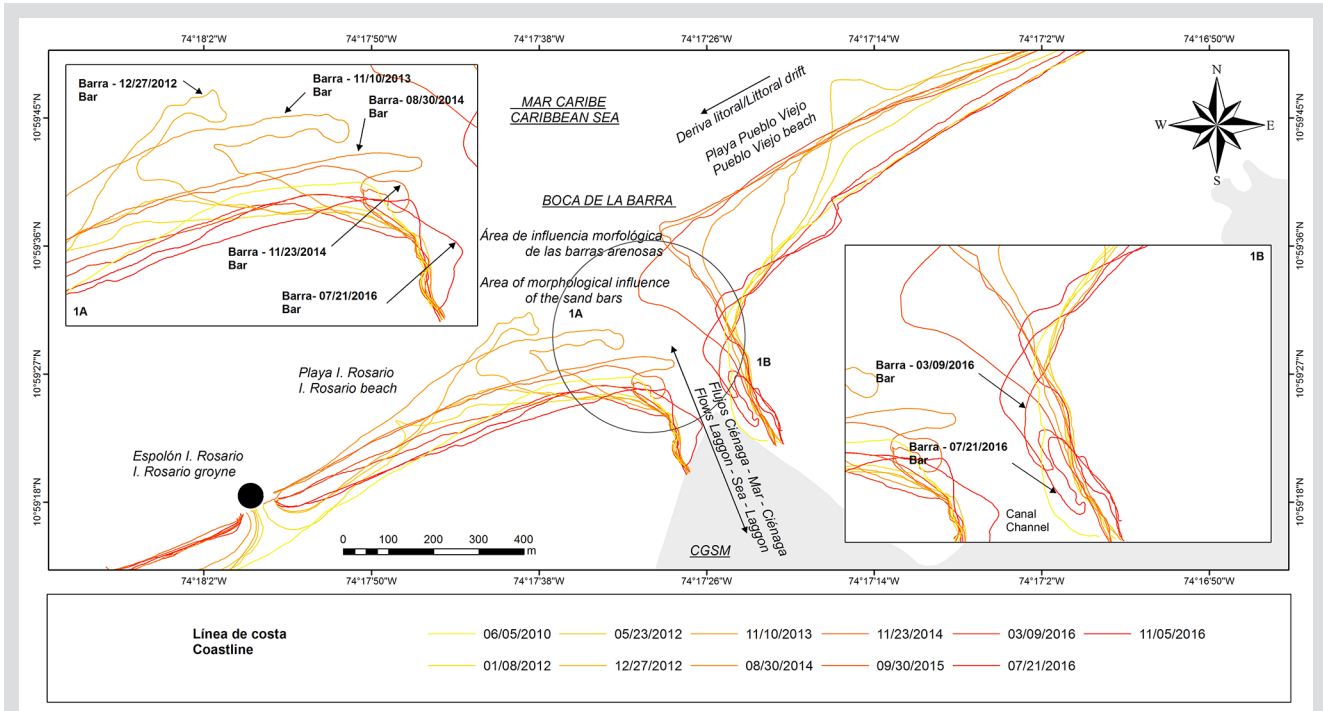
El estudio intra-anual que comprende el periodo más reciente entre 2010-2019 pretende entender la incidencia de la estacionalidad y la presencia de eventos extremos relacionados con el ENOS sobre los valores calculados de las tendencias de erosión y acreción. Es importante mencionar que este tipo de resultados pueden ser abordados con mayor detalle, dependiendo de la serie de imágenes satelitales de diferentes épocas disponibles para la digitalización de la línea de costa.

El período 2010-2016 estuvo marcado por la manifestación del fenómeno La Niña y El Niño al inicio y final del mismo. En estas condiciones, la línea de costa del costado occidental experimentó tendencias de acreción en el área de retención de los sedimentos por el efecto de los espolones construidos posterior a junio de 2010. La variación que alcanzó fue de 103,5 m y una tasa de acreción máxima de 23,3 m/año. El área contigua a los espolones y de mayor exposición a la deriva litoral (adyacente a la desembocadura), aunque presentó ganancias hasta noviembre de 2013 (Figura 3), la respuesta final de la línea de costa estuvo dominada por la erosión registrando magnitudes de hasta -34,2 m y tasas entre -1,0 y -11,2 m/año (Figura 7a). En lo concerniente a la línea de costa oriental, los procesos de erosión fueron similares a los encontrados en el costado occidental, con un patrón de incremento E-O en el sentido de la deriva litoral que alcanzó un valor máximo de -10,5 m/año en el área adyacente a la desembocadura. Los procesos de acreción obedecieron a la dinámica de crecimiento de la costa observadas en las líneas digitalizadas entre enero de 2012 y septiembre de 2015 (Figura 3). Específicamente, la zona interna de la boca tuvo ganancias y pérdidas de los depósitos de sedimentos que determinaron diferencias en el dominio de los procesos morfológicos con magnitudes de erosión alrededor de -5,5 m/año y de acreción entre 1,4 y 11,5 m/año (Figura 7b). Durante este periodo de análisis se observó que entre marzo y julio de 2016 se presentó un cierre temporal de la abertura del canal con una reducción de 140 m del ancho actual (Figura 4).

### **Evolution and intra-annual trend of coastline in relation to enso events**

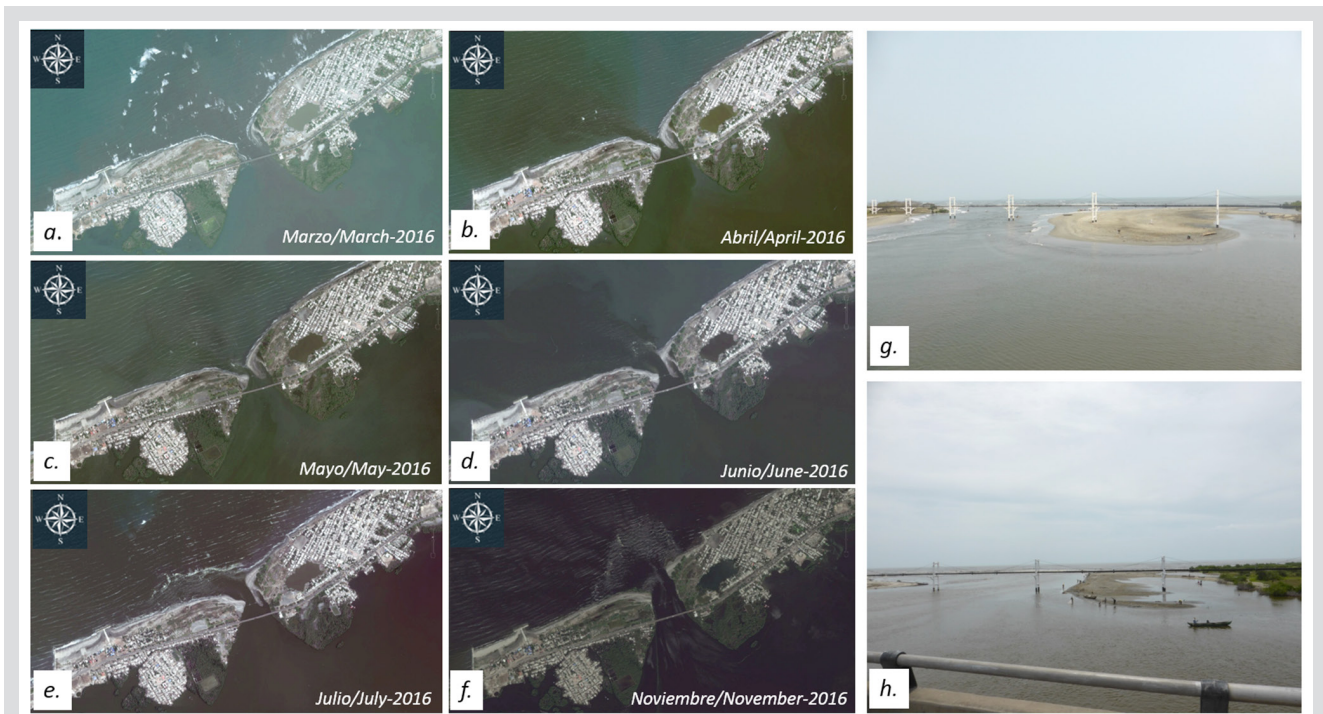
The intra-annual study covering the most recent period (2010-2019) aims to understand the seasonal incidence and the presence of extreme events related to ENSO on the calculated values of the erosion and accretion trends. It is important to mention that this type of result can be approached in greater detail, depending on the available satellite images from different times for digitizing the coastline.

The 2010-2016 period was marked by the manifestation of La Niña and El Niño phenomena at their beginning and end, respectively. Under these conditions, the west side coastline experienced accretion trends in the sediment retention area, due to the effect of the groynes built after June 2010. The variation reached was 103.5 m, in addition to a maximum accretion rate of 23.3 m/year. The area adjacent to the groynes and with a higher exposure to coastal drift (adjacent to the mouth), even though it showed gains until November 2013 (Figure 3), yielded a final response of the coastline dominated by erosion, recording magnitudes of up to -34.2 m and rates between -1.0 m/year and -11.2 m/year (Figure 7a). Regarding the east-side coastline, the erosion processes were like those found on the west side, with an increasing W-E pattern in the coastal drift direction, which reached a value of -10.5 m/year in the area adjacent to the mouth. The accretion processes obeyed the growing dynamics of the coast, as observed in the digitized lines between January 2012 and September 2015 (Figure 3). Specifically, the internal area of the mouth had gains and losses of sediment deposits that determined differences in the domination of morphological processes, with erosion magnitudes of around -5.5 m/year and accretion levels between 1.4 m/year and 11.5 m/year (Figure 7b). During this period of analysis, a temporary closure of the channel opening between March and July 2016 was observed, with a reduction of 140 m in the current width (Figure 4).



**Figura 3.** Cambios morfológicos intra-anales de la Boca de la Barra entre junio de 2010 y marzo de 2016.

**Figure 3.** Intra-annual morphological changes of Boca de la Barra between June 2010 and March 2016.



**Figura 4.** Cambios morfológicos intra-anales de la Boca de la Barra entre marzo de 2016 y noviembre de 2016 (Fuente: Imágenes Google Earth). a-f. Cierre temporal y apertura de la desembocadura. g. Prolongación de la barra al interior del canal (este) y reducción del ancho de la desembocadura, marzo 2016. h. Pérdida del ancho de la barra y amplitud de la desembocadura, julio 2016.

**Figure 4.** Intra-annual morphological changes in Boca de la Barra between March 2016 and November 2016 (Source: Images Google Earth). a-f. Mouth temporary closure and opening. g. Prolongation of the barrier inside the channel (east) and reduction of the mouth width, March 2016. h. Loss of barrier and mouth width, July 2016.

Entre 2016-2019, cuando no hubo eventos ENOS fuertes (Figura 5), las variaciones de la línea de costa mensuales mostraron el cambio en la tendencia de la dinámica morfológica de la Boca de la Barra, al desacelerar el proceso erosivo en algunos sitios y recuperar otros erosionados. En el costado occidental la playa adyacente al espolón presentó una disminución de la erosión llegando a tasas de  $-2,3$  m/año, mientras que el área entre los espolones se mantuvo estable y disminuyeron las tasas de acreción hasta alrededor de  $10,0$  m/año con respecto al periodo anterior ( $> 15,0$  m/año). Los mayores valores se registraron en el área de influencia morfológica de las barras en la desembocadura, con cambios de hasta  $91,5$  m y tasa de acreción de  $13,5$  m/año (Figura 7c). La formación de las barras se identificó en las líneas de costa digitalizadas de julio de 2017, enero de 2018, abril de 2018-2019, agosto de 2018 y julio de 2019, evidenciando el transporte de sedimentos del sistema hacia el interior del canal (Figura 6). La línea de costa oriental fue controlada principalmente por la acreción con ganancias de hasta  $69,0$  m y tasas que llegaron a  $9,8$  m/año; los procesos erosivos se desarrollaron en el área de la desembocadura con cambios netos de hasta  $18,6$  m y tasa máxima de  $9,2$  m/año (Figura 7d).

Between 2016 and 2019, when there were no strong ENSO events (Figure 5), the monthly coastal variations showed a change of trend in the morphological dynamics of Boca de la Barra, decelerating the erosion process at some sites and recovering other eroded ones. On the west side, the beach adjacent to the groynes showed an erosion reduction reaching up to  $-2.3$  m/year, while the area between groynes remained stable, and accretion rates decreased down to  $10.0$  m/year with respect to the previous period ( $> 15.0$  m/year). The highest values were recorded in the area of morphological influence of the barriers in the mouth, with changes of up to  $91.5$  m and accretion rates of  $13.5$  m/year (Figure 7c). The formation of barriers was identified in the digitized coastlines of July 2017, January 2018, April 2018-2019, August 2018, and July 2019, evidencing sediment transport from the system into the channel (Figure 6). The east coastline was mainly controlled by accretion, with gains of up to  $69.0$  m and rates that reached  $9.8$  m/year. Erosion processes took place in the mouth area, with net changes of up to  $18.6$  m and a maximum rate of  $9.2$  m/year (Figure 7d).

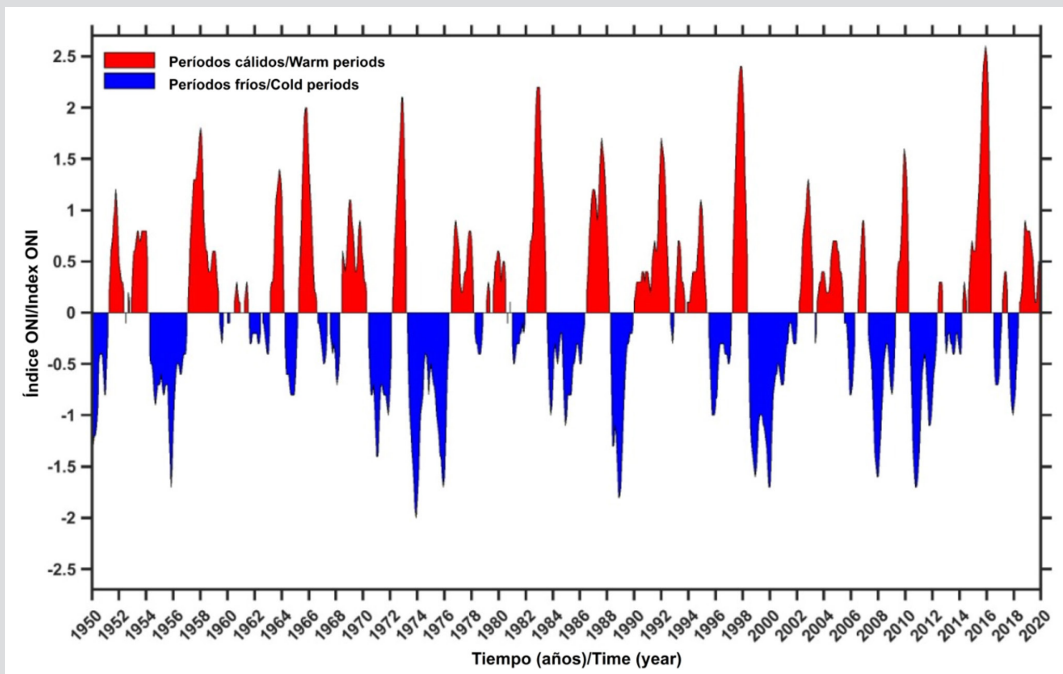
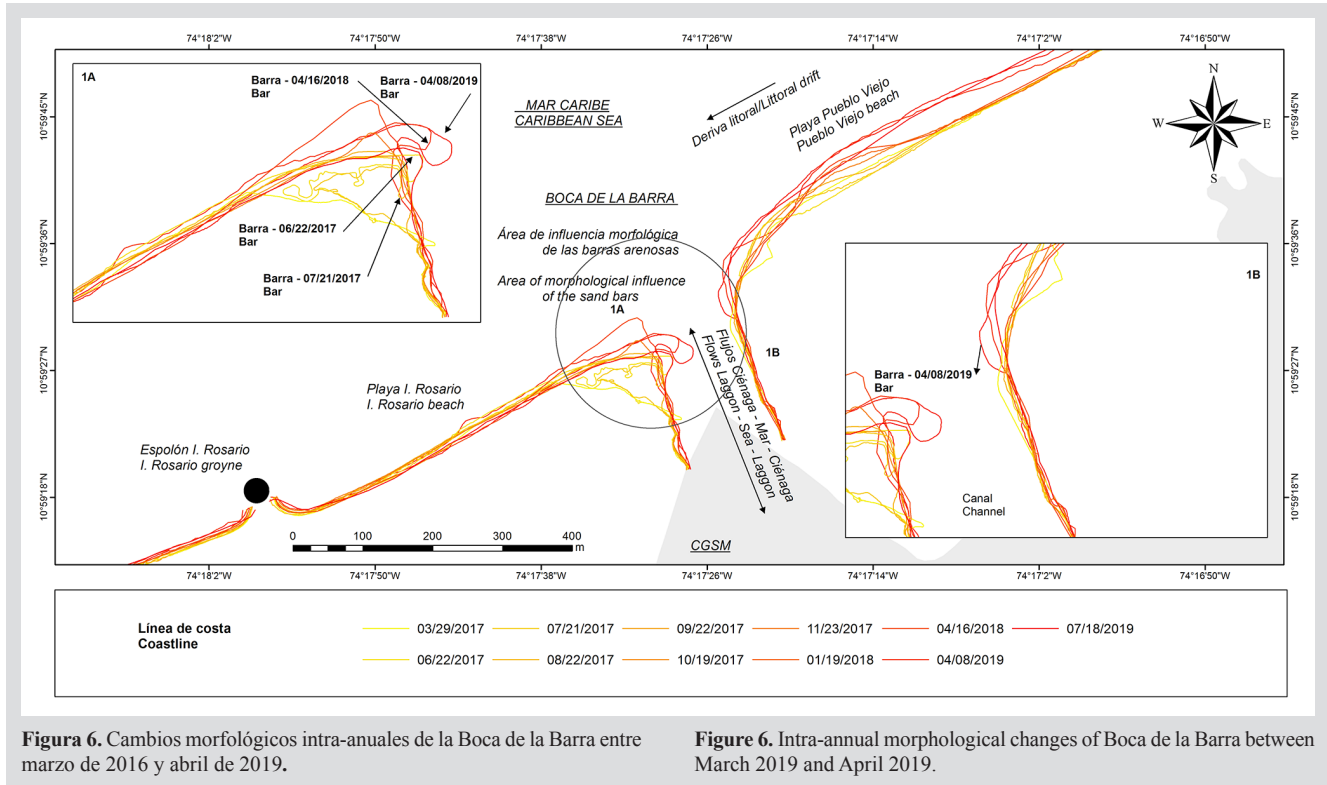


Figura 5. Serie de tiempo del Índice de Oscilación del Sur para los últimos 70 años. Fuente de datos NOAA (2022).

Figure 5. Time series of the Southern Oscillation Index for the last 70 years. Data source: NOAA (2022).



**Figura 6.** Cambios morfológicos intra-anales de la Boca de la Barra entre marzo de 2016 y abril de 2019.

**Figure 6.** Intra-annual morphological changes of Boca de la Barra between March 2019 and April 2019.

Finalmente, el resultado de todo el período 2010-2019 muestra que la dinámica morfológica de la Boca de la Barra en la última década ha estado controlada por la tendencia a la erosión costera con tasas entre -0,8 m/año y -11 m/año, a excepción del área de retención de sedimentos de los espolones. Particularmente el área de la desembocadura (canal) tiene una dinámica morfológica importante en la que se diferencian tendencias de acreción (13,9 m/año) y erosión (-6,0 m/año) al occidente y oriente, respectivamente (Figura 7e-f). El desplazamiento de las líneas mensuales dentro del periodo refleja el efecto de los eventos de extrema sequía asociados al fenómeno El Niño sobre los procesos costeros.

Finally, the results obtained for the whole 2010-2019 period show that, in the last decade, the morphological dynamics of Boca de la Barra have been controlled by a coastal erosion trend with rates between -0.8 m/year and -11 m/year, except for the groynes' sediment retention area. Particularly, the mouth area (channel) has important morphological dynamics, where the west and the east accretion (13.9 m/year) and erosion (-6.0 m/year) trends can be distinguished from each other (Figure 7e-f). The shift of monthly lines during the period reflects the effect of extreme drought events associated with El Niño phenomenon on coastal processes.

**Tabla 2.** Valores promedios por periodos de evolución intra-anual de la línea de costa de la Boca de la Barra, cambios netos (NMS), tasa de regresión lineal (LRR).

**Table 2.** Average values for the intra-annual evolution period of the Boca de la Barra coastline, net changes (NMS), linear regression rate (LRR).

Período / Period	Costa occidental / West Coast				Costa oriental / East Coast			
	NMS (m)	Tasa / Rate LRR (m/año)	NMS (m)	Tasa / Rate (m/año)	NSM (m)	Tasa / Rate (m/año)	NMS (m)	Tasa LRR (m/año)
2010-2016	53.7	12.2	-20.7	-7.2	10.0	5.8	-20.1	-5.2
2016-2019	58.2	7.6	-13.6	-1.5	48.1	5.0	-61.5	-7.5
2010-2019	62.2	10.4	-14.2	-8.0	48.0	0.7	-56.2	-5.9

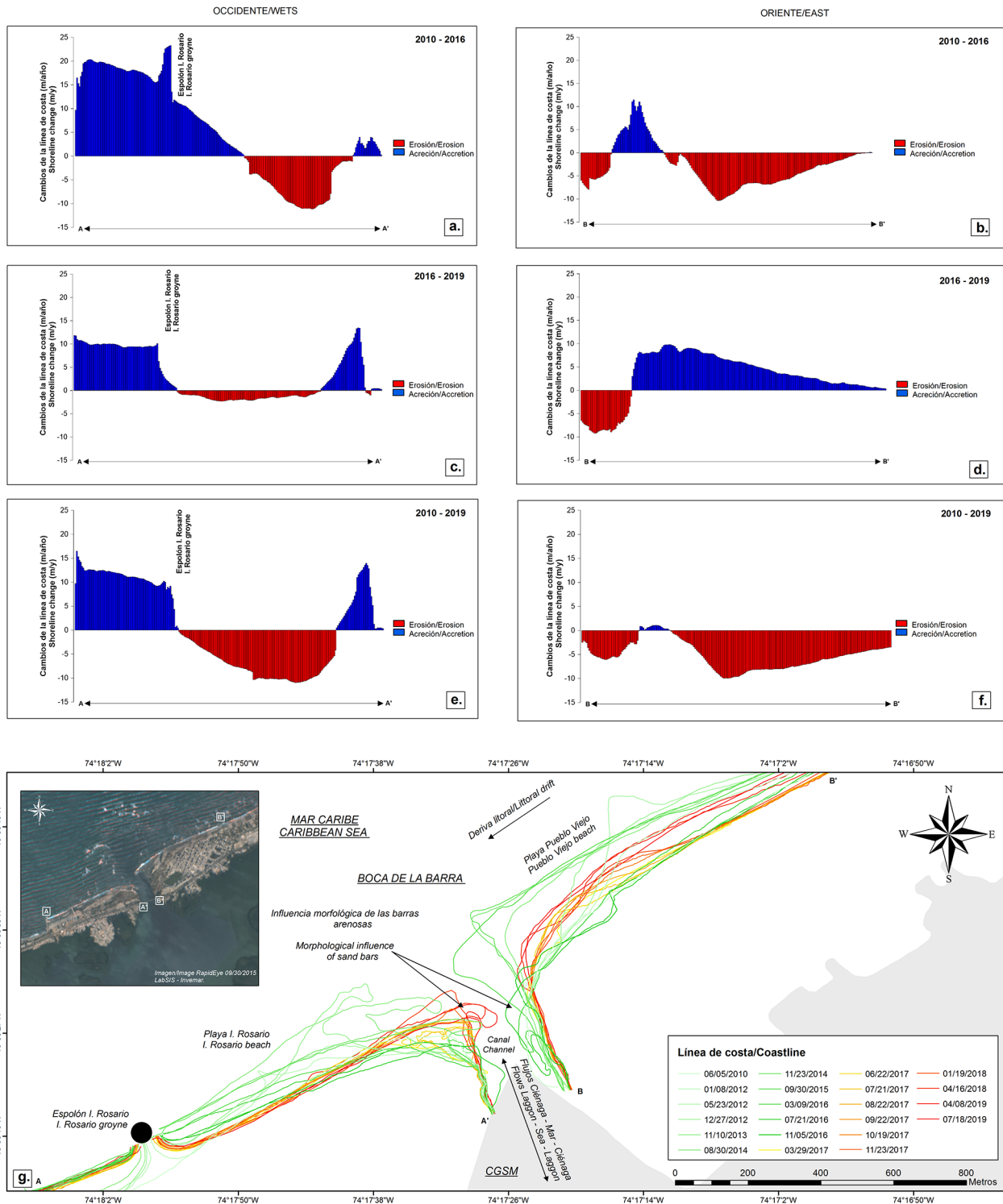
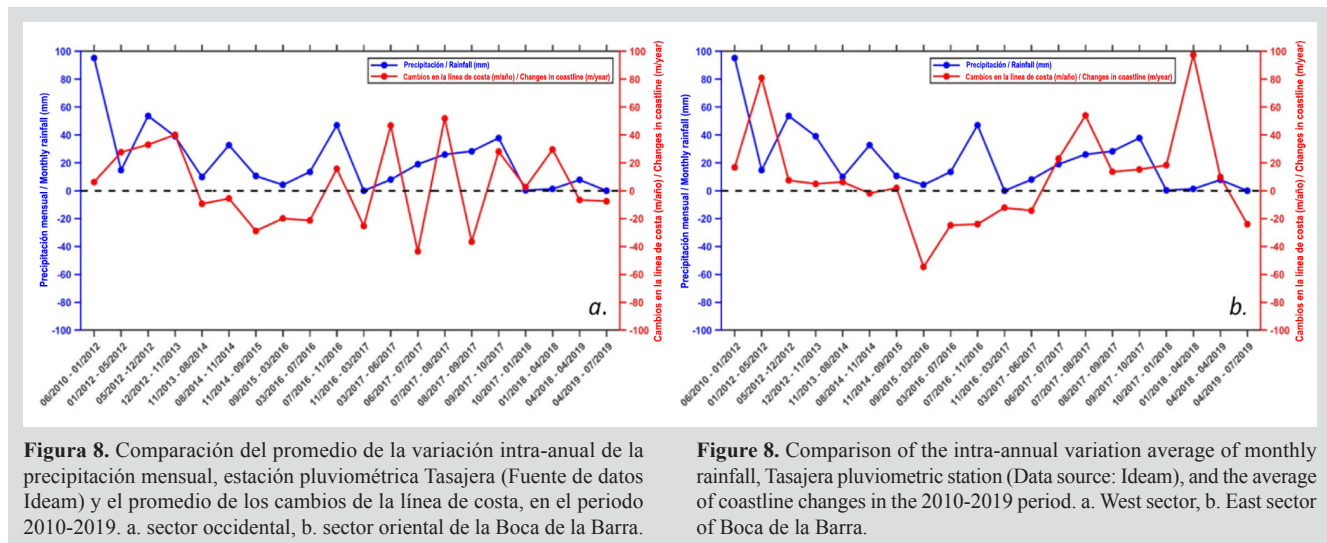


Figura 7. Tendencias evolutivas intra-anales de la línea de costa de la Boca de la Barra entre el periodo 2010-2019.

Figure 7. Intra-annual evolution trends in the Boca de la Barra coastline between 2010 and 2019.

Para visualizar los expuesto anteriormente, se realizó una comparación entre los cambios de la línea de costa y la variación interanual de la precipitación registrada en la estación pluviométrica de Tasajera, donde se observa una respuesta morfológica del área de la Boca de la Barra a los periodos de mayor y menor precipitación en 2010-2019 (Figura 8).

To visualize the above, a comparison was carried out between the changes in the coastline and the interannual variation of the recorded rainfall in the Tasajera pluviometric station, which showed a morphological response to periods of higher and lower rainfall in the Boca de la Barra area between 2010 and 2019 (Figure 8).



**Figura 8.** Comparación del promedio de la variación intra-anual de la precipitación mensual, estación pluviométrica Tasajera (Fuente de datos Ideam) y el promedio de los cambios de la línea de costa, en el periodo 2010-2019. a. sector occidental, b. sector oriental de la Boca de la Barra.

**Figure 8.** Comparison of the intra-annual variation average of monthly rainfall, Tasajera pluviometric station (Data source: Ideam), and the average of coastline changes in the 2010-2019 period. a. West sector, b. East sector of Boca de la Barra.

## DISCUSIÓN

Para entender la dinámica morfológica de esta desembocadura es importante revisar una serie de intervenciones antropogénicas que se presentaron al nororiente de la CGSM entre las décadas de 1950 a 1970. Durante este periodo ocurrieron los mayores cambios recientes en la geomorfología costera entre el sector de la población de Ciénaga e Isla del Rosario por causa de la construcción de la vía Ciénaga-Barranquilla. En condiciones naturales el intercambio de agua desde y hacia la CGSM era a través de la Boca de la Ciénaga que se extendía 800 m entre los límites de Ciénaga y Pueblo Viejo (Erffa, 1973), lo cual favorecía la comunicación de flujos de agua, y la dinámica de procesos morfo-sedimentarios propios de las desembocaduras con el mar (Warrick, 2020).

La ubicación actual de la Boca de la Barra entre Pueblo Viejo e Isla de Rosario, según la fotografía Igac de 1953 era la prolongación de la Isla de Salamanca constituida por depósitos de playa. Además, por sus rasgos geomorfológicos correspondería a un paleocauce originado en el proceso de evolución de la barra litoral (Wiedemann, 1973). Los cambios geomorfológicos del sistema al colocar barreras (dique) en el

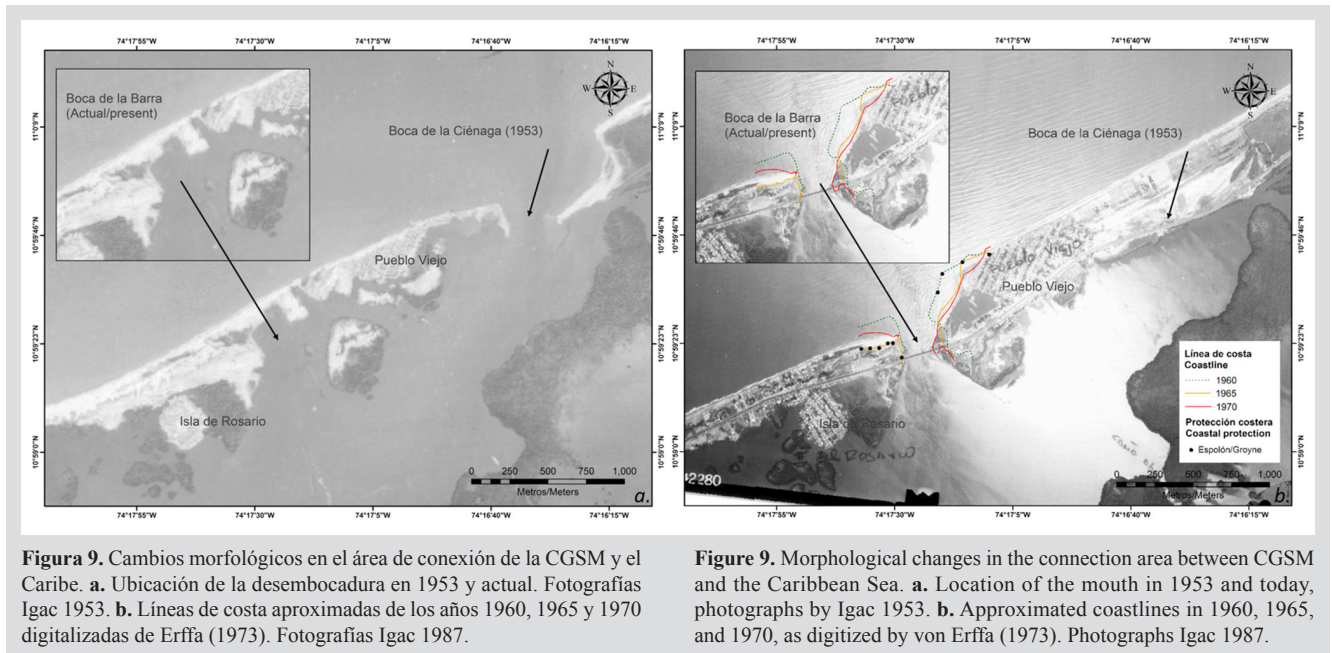
## DISCUSSION

To understand the morphological dynamics of this mouth, it is important to review a series of anthropogenic interventions that occurred to the northeast of the CGSM between the 1950s and 1970s. During this period, the recent major changes in the coastal morphology occurred between the sector of the town of Ciénaga and Rosario Island, due to the construction of the Ciénaga-Barranquilla road. Under natural conditions, water exchange flowed from and to the CGSM through the marsh mouth, which covered 800 m between the limits of Ciénaga and Pueblo Viejo (Erffa, 1973), favoring the communication between water flows as well as morpho-sedimentary processes that are typical of the mouth and the sea (Warrick, 2020).

According to the 1953 Igac photograph, the current location of Boca de la Barra between Pueblo Viejo and Rosario Island was the prolongation of Salamanca Island, which was constituted by beach deposits. Moreover, due to its morphological features, it would correspond to a paleochannel originated during the evolution process of the coastal barrier (Wiedemann, 1973). The geo-morphological changes of the system, given the placing of barriers (dyke) in the hydric

intercambio hídrico entre la ciénaga y el mar influyeron entre las décadas de los años 50 y 60 a un acelerado proceso erosivo forzado por las corrientes marinas (Erffa, 1973), que conllevó entre las décadas de los años 60 y 70 a la construcción de espolones en las playas adyacentes para controlar la erosión y mantener la comunicación permanente del cuerpo de agua con el Caribe (Figura 9).

exchange between the marsh and the sea, influenced an accelerated erosion process between the 1950s and 1960s, forced by marine currents (Erffa, 1973). This led, between the 1960s and 1970s, to the building of groynes in beaches, aiming to control erosion and maintain the permanent communication between the water body and the Caribbean Sea (Figure 9).



Esta nueva configuración de la conexión entre la CGSM y el mar Caribe y las intervenciones antropogénicas de la época fueron determinantes en los procesos morfológicos posteriores. En los resultados obtenidos por períodos interanuales desde 1953 a 2020 se observa que la evolución espaciotemporal de la línea de costa ha respondido al control que ejercen los procesos de erosión y de acreción en el área de la desembocadura, los cuales tienen relación con el comportamiento general de la dinámica litoral de la isla de Salamanca (Gómez *et al.*, 2017). Lo anterior ha determinado ciclos de incidencia de estos procesos (erosión/acreción) sobre la costa y el dominio de tendencias en diferentes períodos, que al compararlas con condiciones climáticas regionales y locales sean estas en condiciones normal o media, seca o El Niño, y húmeda o La Niña, reflejarían un mayor o menor forzamiento que puede ser determinante en las variaciones de la línea de costa y la configuración morfológica de la desembocadura.

Durante los períodos 1953-1997 y 2013-2020, que mostraron tendencia a la erosión costera, se puede observar

This new configuration of the CGSM-Caribbean Sea connection and the anthropogenic interventions at the time was decisive in later morphological processes. In the interannual results obtained from 1953 to 2020, it is observed that the spatial-temporal evolution of the coastline has responded to the control exerted by the erosion and accretion processes in the mouth area, which are related to the general behavior of the coastal dynamics of Salamanca Island (Gómez *et al.*, 2017). The above has determined the incidence cycles of these processes (erosion/accretion) on the coast, as well as the dominance of trends in different periods of time, which, when compared to local and regional climatic conditions, be it under normal or medium conditions (dry for El Niño and wet for La Niña), would reflect a higher or lower forcing, which may be decisive in coastline variations and the morphological configuration of the mouth.

The periods 1953-1997 and 2013-2020 showed a coastal erosion trend; in the first case, a correspondence can be observed between the morphological dynamics of

para el primer caso, una correspondencia entre la dinámica morfológica de todo el período y la experimentada en las primeras décadas posterior al cambio de posición de la desembocadura natural y a su vez para ambos casos con los años de déficit de precipitación y sequía severa causada por eventos El Niño fuerte en los últimos 67 años (Figura 5), por ejemplo, los ocurridos en 1972-73, 1982-83, 1997-98, 2015-16 con efectos sobre la región Caribe (Montealegre, 2014; NOAA, 2016). En estos escenarios la erosión costera es forzada por la disminución de los aportes de sedimentos, la intensificación del oleaje y el transporte litoral a lo largo de la isla de Salamanca (Invemar, 2014a; Gómez *et al.*, 2017).

Por el contrario, en el periodo intermedio a los anteriores (1997-2013), cuando se presenta un cambio del ciclo erosivo y la respuesta de la línea de costa a tendencias de acreción, se evidencia una concordancia con los años La Niña fuerte, como por ejemplo, los eventos 1999-00, 2007-08 y 2010-11 en los cuales se presentaron excedentes de precipitación (Montealegre, 2014). Estos eventos tienen también un efecto sobre el régimen hidrológico del entorno de la CGSM, favoreciendo la disponibilidad de los aportes de sedimentos en el sistema y el intercambio a través de la Boca de la Barra (Blanco *et al.*, 2006; Restrepo *et al.*, 2015; Invemar, 2017). Las condiciones anteriores generan acumulación de sedimentos en las playas adyacentes y el frente de depósito hacia la plataforma continental (Invemar, 2015b).

Por otra parte, los resultados de la evolución y tendencia intra-anual en la última década (2010-2019) evidencian que los cambios de la línea de costa se encuentran también modulados por la estacionalidad climática, debido a la influencia que esta tiene sobre factores como la precipitación, la descarga de los ríos, los vientos, el oleaje, entre otros, que intervienen en la dinámica hidro-sedimentológica de la Boca de la Barra (Invemar-Corpamag, 2018). Durante la época seca y de mayor intensidad de los vientos alisios, y el oleaje (Invemar, 2015a, 2017; Restrepo *et al.*, 2015); además por el efecto que ejerce la marea, se genera sobre el área de la desembocadura un mayor proceso de transporte litoral que es observado en los cambios morfológicos de la abertura del canal y la posición de las barras al estrecharse sobre la costa y presentar procesos morfodinámicos al interior en la desembocadura.

Estos procesos que influyen en la dinámica morfológica son forzados por la entrada de los flujos de agua salada a la CGSM debido a los bajos niveles, durante condiciones de baja precipitación y mínimos aportes de

the whole period and that experienced in the first decades after the natural mouth's change of position. Furthermore, in both cases, a correspondence is observed with the years of rainfall deficit and severe drought caused by strong El Niño events over the last 67 years (Figure 5). For example, these events took place in 1972-73, 1982-83, 1997-98, and 2015-16, with effects on the Caribbean region (Montealegre, 2014; NOAA, 2016). In these scenarios, coastal erosion was forced by the decrease in sediment input, swell intensification, and coastal transport along the Salamanca Island (Invemar, 2014a; Gómez *et al.*, 2017).

On the contrary, in the intermediate period (1997-2013), when a change in the erosive cycle and the coastline response to accretion trends occurred, a concordance with strong La Niña years was evident. For instance, in the 1999-00, 2007-08, and 2010-11 events, when there was a rainfall surplus (Montealegre, 2014). These events also have an effect on the hydrologic regime of the CGSM's environment, favoring the availability of sediment inputs in the system as well as the exchange through Boca de la Barra (Blanco *et al.*, 2006; Restrepo *et al.*, 2015; Invemar, 2017). These conditions generate sediment accumulation in the adjacent beaches and a deposition front towards the continental platform (Invemar, 2015b).

On the other hand, the results of the intra-annual evolution and the trends of the last decade (2010-2019) evidence that changes in the coastline are also modulated by climate seasonality, given its influence on factors such as rainfall, river discharges, winds, waves, among others, which intervene in the hydro-sedimentologic dynamics of Boca de la Barra (Invemar-Corpamag, 2018). During the dry and higher-intensity trade winds and wave season (Invemar, 2015a, 2017; Restrepo *et al.*, 2015), and, due to the effect exerted by the tides, a greater process of coastal transport was generated in the mouth area, which can be observed in the morphological changes in the channel opening and the barrier position, becoming narrower along the coast and showing morpho-dynamic processes within the mouth.

These processes that influence morphological dynamics are forced by salty water inflows into the CGSM, due to low freshwater levels during low rainfall and a minimum input of it into the system from tributaries such as the Magdalena, Fundación, Aracataca, and Sevilla Rivers (Invemar-Minambiente, 2018). When these environmental conditions remain constant over time, they favor erosive trends in the coastal area, but cause sedimentation within the channel, such as that identified in the 2010-2016 period,





agua dulce al sistema proveniente de tributarios como los ríos Magdalena, Fundación, Aracataca y Sevilla (Invemar-Minambiente, 2018). Estas condiciones ambientales, al permanecer constantes en el tiempo, favorecen tendencias erosivas en la zona costera, pero provocan al interior del canal sedimentación, como las identificadas dentro del periodo 2010-2016, sobre las cuales incidieron notablemente los meses de fuerte sequía entre finales de 2014 y mediados de 2016 (NOAA, 2016),

La época húmeda de vientos débiles y altas precipitaciones (Invemar, 2015a, 2017; Restrepo *et al.*, 2015), favorece el aumento de los niveles de agua dentro de la ciénaga y los flujos desde la CGSM hacia el mar, lo cual genera el proceso de transporte de los sedimentos depositados en la desembocadura en época seca y los redistribuye hacia las zonas de playa de Isla del Rosario, Pueblo Viejo y el frente de sedimentación de la plataforma continental (Invemar, 2015b). Esta dinámica normalmente reduce la longitud y la amplitud de las barras, aumenta el ancho de la boca, y recupera los flujos de agua hacia el mar (Invemar-Minambiente, 2018). En este caso, cuando dominan los periodos de lluvia y el suministro de sedimentos en la costa se presentan los procesos de acreción como los evidenciados en el análisis de las líneas de costas estacionales entre el periodo 2016-2019.

## CONCLUSIONES

El comportamiento morfológico de la desembocadura de la ciénaga define un sistema dinámico que a largo plazo ha mostrado cambios y tendencias temporales asociadas al dominio de los procesos de erosión y/o acreción. La respuesta tendencial o interanual de la línea de costa, analizada de manera intra-anual, en la desembocadura cambia de acuerdo al efecto que tienen las manifestaciones de los eventos ENOS (El Niño/La Niña), los cuales han incidido significativamente en los cambios de la costa y a lo largo de décadas han determinado un comportamiento cíclico de los procesos costeros que actúan en la desembocadura; como los ocurridos en los periodos 1997-2013 y 2013-2020 dentro de los cuales se manifestó algún evento fuerte. Aunque históricamente la Boca de la Ciénaga ha tenido cambios de la línea de costa relacionados con factores antropogénicos, su dinámica morfológica en los últimos 67 años ha tenido una tendencia a buscar condiciones de equilibrio del sistema con respecto a las características de la costa de 1953, no obstante, es posible diferenciar que esta dinámica (equilibrio) es menor hacia la línea de costa occidental intervenida con obras duras y mayor en línea de costa oriental, menos intervenida.

on which the months of strong drought by the end of 2014 and mid-2016 had a significant impact (NOAA, 2016).

A wet time with weak winds and high rainfall (Invemar, 2015a, 2017; Restrepo *et al.*, 2015) favors the increase in water levels inside the marsh and in the flows from the CGSM to the sea, which causes the transport of sediments deposited in the mouth during the dry season, redistributing them towards the Rosario Island and Pueblo Viejo beach areas and the sedimentation front of the continental shelf (Invemar, 2015b). Normally, these dynamics reduce the barrier length and width, increase the mouth breadth, and recover the water flows to the sea (Invemar-Minambiente, 2018). In this case, when rainfall periods and sediment supply to the coast are dominant, accretion processes occur, such as those evidenced in the analysis of the seasonal coastline in 2016-2019.

## CONCLUSIONS

The morphological behavior of the lagoon mouth defines a dynamic system that, in the long term, has showed changes and temporal trends associated with the dominance of erosion and/or accretion processes. The tendency or the interannual response of the coastline, as intra-annually analyzed in the mouth, changes according to the effect caused by the manifestation of ENSO events (El Niño/La Niña), which have significantly influenced the coast changes and have determined a cyclic behavior of the coastal processes acting on the mouth for decades, such as those that occurred in the periods 1997-2013 and 2013-2020, in which strong events took place. Although, historically, the Boca de la Ciénaga had changes in the coastline which were related to anthropogenic factors, over the last 67 years, its morphological dynamics have shown a trend towards seeking the system's equilibrium conditions with respect to the coast characteristics in 1953. However, it is possible to identify that these dynamics (equilibrium) are lower towards the west coastline, which was intervened with hard works; and greater in the less intervened east coastline.

The analysis of the intra-annual evolution and trends shows that the morphological response of the mouth is modulated by climate seasonality. The periods with strong ENSO events determine the erosion/accretion trends in the long term, as well as the water flows from and to CGSM. The dominance erosion processes in the last decade indicates a sediment input deficit, which conditions

El análisis de la evolución y tendencia intra-anual está mostrando que la respuesta morfológica de la desembocadura es modulada por la estacionalidad climática. Los periodos donde ocurren eventos fuertes ENOS están determinando las tendencias de erosión y/o acreción a largo plazo y los flujos de agua desde y hacia la CGSM. El dominio de los procesos erosivos en la última década está indicando un déficit de los aportes de sedimentos, el cual condiciona el balance morfológico entre ambas costas de la desembocadura (occidente-oriente). Además, los actuales espolones están afectando los cambios de la línea de costa, la playa adyacente y las dinámicas morfológicas de las barras hacia la desembocadura.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los resultados de la investigación se derivan de los proyectos “Dinámica sedimentológica de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe colombiano” (Fases I, II y III), desarrollados entre 2015 y 2017 por el programa Geociencias Marinas y Costeras-GEO del Invemar, dentro del proyecto “Investigación básica y aplicada de los recursos naturales renovables y del medio ambiente en los litorales y ecosistemas marinos y oceánicos de interés nacional” Código BPIN: 2014011000405; además del proyecto “Monitoreo hidrosedimentológico de la Ciénaga Grande de Santa Marta 2018-2030” convenio de cooperación 317 entre Invemar y Corpamag. Los autores agradecen a todos los investigadores del programa GEO que participaron en las fases de los proyectos de la CGSM y al investigador Wilberto Pacheco Paternina por el apoyo gráfico y a los revisores externos por su contribución al documento.

the morphological balance between both coasts of the mouth (west-east). Moreover, current groynes are affecting the changes in the coastline, the adjacent beach, and the morphological dynamics of the barriers towards the mouth.

## **ACKNOWLEDGMENTS**

The results of this research stem from the projects Sedimentological dynamics of the Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombian Caribbean (Phases I, II and III), conducted between 2015 and 2017 by Invemar’s Marine and Coastal Geosciences (GEO) program, within the framework of project Basic and applied research on natural resources and the environment in the litoral and marine and ocean ecosystems of national interest, BPIN Code: 2014011000405; in addition to the project “Hydrosedimentological Monitoring of the Ciénaga Grande de Santa Marta 2018-2030” cooperation agreement 317 between Invemar and Corpamag. The authors would like to thank all GEO program researchers who participated in the CGSM project stages, as well as researcher Wilberto Pacheco Paternina for his graphical support and the external reviewers for their contributions to this document.



## BIBLIOGRAFÍA / LITERATURE CITED

- Bernal, G. 1996. Caracterización sedimentológica de la llanura deltaica del río Magdalena con énfasis en el sistema lagunar de la Ciénaga Grande de Santa Marta. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 25: 19-48.
- Blanco, J.A., E.A. Vilorio and J.C. Narváez. 2006. ENSO and salinity changes in the Ciénaga Grande de Santa Marta coastal lagoon system, Colombian Caribbean. *Est. Coast. Shelf Sci.*, 66: 157-167.
- Botero, L. and H. Salzwedel. 1999. Rehabilitation of the Ciénaga Grande de Santa Marta, a mangrove-estuarine system in the Caribbean coast of Colombia. *Ocean. Coast. Manag.*, 42: 243-256.
- Cardona, A., V. Valencia, A. Garzón, C. Montes, G. Ojeda, J. Ruiz and M. Weber. 2010. Permian to Triassic I to S-type magmatic switch in the northeast Sierra Nevada de Santa Marta and adjacent regions, Colombian Caribbean: Tectonic setting and implications within Pangea paleogeography, *J. SA Earth Sci.* 29(4): 772-783.
- Del Río, L., F. Gracia and J. Benavente. 2013. Shoreline change patterns in sandy coasts. A case study in SW Spain. *Geomor.*, 196(2): 252-266.
- Erffa, V.A.F.v. 1973. Sedimentation, transport und erosion an der Nordküste Kolumbiens swischwen Barranquilla un der Sierra Nevada de Santa Marta. *Mitt. Inst. Colombo-Alemán Invest. Cient.*, 7: 155-209.
- Gómez, J. 2017. Historical coastal evolution and dune vegetation in Isla Salamanca National Park, Colombia. *J. Coast. Res.*, 33: <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-15-00189.1>
- Gónima, L., J. Mancera-Pineda y L. Botero. 1998. Aplicación de imágenes de satélite al diagnóstico ambiental de un complejo lagunar estuarino tropical: Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe colombiano. *Ser. Publ. Esp. Invenmar*, 4, 56 p.
- Invenmar. 2014a. Evolución reciente de la línea de costa entre isla de Salamanca y el Parque Nacional Natural Tayrona (departamento del Magdalena). *Inf. Técn. Final. Actividad GEO-BPIN*, Santa Marta. 82 p.
- Invenmar. 2014b. Dispersión de sedimentos mediante el estudio de la dinámica meteo-marina en el sector Isla Salamanca-PNN Tayrona (departamento del Magdalena). *Inf. Técn. Final. Actividad GEO-BPIN*. Santa Marta. 60 p.
- Invenmar. 2015a. Variabilidad oceanográfica y climática en la bahía de Santa Marta, ensenada de Gaira y zona de puertos (Caribe colombiano) y su relación con la dinámica sedimentaria del carbón. *Inf. Técn. Final. Actividad GEO-BPIN*. Santa Marta. 64 p.
- Invenmar. 2015b. Dinámica sedimentológica de la Ciénaga Grande de Santa Marta (Caribe colombiano). *Inf. Técn. Final. Actividad GEO-BPIN*. Santa Marta. 76 p.
- Invenmar. 2016. Dinámica sedimentológica de la Ciénaga Grande de Santa Marta (Caribe colombiano). Fase II. *Inf. Técn. Final. Actividad GEO-BPIN*. Santa Marta. 78 p.
- Invenmar. 2017. Conexión de las condiciones hidrosedimentológicas en el Complejo Lagunar Ciénaga Grande de Santa Marta. *Inf. Técn. Final. Actividad GEO-BPIN*. Santa Marta. 30 p.
- Invenmar-Corpamag. 2018. Estudio integral de la Ciénaga Grande de Santa Marta-fase II (B): modelación hidráulica, hidrosedimentológica y biogeoquímica. *Inf. Técn. Final*. Santa Marta. 85 p.
- Invenmar-Minambiente. 2018. Cuarto Informe Técnico. Convenio Interadministrativo 659 de 2017. Santa Marta. 374 p. + anexos.
- Martínez, J.O. y L.H. Molina. 1992. Geomorfología y aspectos erosivos del litoral Caribe colombiano, sector Bocas de Ceniza-Parque Tayrona. *Inf. Proy. Ingeominas*, Bogotá.
- Moore, L. 2000. Shoreline mapping techniques. *J. Coast. Res.* 16 (1), 111e124
- National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA. 2016. National Weather Service, Climate Prediction Center. [En línea]: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml#references>, consultado el 16 de septiembre de 2016
- National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA. 2022. National Weather Service, Climate Prediction Center. [En línea]: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml#references>, consultado el 19 de marzo de 2022
- Ojeda, J., M. Díaz, A. Prieto y J. Álvarez. 2013. Línea de costa y Sistemas de Información Geográfica: modelo de datos para la caracterización y cálculo de indicadores en la costa andaluza. *Invest. Geogr.*, 60: 37-52.
- Polanía J., A. Santos, J. Mancera and L. Botero. 2001. The coastal lagoon Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia: 33-46. In: Seeliger, U. and B. Kjerfve (Eds). *Coastal marine ecosystems of Latin America*. *Ecol. Stud.* 144, Berlin and New York: Springer Verlag.
- Rangel-Buitrago, N., G. Anfuso and A.T. Williams. 2015. Coastal erosion along the Caribbean coast of Colombia: Magnitudes, causes and management. *Oc. Coast. Manag.*, 114: 129-144.
- Restrepo-López, C., J. Ortiz-Royero, L. Otero-Díaz y S. Ospino-Ortiz. 2015. Transporte de sedimentos en suspensión en los principales ríos del Caribe colombiano: magnitud, tendencias y variabilidad. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.*, 39 (153):527-546.

- Rivera-Monroy, V.H., R.R. Twilley, E. Mancera, A. Alcántara-Eguren, E. Castañeda-Moya, O. Casas, P. Reyes, J. Restrepo, L. Perdomo, E. Campos, G. Cotes y E. Viloria. 2006. Aventuras y desventuras en Macondo: rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. *Ecotrópicos*, 19: 72–93.
- Rivillas-Ospina, G., M.A. Maza-Chamorro, S. Restrepo, D. Lithgow, R. Silva, A. Sisa, A. Vargas, J.P. Sarmiento, J. Caes, M. Bolívar, R. Del Río, E. Campo, D. Casas and D. Rudas. 2020. Alternatives for recovering the ecosystem services and resilience of the Salamanca Island Natural Park, Colombia. *Water*, 12(5): 1-22.
- Thieler, E.R. and W. Danforth. 1994. Historical shoreline mapping: improving techniques and reducing positioning errors. *J. Coast. Res.*, 10(3): 549-563.
- Thieler, E.R., E.A. Himmelstoss, J.L. Zichichi and T.L. Miller. 2005. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 3.0: An ArcGIS extension for calculating shoreline change. U.S. Geol. Surv. Open-File Report 2005-1304, 33 p.
- Thieler, E.R., E.A. Himmelstoss, J.L. Zichichi and A. Ergul. 2009. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 — An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geol. Surv. Open-File Report 2008-1278.S.
- Vilardy, S. y J.A. González. (Eds). 2011. Repensando la Ciénaga: Nuevas miradas y estrategias para la sostenibilidad en la Ciénaga Grande de Santa Marta. Univ. Magdalena/Univ. Autón. Madrid, Santa Marta. 228 p.
- Warrick, J.A. 2020 Littoral sediment from rivers: Patterns, rates and processes of river mouth morphodynamics. U.S. Geol. Surv., Pacific Coastal and Marine Science Center, Santa Cruz, CA. 8:355. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00355>
- Wiedemann, H.U. 1973. Reconnaissance of the Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia: physical parameters and geological history. *Mitt. Inst. Colombo-Alemán Invest. Cient.*, 7: 85-119.

**RECIBIDO/RECEIVED:** 13/12/2020

**ACEPTADO/ACCEPTED:** 06/06/2022