vol. 47, n.° 2, mayo-agosto de 2025
ISSN impreso: 0120-0283 • ISSN en línea: 2145-8553

Análisis de los cambios en la línea de costa entre los municipios de Tubará y Puerto Colombia (Atlántico, Colombia)

Milton Andrés Galvis-Gómez[1*]

[1]Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, Colombia. (*) mgalvis@sgc.gov.co

Resumen

La posición de la línea de costa depende de múltiples factores geológicos, oceanográficos, climatológicos o atmosféricos y antrópicos. El 48,3 % del Caribe colombiano experimenta erosión, 33,2 % se considera estable y el restante 18,4 % experimenta acreción. En el departamento del Atlántico, el 55 % de la línea de costa presenta amenaza por erosión alta y media, donde el área de Puerto Colombia es la más crítica. El presente estudio analiza y cuantifica el cambio en la línea de costa entre Tubará y Puerto Colombia por medio de la interpretación de imágenes satelitales desde 1973 hasta el 2024, e integra los resultados con la evolución que ha tenido este sector a partir de los registros históricos existentes (aproximadamente 1600). Los cuerpos de arena ubicados en la desembocadura del río Magdalena migran hacia el suroccidente en favor de la deriva litoral, y experimentan las etapas de establecimiento (D1), rompimiento (D2) y encallamiento (D3-S4), que ocurrieron hasta 1985, y el posterior inicio (D0) o formación de la espiga de Puerto Velero. Estos procesos están asociados con los cambios de la línea de costa en la zona adyacente a la ciénaga de Balboa (Z2), donde se presentan tasas de erosión muy altas (WLRmín = –27 m/año) y se causa una disminución en el área del cuerpo de agua para el 2024 del 75 % del máximo registrado en 1985. El crecimiento de la espiga de Puerto Velero (Z4) se da a una tasa de +119 m/año (WLR) y para el 2024 tiene una longitud aproximada de 5,3 km. En el área adyacente a Cabo Barro (Z5) se presenta una migración del cuerpo de arena hacia el sur, desde 1985 hasta su relativa estabilización en 2010, y se forma una zona con playas protegidas al oleaje debido a la posición actual de la espiga de Puerto Velero.

Palabras clave: Análisis multitemporal; Erosión; Acreción; Geomorfología; Espiga de Puerto Velero; DSAS.

Shoreline Change Analysis in Tubará and Puerto Colombia (Atlántico, Colombia)

Abstract

The shoreline position depends on multiple geological, oceanographic, climatological or atmospheric, and anthropogenic factors. In the Colombian Caribbean, 48.3 % of the shoreline is undergoing erosion, 33.2 % is considered stable, and the remaining 18.4 % is experiencing accretion. In the Atlántico department, 55 % of the shoreline has high and medium erosion hazard, with the area of Puerto Colombia being the most critical. This study analyzes and quantifies the shoreline change between Tubará and Puerto Colombia through the interpretation of satellite images from 1973 to

Forma de citar: Galvis-Gómez, M.A. (2025). Análisis de los cambios en la línea de costa entre los municipios de Tubará y Puerto Colombia (Atlántico, Colombia). *Boletín de Geología*, *47*(2), 83-105. https://doi.org/10.18273/revbol.v47n2-2025004

2024 and integrates the results with the evolution of this sector based on existing historical records (dating back approximately 1600). Sand bodies located at the mouth of the Magdalena river migrate southwestward due to littoral drift and go through the stages of establishment (D1), breakdown (D2), and stranding (D3-S4) around 1985 followed by the initiation (D0) or formation of the Puerto Velero spit. These processes are associated with shoreline changes in the area adjacent to the Balboa lagoon (Z2), where very high erosion rates are observed (WLRmin = –27 m/year) leading to a reduction in the water body's by 2024 of 75 % less than its of the maximum recorded in 1985. The growth of the Puerto Velero spit (Z4) occurs at a rate of +119 m/year (WLR), and by 2024 has reached an approximate length of 5.3 km. In the area adjacent to Cabo Barro (Z5), the sand body migrated southward from 1985 until its relative stabilization in 2010, resulting in the formation of a beach zone protected from wave action by the current position of the Puerto Velero spit.

Keywords: Multitemporal analysis; Erosion; Accretion; Geomorphology; Puerto Velero spit; DSAS.

Introducción

Las costas son áreas morfodinámicamente activas debido a diferentes factores geológicos, oceanográficos, climatológicos o atmosféricos y antrópicos que modifican en el tiempo la ubicación de la línea de costa (Molina *et al*., 1998; Vernette *et al*., 2012; Burningham y Fernandez-Nunez, 2020). La evolución costera es producto de procesos morfodinámicos que ocurren en respuesta a diversos cambios en las condiciones externas (Wright y Thom, 1977). Estas modificaciones pueden reflejarse en periodos cortos, medianos o largos (Crowell *et al*., 1993), o pueden ocurrir de manera rápida o gradual (Scott, 2005; Thom y Cowell, 2005).

Los análisis del cambio de la línea de costa han sido un tema de gran interés en todo el mundo desde la década de 1970, y su estudio se ha llevado a cabo por medio de diferentes técnicas para definir y cuantificar los movimientos que se han experimentado durante cierto periodo, incluso se han documentado desde el siglo XIX (Carter y Woodroffe, 1995; Burningham y Fernandez-Nunez, 2020). Estos análisis se han realizado utilizando mapas históricos, fotografías aéreas, imágenes satelitales y de radar, vehículos aéreos no tripulados y trabajo directo en campo (Burningham y Fernandez-Nunez, 2020).

En Colombia, los análisis del cambio de la línea de costa han sido abordados desde distintos puntos de vista como análisis multitemporales, estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, así como del impacto de las obras de mitigación construidas (Rangel-Buitrago *et al*., 2015, 2018; Ricaurte-Villota *et al*., 2018). La línea de costa en el Caribe colombiano tiene una longitud aproximada de 1700 km, y, de acuerdo con Rangel-Buitrago *et al*. (2015), cerca del 48,3 % experimenta erosión, aproximadamente el 33,2 % se considera estable y el restante18,5 % experimenta acreción.

La línea de costa en el departamento del Atlántico tiene una longitud aproximada de 66 km, donde el 55 % se encuentra clasificada dentro de los rangos de amenaza por erosión alta y media. Así mismo, el 33 % presenta vulnerabilidad alta por erosión costera y el restante 67 % se considera con vulnerabilidad media (Ricaurte-Villota *et al*., 2018). La erosión costera puede estar asociada a diversos factores que varían en su grado de magnitud e influencia; entre ellos se destaca el desequilibrio en el aporte de sedimentos, eventos climáticos extremos, destrucción de los ecosistemas y aumento en el nivel del mar (Rangel-Buitrago *et al*., 2015). El área más crítica debido a los cambios en la línea de costa en los últimos años son las playas de Puerto Colombia (Rangel-Buitrago *et al*., 2015).

En este estudio se realiza un análisis multitemporal de la línea de costa entre los municipios de Tubará y Puerto Colombia (departamento del Atlántico, Colombia), utilizando imágenes satelitales con el fin de conocer cómo y cuánto ha variado en los últimos 51 años (1973 a 2024); asimismo, se identifican los lugares en donde se ha presentado erosión, acreción o la línea de costa se ha mantenido estable. Estos cambios han influido en la posición y tamaño de una laguna costera denominada ciénaga de Balboa, por tanto, se incluye un análisis sobre las variaciones en el tiempo de dicha laguna. Los cambios de la línea de costa registrados en este estudio se discuten dentro de un contexto regional, que incluye las variaciones espacio-temporales de la línea de costa adyacente a la desembocadura del río Magdalena a partir de la cartografía histórica desde el siglo XVII, que ha sido compilada por otros autores (Núñez-Cabarcas, 2003; Fuentes-Delgado, 2022). Debido a los múltiples factores que condicionan la posición de la línea de costa en el tiempo, este trabajo no pretende predecir su ubicación en el futuro.

Localización y clima

El área de estudio se encuentra al norte de Colombia, en el departamento del Atlántico, entre los municipios de Tubará y Puerto Colombia, 20 km al occidente de la ciudad de Barranquilla. La línea de costa analizada se delimita en los sectores de Puerto Colombia, ciénaga de Balboa, punta Morro Hermoso, Puerto Velero, cabo Barro, playa Mendoza y la ensenada Palmarito (Figura 1).

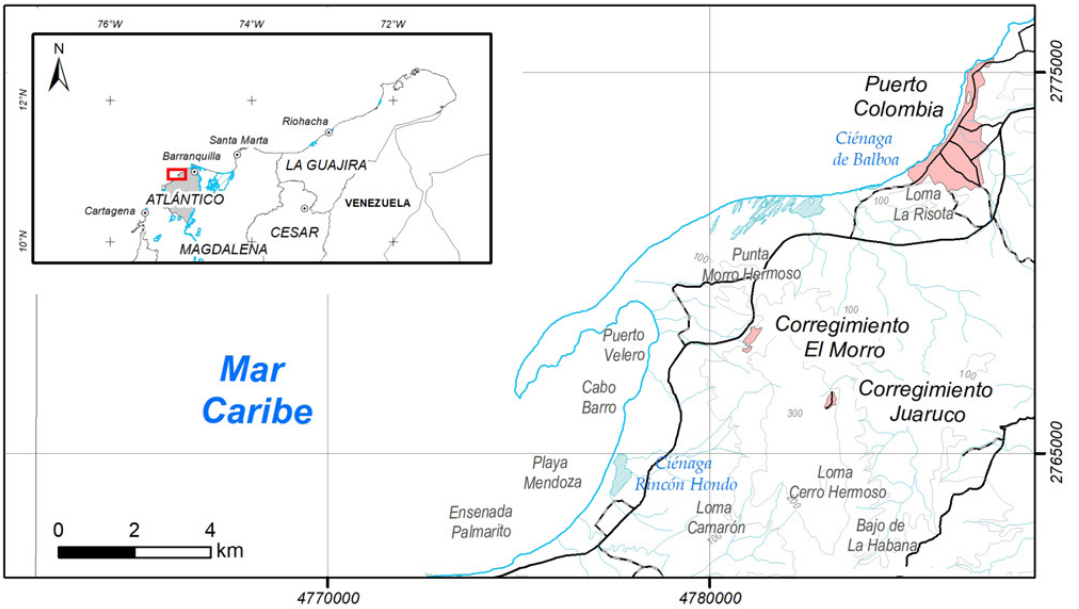

Figura 1. Localización del área de estudio. Sistema de coordenadas planas Origen Nacional (CTM12).

La posición de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) condiciona las épocas climáticas y el clima marino de la costa Caribe colombiana (Ortiz-Royero *et al.*, 2013). El área de estudio se caracteriza por un régimen de lluvias tipo bimodal con dos épocas húmedas: una con mayor cantidad de precipitación de lluvia, entre agosto y noviembre, y otra de menor intensidad entre mayo y junio; asimismo, se presentan dos épocas de sequía: una con valores muy bajos de precipitación de lluvia, entre diciembre y marzo, y otra de transición en julio (Figura 2). Existe una relación directa entre la altura de la ola significante (H_s) y el ciclo anual de los vientos del Caribe que están relacionados con los vientos alisios provenientes del noreste, y tiene mayor fuerza en la época seca entre diciembre y marzo, con valores de hasta 20 m/s, mientras que los valores más bajos se presentan entre septiembre y noviembre (Molina *et al.*, 1998; Osorio *et al.*, 2009; Sánchez-Moreno *et al.*, 2019; García-Laiton, 2021).

La dirección predominante del oleaje es desde el noreste con algunas variaciones; la amplitud varía desde 1 hasta 2,75 m, con un periodo entre 6 y 9 segundos, y la H_s presenta un comportamiento bimodal con valores mayores entre diciembre y marzo, donde alcanza alturas de 4,5 a 5 m, con una disminución de la altura entre marzo y mayo (entre 3,8 y 4,3 m); presenta un ligero aumento entre junio y agosto, relacionado con el veranillo de San Juan, y una nueva disminución entre septiembre y noviembre (valores entre 3,1 y 4,4 m) (Molina *et al.*, 1998; Osorio *et al.*, 2009; Rangel-Buitrago *et al.*, 2015; Bolívar *et al.*, 2019; Sánchez-Moreno *et al.*, 2019; García-Laiton, 2021; Ferrucho-Maloof *et al.*, 2022). En esta zona del Caribe colombiano se presentan eventos extremos como los frentes fríos, entre octubre y marzo, con mayor frecuencia entre enero y marzo, mientras que están ausentes entre junio y septiembre, lo cual coincide con la temporada húmeda (Ortiz-Royero *et al.*, 2013). Los huracanes o tormentas tropicales tienen mayor probabilidad de ocurrencia entre agosto y diciembre (Ortiz-Royero, 2007; García-Laiton, 2021).

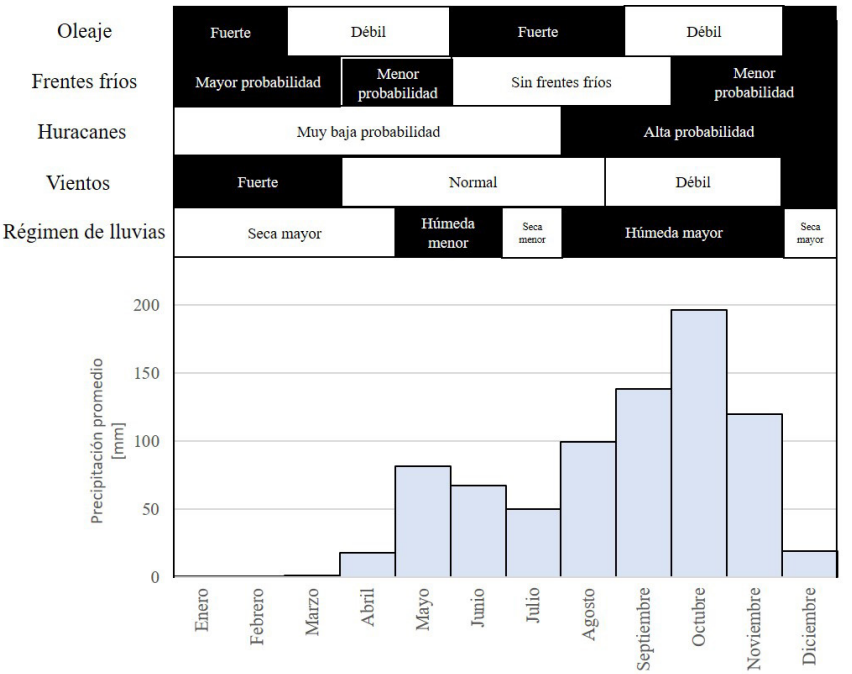

Figura 2. Variaciones interanuales de las condiciones climáticas, oceanográficas y eventos extremos. Los datos de precipitación son tomados de la estación del IDEAM más cercana (Puerto Colombia [29040230] 10,9883° N, 74,9697° W) para el periodo desde 06-1974 hasta 01-2024.

Metodología

Para analizar los cambios de la línea de costa que se han registrado entre los municipios de Tubará y Puerto Colombia se realizaron dos etapas principales, de acuerdo con la disponibilidad de información: la etapa 1 contiene el análisis y síntesis de la cartografía histórica y fotografías aéreas (entre 1600 y 1973), y la etapa 2 incluye el análisis y cuantificación del cambio de la línea de costa (entre 1973 y 2024) (Figura 3).

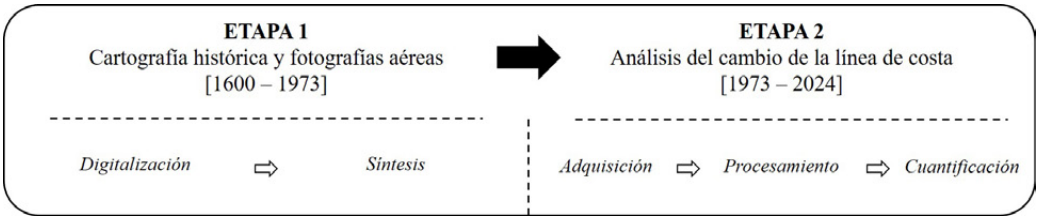

Figura 3. Metodología con las principales fases realizadas en este estudio.

Etapa 1: cartografía histórica y fotografías aéreas

La primera etapa consiste en la integración de los trabajos y documentos que recopilan los registros cartográficos históricos del río Magdalena y su delta, así como aquellos que han interpretado fotografías aéreas con énfasis en los que ilustran la línea de costa e islas ubicadas cerca del área de estudio. A partir de esta información, se realiza una síntesis de los eventos y/o cambios más significativos ordenados cronológicamente desde que existen registros (aproximadamente desde el año 1600).

Etapa 2: análisis del cambio de la línea de costa

Esta segunda etapa integra los cambios en la posición de la línea de costa desde 1973 hasta el 2024, debido a que en este periodo hay disponibilidad de las imágenes satelitales obtenidas por las constelaciones de satélites Landsat (desde julio de 1972), Sentinel 2A (desde junio de 2015) y Sentinel 2B (desde marzo de 2017) (Markham *et al.*, 2004; Phiri *et al.*, 2020). Se desarrolló por medio de tres fases: adquisición de imágenes satelitales, procesamiento y digitalización y cuantificación de la tasa de cambio en la posición de la línea de costa.

Adquisición de imágenes satelitales: para determinar la posición de la línea de costa y realizar el análisis multitemporal se utilizaron imágenes satelitales de las misiones Landsat 1, 2, 3, 4, 5, 7 y Sentinel 2, obtenidas por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y la Agencia Espacial Europea (ESA), y descargadas de las páginas web https://earthexplorer.usgs.gov/ y https://scihub.copernicus.eu/, respectivamente, en periodos de aproximadamente tres años, desde 1973 hasta 2024 (Tabla 1). Estas imágenes tienen resolución espacial media de 10 a 60 m, que influye en la exactitud de determinación de la línea de costa y en el cálculo de las áreas de los cuerpos lagunares. Se utilizó el sistema de coordenadas planas Origen Nacional (CTM12).

Tabla 1. Detalles de las imágenes satelitales utilizadas.

Fecha de adquisición	Satélite / Sensor	Path / Row	Resolución espacial (m)	Línea de costa	Ciénaga de Balboa
25 febrero, 1973	Landsat 1 / MSS	009 / 052	60	X	X
3 enero, 1978	Landsat 2 / MSS	009 / 053	60		X
7 enero, 1979	Landsat 3 / MSS	009 / 052	60	X	X
24 enero, 1985	Landsat 5 / TM	009 / 052	30	X	X
26 diciembre, 1988	Landsat 4 / MSS	009 / 052	30		X
6 enero, 1990	Landsat 5 / TM	009 / 052	30	X	X
11 diciembre, 1991	Landsat 5 / TM	009 / 052	30		X
2 agosto, 1996	Landsat 5 / TM	009 / 052	30	X	X
26 junio, 2000	Landsat 5 / TM	009 / 052	30	X	X
2 enero, 2003	Landsat 7 / ETM+	009 / 053	15*		X
24 febrero, 2005	Landsat 7 / ETM+	009 / 052	15 *	X	X
16 enero, 2008	Landsat 7 / ETM+	009 / 052	15 *		X
29 enero, 2010	Landsat 5 / TM	009 / 052	30	X	X
13 enero, 2013	Landsat 7 / ETM+	009 / 052	15 *		X
14 noviembre, 2015	Sentinel 2 / MSI	T18PVT	10	X	X
27 enero, 2018	Sentinel 2 / MSI	T18PVT	10		X
17 enero, 2019	Sentinel 2 / MSI	T18PVT	10		X
22 marzo, 2020	Sentinel 2 / MSI	T18PVT	10	X	X
07 diciembre, 2020	Sentinel 2 / MSI	T18PVT	10		X
23 enero, 2023	Sentinel 2 / MSI	T18PVT	10		X
01 enero, 2024	Sentinel 2 / MSI	T18PVT	10	X	X

*Resolución espacial mejorada por *pansharpening*.

Procesamiento de imágenes y digitalización: la determinación de la línea de costa se interpretó por medio de la combinación de bandas en color verdadero y el índice diferencial de agua normalizada (*Normalized Difference Water Index* - NDWI), propuesto por McFeeters (1996), en intervalos aproximados de cinco años. El NDWI se calcula mediante la ecuación 1, donde GREEN es la banda correspondiente al verde y NIR al infrarrojo cercano.

$$NDWI = \frac{(GREEN - NIR)}{(GREEN + NIR)} \quad (1)$$

Para delimitar los cuerpos lagunares de la ciénaga de Balboa se realizó el mismo procedimiento aumentando la frecuencia temporal del análisis a intervalos aproximados de tres años para obtener un mejor ajuste en el cálculo de áreas y su tendencia en el tiempo (Tabla 1).

Fue necesario realizar una corrección por bandeamiento (*Scan Line Corrector* - SLC) para las imágenes tomadas por el satélite Landsat-7, utilizando la herramienta "*Fill nodata*" del programa QGIS (versión 3.14.1). Además, se mejoró la resolución espacial utilizando la banda pancromática (*pansharpening*). Los demás

procesamientos y digitalización descritos se realizaron en el *software* ArcGIS (versión 10.8).

Las fechas de las imágenes obtenidas dependen de la disponibilidad dentro de la página del USGS y ESA; su selección tuvo en cuenta el mínimo cubrimiento de nubes en el área de interés para no interferir en los cálculos realizados debido a la falta de visibilidad, así como que la fecha de adquisición entre imágenes fuera similar durante el año con el fin de mantener condiciones climatológicas y oceanográficas parecidas.

Cuantificación de la tasa de cambio: para calcular las tasas de cambio de la línea de costa se utilizó la herramienta DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*), desarrollada por el USGS (https://www.usgs.gov/software/digital-shoreline-analysis-system), en la versión 5 (Himmelstoss *et al.*, 2018), cuyas distintas versiones han sido aplicadas en análisis en diversos lugares del mundo (Oyedotun, 2014).

La línea base se fijó a 250 m de la línea de costa más cercana al continente (DSAS *Baseline* - DB); cada transecto tiene una distancia de búsqueda de 1500 m (*Transect Lenght* - TL), y se encuentra separado 20 m entre sí (*Transect Segment* - TS). Adicionalmente, se estableció una distancia de suavizado de 2500 m debido a la sinuosidad de la línea de costa en el área de estudio. La incertidumbre en la posición de la línea de costa (*Shoreline Uncertainty* - SU) está relacionada, entre otras cosas, con la resolución espacial de la imagen satelital de la cual se obtuvo (Figura 4).

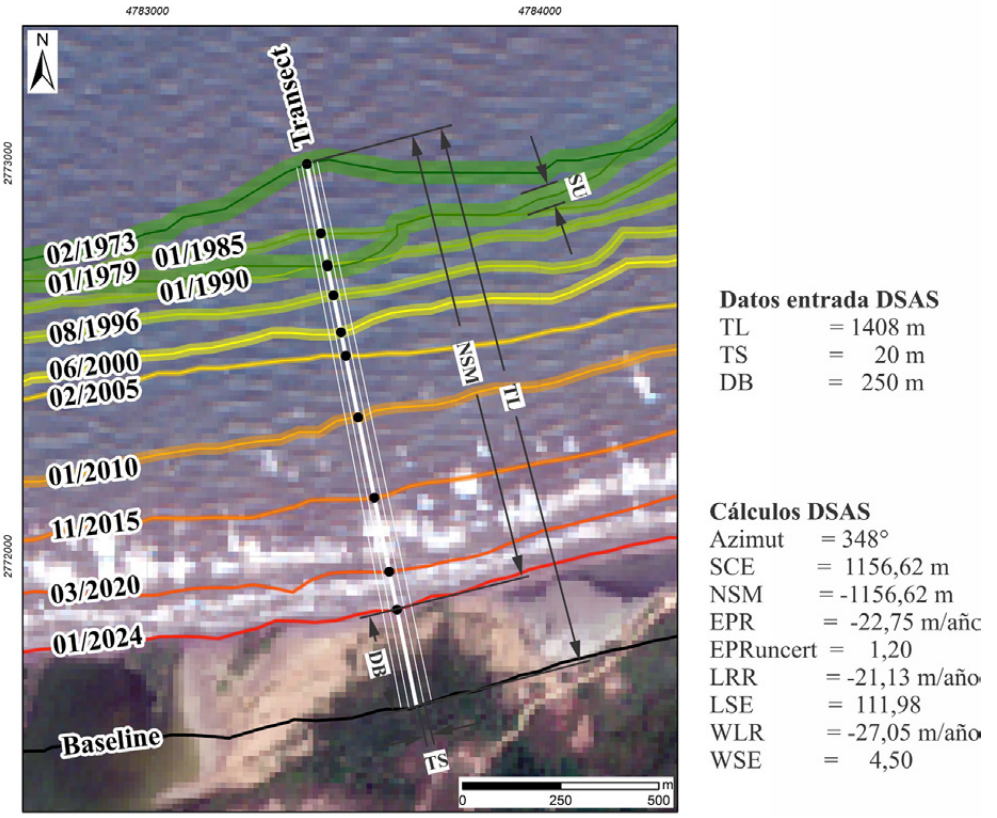

Figura 4. Datos calculados en cada transecto mediante la herramienta DSAS.

Los parámetros calculados con la herramienta DSAS fueron envolvente del cambio de la línea de costa (SCE por sus iniciales en inglés), movimiento neto de la línea de costa (NSM), tasa de cambio del punto final (EPR), tasa de cambio con regresión lineal (LRR) y tasa de cambio con regresión lineal ponderada (WLR) (Tabla 2 y Figura 4). El parámetro EPR es usualmente utilizado para análisis de periodos cortos (inferiores a 10 años) o donde solo se dispone de dos líneas costeras de diferente tiempo, mientras que los parámetros LRR y WLR son utilizados para análisis de periodos más largos especialmente cuando se dispone de mayor cantidad de líneas de tiempo (Thieler *et al.*, 2005; Qiao *et al.*, 2018; Santos *et al.*, 2021), por tanto, se considera que es más adecuado utilizar estos parámetros en el presente estudio (1973-2024).

Tabla 2. Descripción de los parámetros utilizados en este estudio (definiciones tomadas de Himmelstoss *et al.*, 2018).

Parámetro	Sigla - significado	Descripción	Unidades
Envolvente del cambio de la línea de costa	SCE – *Shoreline Change Envelope*	Distancia mayor entre todas las líneas de costa	m
Movimiento neto de la línea de costa	NSM – *Net Shoreline Movement*	Distancia entre la línea de costa más antigua y la más reciente	m
Tasa de cambio del punto final	EPR – *End Point Rate*	Tasa de cambio calculada por la división del movimiento neto de la línea de costa y el tiempo transcurrido	m/año
Tasa de cambio con regresión lineal	LRR – *Linear Regresion Rate*	Regresión lineal cuadrática de la tasa de cambio de la línea de costa	m/año
Tasa de cambio con regresión lineal ponderada	WLR – *Weighted Linear Regresion*	Regresión lineal cuadrática de la tasa de cambio teniendo en cuenta la incertidumbre en la posición de la línea de costa	m/año

Las tasas de cambio obtenidas con el parámetro WLR permitieron clasificar los procesos de erosión, estabilidad o acreción considerando las siete categorías propuestas por Del Río *et al.* (2013) y Natesan *et al.* (2015), cuyos rangos fueron adaptados de Cifuentes-Ossa *et al.* (2017) para el distrito de Buenaventura (Tabla 3).

Tabla 3. Clasificación de procesos de cambio de la línea costera de acuerdo con la tasa de cambio con la regresión linear ponderada (WLR). Adaptado de Cifuentes-Ossa *et al.* (2017).

Rango WLR (m/año)	Clasificación de los procesos de cambio de la línea costera
< –15	Erosión muy alta
–15 a –5	Erosión alta
–5 a –2,5	Erosión moderada
–2,5 a 2,5	Estable
2,5 a 5	Acreción moderada
5 a 15	Acreción alta
> 15	Acreción muy alta

Resultados

Cartografía histórica (1600-1825)

La posición del delta del río Magdalena en el Caribe colombiano ha tenido múltiples migraciones en los últimos dos millones de años. Se ha ubicado en Riohacha, Galerazamba (Plioceno tardío), Cartagena (Pleistoceno) y finalmente en Barranquilla, en donde se encuentra actualmente (Link, 1927; Bordine, 1974; Kolla *et al.*, 1984; Fuentes-Delgado, 2022).

Por medio de la cartografía histórica se tienen registros del río Magdalena y su delta, aproximadamente desde el año 1600. Estos mapas ilustran los múltiples brazos, canales, bancos de arena e islas ubicadas en su desembocadura, así como anotaciones de su toponimia que muestran variaciones a lo largo del tiempo, condicionadas principalmente por cambios en su morfología (Martinez *et al.*, 1990; Núñez-Cabarcas, 2003; Fuentes-Delgado, 2022). Los mapas realizados a partir de 1825 permitieron su georreferenciación por medio de la ubicación de rasgos geográficos reconocibles sobre la base cartográfica actual (Fuentes-Delgado, 2022).

Evolución de isla Verde e isla Sabanilla (1825-1931)

En el siglo XIX, la desembocadura del río Magdalena presentaba un frente deltaico con el canal distributario principal de descarga hacia el occidente (Martinez *et al.*, 1990; Anfuso *et al.*, 2015); existían islas adyacentes nombradas por los autores de estos mapas como isla Sabanilla e isla Verde. Desde entonces, se observan cambios en sus tamaños y proporciones; adicionalmente, apareció la denominación de la bahía de Sabanilla en la parte interna, protegida por estos cuerpos, y que permitió su desarrollo como área portuaria (Núñez-Cabarcas, 2003; Fuentes-Delgado, 2022). Hacia 1843, isla Sabanilla fue segmentada en tres partes, e isla Verde se configuró como la primera línea de contención de la actividad marina formando una boca (denominada boca de la Culebra). En 1873, isla Verde disminuyó su tamaño frente a lo que actualmente es Puerto Colombia, el brazo del río Magdalena que desembocaba en este sector desapareció y solo quedó Bocas de Ceniza; en consecuencia, isla Verde e isla Sabanilla perdieron la influencia directa de las aguas y sedimentos del río. Desde 1888 hasta 1893 se construyó el muelle de 1200 m de longitud y se estableció la población de Puerto Colombia en la playa de Cupino, toponimia que posteriormente desaparecería (Fuentes-Delgado, 2022) (Figura 5).

Hacia 1921, isla Verde empezó a aumentar su tamaño y se adhirió al continente a través de un tómbolo, mientras que el tamaño de isla Sabanilla empezó a disminuir hasta su eventual desaparición cerca de 1931 (Fuentes-Delgado, 2022). Para esta misma época se iniciaron las obras de construcción de los tajamares de Bocas de Ceniza, de aproximadamente 7 km de largo, que aumentaron el proceso de migración de isla Verde hacia el suroccidente debido a la acción de la deriva litoral (Figura 5) (Núñez-Cabarcas, 2003; Fuentes-Delgado, 2022). Estas cadenas de islas migraron conservando tanto su orientación como su forma estrecha y curvada, a tasas de desplazamiento entre 230 y 430 m/año, hasta su posterior adición al continente y su consecuente desaparición cerca de 1960. El déficit de aporte de sedimentos al litoral del río Magdalena por la construcción de estos tajamares influyó directamente en su desaparición, y generó además efectos erosivos en las zonas cercanas a dichas obras (Dugand, 1947; Raasveldt y Tomic, 1958; Martinez *et al.*, 1990; Martínez, 1993; Molina *et al.*, 1998; Flórez y Robertson, 2001; Núñez-Cabarcas, 2003; Vargas-Cuervo, 2012; Anfuso *et al.*, 2015; Sánchez-Moreno *et al.*, 2019; Fuentes-Delgado, 2022). La función de Puerto Colombia como puerto marítimo cesó cuando el muelle fue bloqueado por la migración de la espiga y, en consecuencia, la ciudad de Barranquilla se convirtió en el nuevo puerto marítimo en el Caribe colombiano (Dugand, 1947; Martinez *et al.*, 1990).

Etapa de establecimiento y rompimiento de isla Verde e isla Sabanilla (hasta 1953)

Anfuso *et al.* (2015) presentan un modelo morfodinámico para la evolución de este cuerpo de arena, basado en la propuesta de Forbes *et al.* (1990, 1995) y Orford *et al.* (1991), quienes establecen unas etapas donde las islas barreras son iniciadas (D0, S0), establecidas (D1, S1) y posteriormente atraviesan etapas de transición, encallamiento o rompimiento (D2, D3, S2, S3, S4), con potencial para la reincorporación de los sedimentos en nuevas estructuras, de acuerdo con condicionantes externos o respuesta interna del sistema. La etapa de inicio (D0) no está registrada en los registros históricos, sin embargo, los autores proponen que el cuerpo de arena pudo originarse después de la construcción de los tajamares de Bocas de Ceniza, probablemente a partir de cuerpos de arena menores ubicados en la desembocadura del río Magdalena que se unieron y migraron hacia el suroccidente. Hacia 1947, el cuerpo de arena formaba una estructura alineada con la deriva litoral en la etapa de establecimiento (D1) que creció rápidamente en aguas someras y migró en el sentido de la deriva litoral. La etapa de rompimiento (D2) ocurrió entre 1947 y 1953, cuando la espiga se fragmentó y empezó a migrar hacia el continente iniciando la transición de una estructura alineada con la deriva litoral y pasó a estar alineada con la dirección en que rompe el oleaje (Figura 5). Es probable que eventos naturales como vientos fuertes, periodos de sequía o arremetidas del mar (reportadas en 1930, 1951, Huracán Fox en 1952, 1954, Huracán Katie en 1955) hayan acelerado este proceso (Martinez *et al.*, 1990; Núñez-Cabarcas, 2003; Anfuso *et al.*, 2015).

A partir de 1960 ocurrió la etapa de encallamiento (D3 y S4), caracterizada por la acreción de los cuerpos de arena a la costa, ubicada al suroccidente de la cabecera municipal de Puerto Colombia (Anfuso *et al.*, 2015).

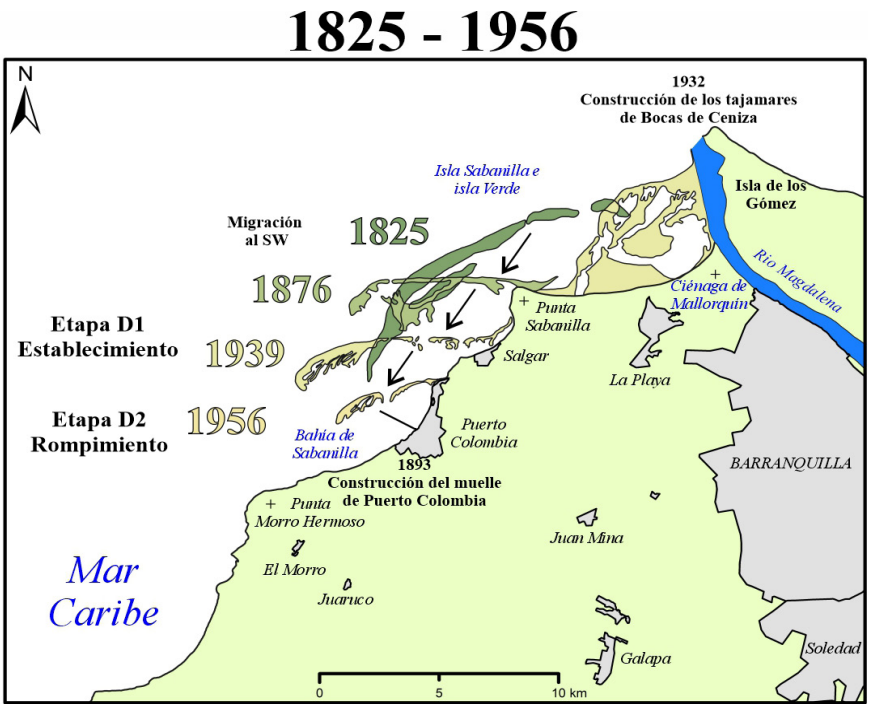

Figura 5. Evolución espaciotemporal de los cuerpos de arena ubicados adyacentes a la desembocadura del río Magdalena entre 1825 y 1956.

Cambios en la línea de costa (1973-2024)

El área de análisis se dividió en siete zonas, de acuerdo con los procesos dominantes en los cambios de la posición de la línea de costa (erosión, acreción o estabilidad) para el periodo analizado (Figura 6).

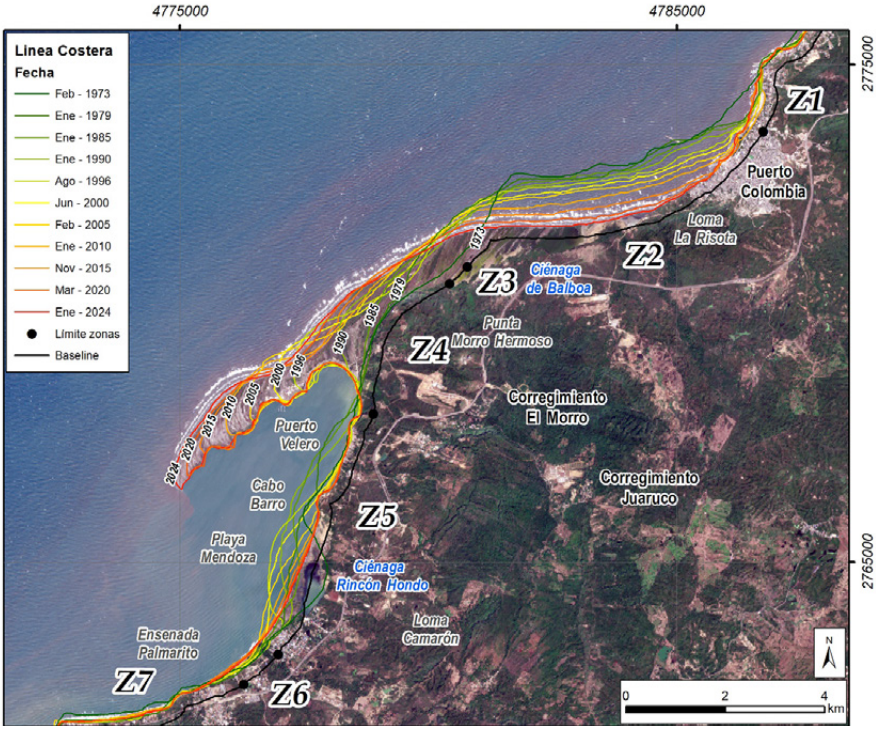

Figura 6. Cambios en la línea de costa en Puerto Colombia desde 1973 hasta 2024. La delimitación de cada una de las zonas se realizó teniendo en cuenta la línea base (*baseline*), y los puntos negros indican los límites de las mismas.

Zona 1 – Puerto Colombia (Z1): corresponde a un segmento de aproximadamente 2,5 km de longitud, ubicado al norte de la cabecera municipal de Puerto Colombia, en el sector de Pradomar (Tabla 4). Dentro del periodo analizado se considera una zona estable, debido a que las tasas de cambio de la línea costera son bajas (WLRprom = +0,3 m/año) (Figura 7) y la envolvente del cambio ha sido relativamente baja (SCEprom= +232,5 m), así como el cambio neto (NSMprom = –126,8 m) (Figura 8). En esta zona se han construido espolones que generan una acreción ligera desde el 2010 hasta la actualidad.

Tabla 4. Resumen de los parámetros calculados en cada una de las zonas analizadas.

Zona	Longitud (m)	Envolvente del cambio de la línea de costa SCE (m)			Movimiento neto de la línea de costa NSM (m)			Tasa de cambio del punto final EPR (m/año)			Tasa de cambio con regresión lineal LRR (m/año)			Tasa de cambio con regresión lineal ponderada WLR (m/año)			Morfodinámica
		Mín.	Prom.	Máx.	Mín.	Prom.	Máx.	Mín.	Prom.	Máx.	Mín.	Prom.	Máx.	Mín.	Prom.	Máx.	
Z1 Puerto Colombia	2420	63,3	232,5	610,7	–493,5	–126,8	70,9	–9,7	–2,5	1,4	–6,6	–1,5	0,7	–2,2	0,3	2,8	Estable
Z2 Ciénaga de Balboa	7040	485,5	890,9	1156,6	–1156,6	–770,8	437,5	–22,7	–15,2	8,6	–22,5	–16,3	4,0	–27,0	–19,7	–2,5	Erosión muy alta
Z3	500	648,3	673,9	691,4	444,3	515,8	578,2	8,7	10,1	11,4	4,1	5,9	7,4	–2,4	0,2	2,5	Estable (transición)
Z4 Puerto Velero	3240	653,4	875,2	1243,7	591,3	816,5	1170,5	11,6	16,4	24,7	7,5	16,0	31,4	2,7	13,2	31,2	Acreción muy alta
Z4 Espiga	-	-	5557,4	-	-	5557,4	-	-	109,3	-	-	120,7	-	-	119,0	-	Acreción lateral muy alta
Z5 Cabo Barro	5420	224,8	624,1	1181,9	–305,0	104,3	580,9	–6,0	2,1	11,4	–10,3	–1,9	6,2	–12,5	–6,1	2,3	Erosión moderada a alta
Z6 Palmarito	940	173,6	194,5	244,9	53,5	150,9	193,1	1,1	3,0	3,8	2,5	3,4	3,8	2,5	3,3	3,9	Acreción moderada
Z7	4040	58,6	140,9	225,5	–194,4	–92,0	43,8	–3,8	–1,8	0,9	–2,2	–0,5	2,4	–1,8	–0,1	2,5	Estable

Zona 2 – Ciénaga de Balboa (Z2): corresponde a un segmento de aproximadamente 7 km de longitud, adyacente a la cabecera municipal de Puerto Colombia, la ciénaga de Balboa y las lagunas costeras ubicadas al suroeste del cuerpo de agua principal (Tabla 4). La erosión litoral de esta zona ha sido muy alta (WLRprom = –19,7 m/año), con tasas hasta de –27,0 m/año (WLRmín) (Figura 7), que provocan una disminución del área superficial de cuerpos de agua asociados a la ciénaga de Balboa (Figura 10). La erosión litoral ha producido retrocesos máximos hasta de 1156,6 m (SCEmáx), y en promedio de 890,9 m (SCEprom) (Figura 8).

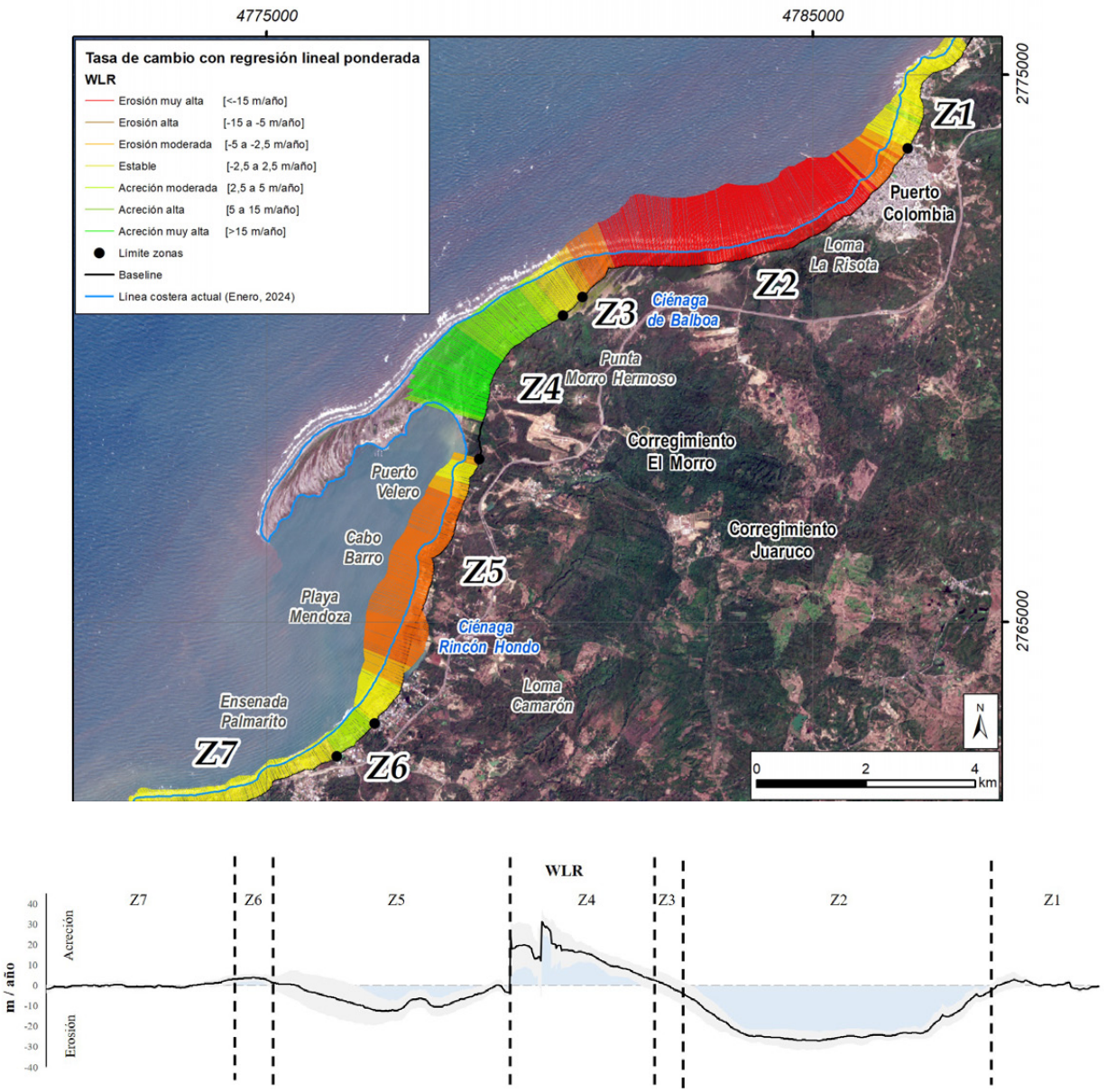

Figura 7. Tasa de cambio de la línea de costa en Puerto Colombia (WLR). Los tonos rojizos son áreas con tasas negativas (erosión), mientras que los tonos verdosos tienen tasas positivas (acreción). La sombra gris al lado de la línea de dispersión corresponde a la desviación estándar de la tasa de cambio (WSE).

Zona 3 (Z3): segmento relativamente corto con una longitud de 500 m, ubicado al norte de la Punta Morro Hermoso (Tabla 4). Debido a la posición de la línea de costa más antigua (1973), presenta una envolvente del cambio de la línea de costa entre 648,3 y 691,4 m (SCEmín y SCEmáx) (Figura 8), sin embargo, exceptuando esta línea de costa (es decir, analizando el periodo desde 1979 a 2024), los cambios se encuentran en una franja de 250 m de ancho con ligeras fluctuaciones en su posición que muestran una estabilidad, lo cual se evidencia en los valores cercanos a 0 m/año de la tasa de cambio (WLRprom = 0,2 m/año) (Figura 7). La zona 3 se considera una zona de transición entre la zona 2, que está dominada por tasas muy altas de erosión, y la zona 4 que tiene tasas muy altas de acreción.

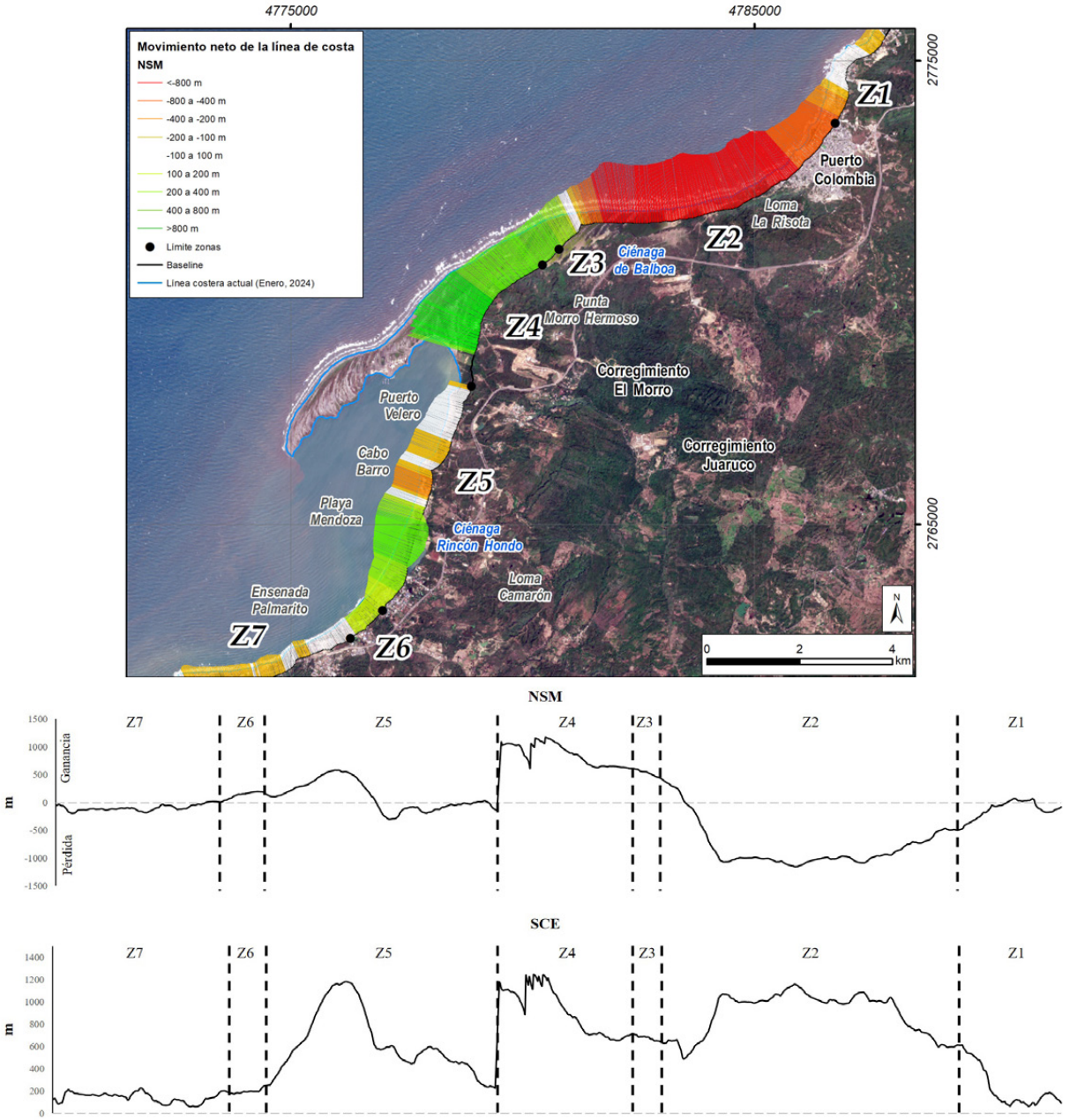

Figura 8. Movimiento neto de la línea de costa en Puerto Colombia (NSM) y cambio máximo de la línea de costa (SCE). Los tonos rojizos son áreas con movimientos netos negativos (erosión), mientras que los tonos verdosos tienen movimientos positivos (acreción).

ona 4 – Puerto Velero (Z4): corresponde a un segmento de aproximadamente 3 km de longitud, ubicado al occidente de la Punta Morro Hermoso, en el sector conocido como Puerto Velero (Tabla 4). La línea de costa en la Z4 ha experimentado grandes cambios asociados con ganancia de terreno y una envolvente del cambio de la línea de costa de +875,2 m (SCEprom) (Figura 8), y tasas de crecimiento muy altas (WLRprom = +13,2 m/año) hasta alcanzar valores máximos de 31,2 m/año (WLRmáx) (Figura 7). En esta zona se destaca principalmente la acreción lateral que ha permitido el crecimiento de la espiga de Puerto Velero desde los años 70. Para el 2024, esta espiga tiene una longitud de 5,3 km de largo y hasta 800 m de ancho. La tasa de crecimiento lateral de la espiga se determinó por medio de un transecto transversal con azimut de 230° desde la Punta Morro Hermoso, y se obtuvo una tasa de cambio de +119 m/año (Figura 9).

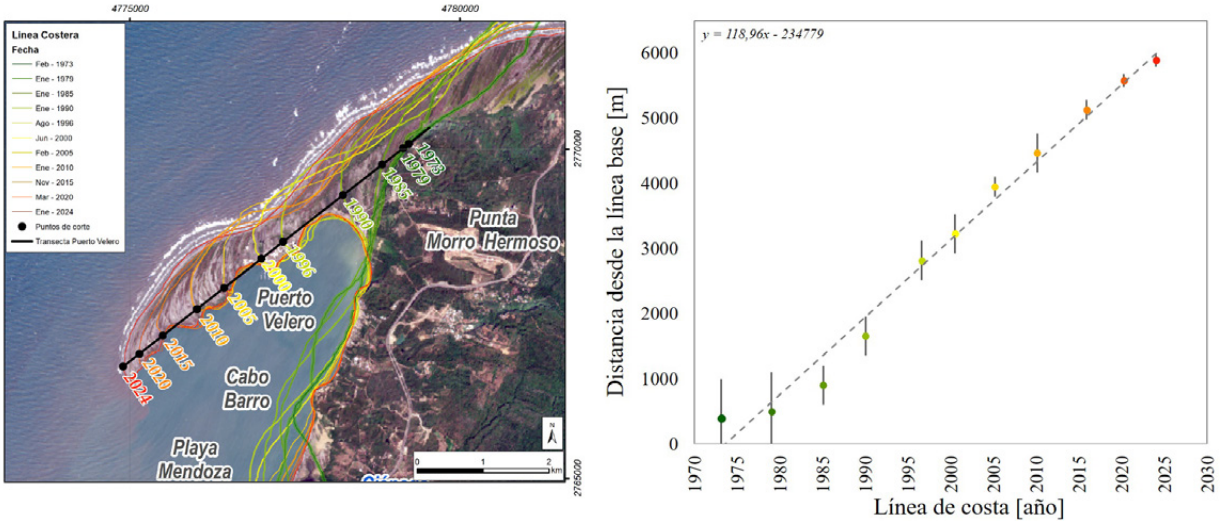

Figura 9. Acreción lateral de la espiga de Puerto Velero. La tasa de cambio WLR es +118,96 m/año. Las barras de error en la gráfica están relacionadas con la incertidumbre en la posición de la línea de costa y se encuentra exagerada 10 veces para mejorar su visualización.

Zona 5 – Cabo Barro (Z5): corresponde a un segmento de aproximadamente 5,5 km de longitud ubicado adyacente de Cabo Barro (Tabla 4). La línea de costa en la Z5 ha presentado fenómenos de erosión litoral moderada a alta con retrocesos máximos de 1181,9 m (SCEmáx) y en promedio 624,1 m (SCEprom) (Figura 8). Las tasas de erosión promedio son de –6,1 m/año (WLRprom) y alcanza valores hasta de –12,5 m/año (WLRmín) (Figura 7). Entre 1979-1996, se observa una migración lateral de un cuerpo arenoso desde el noreste de Cabo Barro hacia el suroeste al sector de la Playa Mendoza frente a la Ciénaga Rincón Hondo, seguido de la posterior erosión de la línea de costa desde 1996 hasta la actualidad.

Zona 6 – Palmarito (Z6): este segmento de aproximadamente 1 km de longitud se encuentra ubicado en la Ensenada Palmarito (Tabla 4). La línea de costa de la Z6 ha sufrido una acreción moderada con una envolvente de cambio promedio de 194,5 m (SCEprom) (Figura 8), y las tasas de cambio van desde 2,5 hasta 3,9 m/año (WLR) (Figura 7).

Zona 7 (Z7): se encuentra ubicada al sur de la Ensenada Palmarito con una longitud aproximada de 4 km (Tabla 4). La línea de costa en esta zona no ha experimentado grandes variaciones en el periodo analizado, con una envolvente de cambio máximo de 225,5 m (SCEmáx) (Figura 8). Las tasas de cambio en esta zona son cercanas a 0 m/año (WLRprom) (entre –1,8 hasta 2,5 m/año), lo cual muestra estabilidad en la posición de la línea de costa para el periodo analizado (Figura 7).

Cambios en la ciénaga de Balboa

Las lagunas costeras ubicadas al suroccidente del municipio de Puerto Colombia, como la ciénaga de Balboa y otros cuerpos de agua menores adyacentes, han sufrido grandes cambios en su extensión areal en el periodo analizado (1973-2024). Desde 1973 hasta 1985 se observa un crecimiento areal hasta alcanzar un máximo de 281,5 ha. A partir de 1985 inicia un decrecimiento en el cubrimiento superficial de estas lagunas costeras hasta el 2024 (Figura 10). Factores externos podrían haber influido en la magnitud en la cual se han presentado estos cambios (mareas, pluviosidad anual, cambios estacionales, construcción de obras de mitigación de erosión costera, profundidad del cuerpo de agua, entre otros). Sin embargo, el retroceso de la línea costera en la Z2 ha influido directamente en la disminución del área de estos cuerpos de agua que se encuentran separados del mar por una barra de arena. Hasta la última fecha analizada en el presente estudio (01 de enero de 2024) los cuerpos de agua han disminuido aproximadamente un 75 % del área máxima medida el 24 de enero de 1985, ya que actualmente solo cubren 74,8 ha (Figura 10).

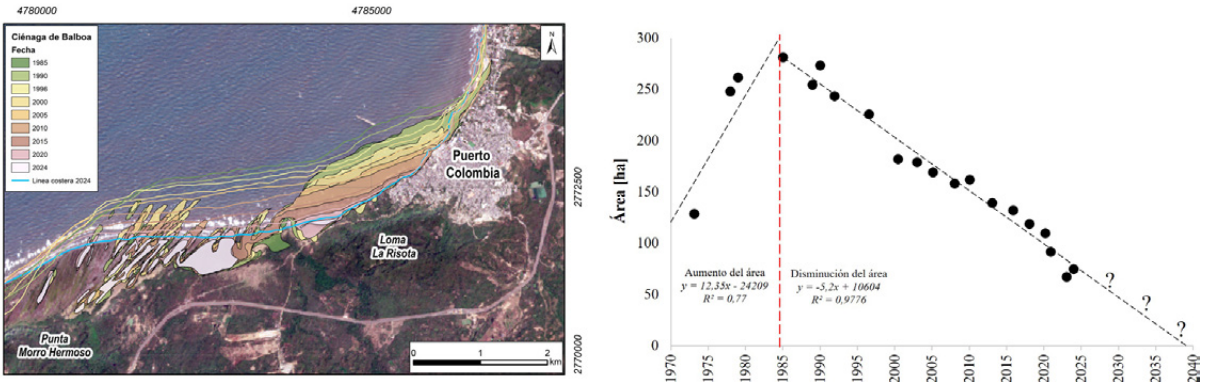

Figura 10. Cambios en el área de la ciénaga de Balboa y lagunas costeras asociadas al occidente de Puerto Colombia, entre 1985 y 2020.

El comportamiento a futuro de la ciénaga de Balboa es difícil de predecir debido a los múltiples factores que se deben tener en cuenta, no obstante, de mantenerse condiciones similares a las presentadas desde 1985 se podría esperar una disminución crítica del cuerpo de agua en un futuro cercano, ya que el área ha disminuido a una tasa de 5,2 ha/año (Figura 10).

Discusión

La posición de la línea de costa en el área de estudio se ha determinado utilizando múltiples recursos (mapas históricos, fotografías aéreas, imágenes satelitales) para diferentes periodos según diversos autores. En el presente estudio se analiza un rango de tiempo mayor al utilizado en esos estudios (entre 1973 hasta 2024), según la disponibilidad de imágenes satelitales, en donde se estableció un intervalo aproximado de cinco años entre cada imagen (Tabla 5), lo cual permitió realizar un análisis del cambio de la línea de costa en un periodo medio (10 a 60 años), en el sentido de Crowell *et al.* (1993). No se incluye el análisis de las fotografías aéreas tomadas antes de 1973, debido a que los cuerpos de arena de isla Verde e isla Sabanilla experimentan las etapas de encallamiento y rompimiento (D3-S4), y se retoma una nueva etapa de inicio (D0) para la espiga de Puerto Velero. Por tanto, se enfatiza en la evolución de este último proceso.

Definición de la línea de costa

A pesar de que la definición de línea de costa es relativamente sencilla, ya que esta coincide con la interfaz física entre tierra y mar, en la práctica es difícil de aplicar debido a que presenta cambios posicionales a lo largo del tiempo, relacionados con distintas dinámicas naturales como el movimiento de sedimentos, olas, mareas, vientos, agua subterránea, tormentas, cambios estacionales, intervención antrópica, entre muchas otras (Pajak y Leatherman, 2002; Boak y Turner, 2005). Por tanto, la línea de costa se debe considerar en un sentido temporal, y la escala de tiempo debe estar determinada por el contexto de la investigación.

En el presente estudio se determina la línea de costa como la posición instantánea de la interfaz agua-tierra en el momento en que el satélite adquiere la imagen. La incertidumbre en la posición está determinada por la resolución espacial, que varía entre 10 y 60 m (Tabla 1); este valor es ligeramente mayor a la incertidumbre de la posición de la línea de agua durante el día debido a las condiciones de marea establecido en un máximo de 7 m por Rangel-Buitrago y Anfuso (2009), y abarcaría la incertidumbre por mediciones generadas por errores en la digitalización o la georreferenciación (Thieler *et al.*, 2005). La mayoría de imágenes interpretadas (73 %) fueron adquiridas entre enero y marzo (Tabla 1), es decir, que las condiciones para comparar las imágenes son relativamente similares: temporada seca mayor, vientos fuertes, muy baja probabilidad de ocurrencia de huracanes, alta probabilidad de frentes fríos y oleaje fuerte (Figura 2), lo que permitió disminuir la incertidumbre que podría llegar a influir en la posición de la línea de costa por variaciones interanuales.

Cuantificación de los cambios de la línea de costa

Los análisis multitemporales permiten registrar y cuantificar los cambios en la línea de costa, los cuales se pueden categorizar como avance o retroceso, producto de la combinación de erosión y deposición y emergencia o subsidencia (Valentin (1952) en Bird (2019)). Por medio de la herramienta DSAS es posible obtener múltiples parámetros para cuantificar estos cambios (Thieler *et al.*, 2005). En el área de estudio han sido calculados algunos parámetros para diferentes periodos; la tasa de cambio del punto final (EPR) y la tasa de cambio con regresión lineal (LRR) son los más utilizados para obtener tasas de cambio (Tabla 5).

Tabla 5. Línea de costa delimitada en las distintas publicaciones por medio de sensores remotos o cartografía histórica.

PUBLICACIONES	Siglo XIX	1900's	1910's	1920's	1930's	1940's	1950's	1960's	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Martinez *et al. (1990)*	Sd					Sd	Sd	Sd												Sd						Sd																																							
Martinez (1993)						F	F	F												F						F																																							
Molina *et al. (2001)*						F																			S/L									S	S																																
Flórez y Robertson (2001)						Sd	Sd	Sd												Sd						Sd										Sd																														
Afanador y Carvajal (2009)								F																		F									F									Sd																						
Ruge *et al.* (2010)						F														Sd																								Sd																					
Vargas-Cuervo (2012)																												L5							L5		L5		L7		L7			S			Q																				
Rangel-Buitrago *et al. (2015)*																							Sd																								Sd							Sd										
Anfuso *et al. (2015)*					F	Sd	Sd					Sd											Sd							Sd									Sd											Sd			Sd											
Coca-Dominguez *et al. (2017)*																									L																														L8									
Hernández y Vela (2018)												L														L												L								L																		
Ricaurte-Villota *et al. (2018)*																																										G														G								
Bolivar *et al. (2019)*																							L	L	L					L	L							L	L	L	L									L	L					L								
Sánchez-Moreno *et al. (2019)*					F										F					F																														GE	G			S		G	D						
Villate *et al. (2020)*																																										Sd									Sd		Sd		Sd		L8						
Garcia-Laiton (2021)																	L	L					L	L	L	L	L	L	L	L					L		L	L	L		L7	L7	L7	L7	L7	L7	L7	L7	L7	L7	L8	L8	L8	L8	L8	L8	L8	L8	L8	L8	L8	L8	
Anaya-Vásquez (2022)																								Sd	Sd		Sd	Sd	Sd	Sd	Sd	Sd	Sd	Sd		Sd	Sd	Sd	Sd	Sd	Sd	Sd	Sd	Sd	Sd	Sd	Sd	Sd	Sd	Sd	Sd	Sd	Sd	Sd	Sd	Sd	Sd	Sd	Sd	Sd	Sd			
Fuentes-Delgado (2022)	H		H		H	H	H																																																									
Ferrucho-Maloof *et al. (2022)*																																											G		G				G				G				G						
Reyes-Salazar y Ramirez (2023)																							L5			L5			L5						L5			L5			L7			L7			L5			L7			L8			L8			S2			
Este estudio												L1						L3						L5					L5						L5				L5					L7				L5				S2					S2				S2			S2

Sin información debido a la fecha de publicación
SCE - NSM - EPR
EPR
EPR - LRR
SCE - NSM - EPR - LRR - WLR

D: drone; F: fotografía aérea; G: Google Earth; H: cartografía histórica; L: Landsat sin diferenciar; LX: Landsat 1 a 8; Q: Quickbird; S: SPOT; S2: Sentinel-2; Sd: sin diferenciar.

La tasa EPR se obtiene dividiendo la distancia entre la línea de costa más antigua y la más moderna (NSM) por el tiempo transcurrido entre ellas, sin embargo, este parámetro ignora los datos disponibles entre estas dos fechas (Thieler *et al.*, 2005). La tasa LRR tiene en cuenta la posición de todas las líneas de costa interpretadas, y se determina por medio de una regresión lineal. Finalmente, la tasa WLR realiza la regresión lineal teniendo en cuenta todas las líneas de costa, e incluye un valor ponderado obtenido a partir de la incertidumbre de la posición, la cual es determinada en el presente estudio por medio de la resolución espacial de las imágenes interpretadas e involucra un valor ligeramente mayor a los cambios en su posición debido a las condiciones de marea durante el día. En este sentido, se considera más apropiado utilizar el parámetro WLR para calcular la tasa de cambio de la línea de costa en este tipo de estudio, dados los insumos disponibles (múltiples líneas de costa e incertidumbre en su posición). Las diferencias entre los parámetros EPR y WLR para la zona de estudio alcanzan valores absolutos de 19,5 m/año (en promedio 4,8 m/año), y entre LRR y WLR valores de 12 m/año (en promedio 3,4 m/año). Estas diferencias dependen principalmente de la magnitud de las tasas de avance o retroceso, así como de la presencia de diferentes eventos de erosión o acreción dentro del periodo analizado, para lo cual se debería plantear dividir el tiempo de análisis de acuerdo a estos eventos (Figura 11).

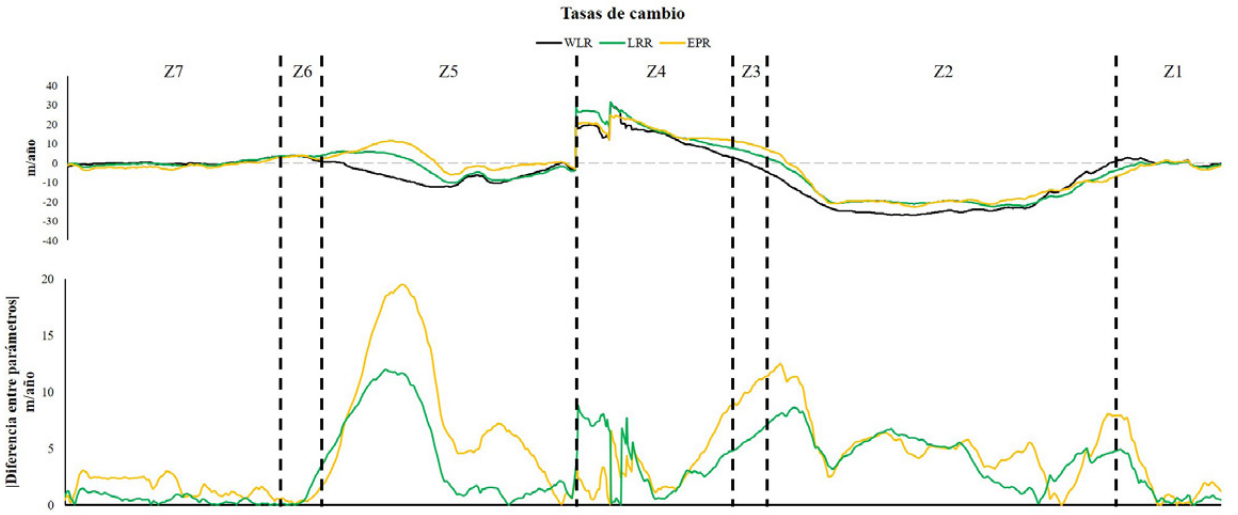

Figura 11. Diferencias entre las distintas tasas de cambio de la línea costera en el área de estudio (WLR: línea negra, LRR: línea verde, EPR: línea amarilla).

Etapa de encallamiento de isla Verde e isla Sabanilla (1960-1985)

Posterior a la etapa de rompimiento (D2) de los cuerpos de arena conformados por isla Verde e isla Sabanilla frente a Puerto Colombia (Z2) inició la etapa de encallamiento (D3 y S4), tanto para estructuras alineadas con la deriva como aquellas que están alineadas con el lugar donde rompen las olas (Anfuso *et al.*, 2015). Esta etapa ocurrió aproximadamente entre 1960 y 1985 (Figura 12), se caracterizó por la migración del cuerpo de arena hacia el continente hasta llegar al municipio de Puerto Colombia, lo que provocó una acreción de barras de arena asociada con la formación de crestas de playa desde Pradomar, que posteriormente migraron en favor de la deriva litoral hacia el suroccidente hasta la Punta Morro Hermoso (Martinez *et al.*, 1990; Martínez, 1993; Molina *et al.*, 2001; Anfuso *et al.*, 2015; Sánchez-Moreno *et al.*, 2019). Esta acreción permitió la expansión temporal y movilidad del cuerpo de agua de la ciénaga de Balboa en este periodo (Martínez, 1993), y alcanzó un máximo areal de 281,5 ha (Figura 10). Al mismo tiempo, ocurrieron algunas variaciones de la línea de costa entre la Punta Morro Hermoso, Cabo Barro y Playa Mendoza (Z5), con migración de las barras de arena hacia el sur, lo cual permitió la formación de una laguna costera denominada Ciénaga Rincón Hondo.

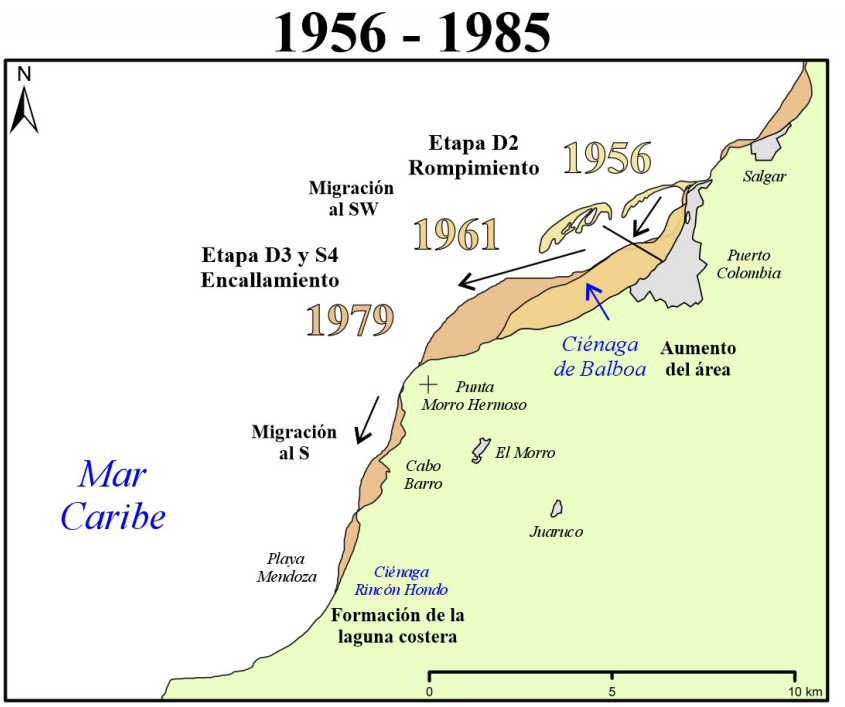

Figura 12. Evolución espaciotemporal de los cuerpos de arena y la línea de costa cerca de Puerto Colombia entre 1956 y 1985.

Etapa de inicio de la espiga de Puerto Velero (1985-2024)

Aproximadamente en 1985, se consolidó una nueva etapa de inicio (D0) que dio lugar al crecimiento de la espiga de Puerto Velero desde la Punta Morro Hermoso, tal como lo indican Anfuso *et al.* (2015) (Figura 13). Anaya-Vásquez (2022) presenta valores de elongación (relación entre el ancho y el largo) del cuerpo arenoso cercanos a 1 para 1991 y menores a 0,6 a partir de 1993, es decir, que el largo empieza a ser mayor que el ancho, conformando la forma característica de una espiga (Otvos, 2012). El crecimiento de la espiga estuvo acompañado de la formación de lagunas elongadas cuyo eje mayor se dispuso de forma paralela a subparalela a la línea de costa. De acuerdo con Martínez (1993), estas depresiones ocupadas por agua representan la zona ubicada entre el frente de playa y la barra litoral inmediata para un intervalo de tiempo dado.

Al tiempo que sucedió el crecimiento de la espiga de Puerto Colombia (Z4), se presentó un fenómeno de erosión en la parte posterior que se extendió desde la Punta Morro Hermoso hasta Puerto Colombia (Z2), así como movimientos en favor de la deriva litoral en la zona adyacente a Cabo Barro (Z5), hasta su relativa estabilización después de 2010 (Figura 13).

La zona adyacente a Puerto Colombia (Z2) ha sido determinada como el área más crítica afectada por fenómenos de erosión costera en el departamento del Atlántico, y se presenta como caso de estudio en múltiples ocasiones (Rangel-Buitrago y Anfuso, 2009; Ricaurte-Villota *et al.*, 2018). Los retrocesos máximos registrados en el presente estudio alcanzan valores hasta de 1156,6 m, con tasas de erosión WLR hasta de –27 m/año para el periodo de 1973 a 2024 (Tabla 4). Estas tasas de erosión obtenidas son similares a las reportadas por otros autores, a pesar de la diferencia entre los periodos de análisis y métodos empleados (Tabla 6). Es importante tener en cuenta que tasas de cambio mayores a 10 m/año son inusuales (Bird, 2019). Este retroceso de la línea de costa está relacionado con la disminución considerable del área de la ciénaga de Balboa del 75 % del área registrada para 1985 (Figura 10).

Tabla 6. Tasas de erosión reportadas para la zona adyacente a Puerto Colombia (Z2).

Tasa de erosión (m/año)	Periodo	Parámetro	Publicación
–27	1973-2024	WLR	Este estudio
–19,9	1984-2017	EPR	Bolívar *et al.* (2019)
–22	2004-2017	No especifica	Ricaurte-Villota *et al.* (2018)
–29,5	1984-2014	No especifica	Rangel-Buitrago *et al.* (2015)
–34	1986-1996	EPR	Molina *et al.* (2001)

La migración al sur de las barras de arena que conformaban isla Verde e isla Sabanilla, y, su posterior encallamiento en el borde litoral adyacente a Puerto Colombia, dejó expuesta la línea de costa a los procesos de erosión, ya que estas espigas funcionaban como protección natural ante el oleaje y la deriva litoral.

A partir de 2004, se construyeron 19 espolones como soluciones duras de ingeniería para la defensa de la línea costera adyacente a la cabecera municipal de Puerto Colombia (Bolívar *et al.*, 2019). La instalación de este tipo de estructuras puede ocasionar tanto reflexión y difracción de las olas como un desequilibrio en el balance de sedimentos, debido a que estos quedan retenidos en la parte expuesta a la deriva litoral y pueden aumentar la erosión en la parte posterior de la estructura a causa de este déficit de sedimentos (Flórez y Robertson, 2001; Rangel-Buitrago *et al.*, 2018; Ricaurte-Villota *et al.*, 2018; Villate *et al.*, 2020; Ferrucho-Maloof *et al.*, 2022).

En marzo del 2009 ocurrió el rompimiento de una sección de 200 m del muelle de Puerto Colombia (Z2), debido a la presencia de frentes fríos que causaron una altura máxima de la ola significante de 2,27 m (H_s) (Ortiz *et al.*, 2014).

Entre 2005 y 2010, cuando la espiga de Puerto Velero superó una longitud de los 3 km (Figura 9) y valores de elongación cercanos a 0,2 (Anaya-Vásquez, 2022), se observó el inicio de un proceso de erosión en el denominado cuello exterior e interior (Figura 13); este fue mayor en el exterior al encontrarse más expuesto al frente del oleaje, así como por la circulación de personas y la ocupación de infraestructura para el turismo, lo que provoca una disminución considerable en el ancho de la espiga en este punto (Villate *et al.*, 2020). Este crecimiento de la espiga produce un cambio en el régimen de oleaje en las playas de Puerto Velero y Caño Dulce, conformándolas temporalmente como playas protegidas con dirección predominante del oleaje del oeste-suroeste y alturas de la ola de 0,05 m debido a la refracción de los frentes de oleaje (Ferrucho-Maloof *et al.*, 2022).

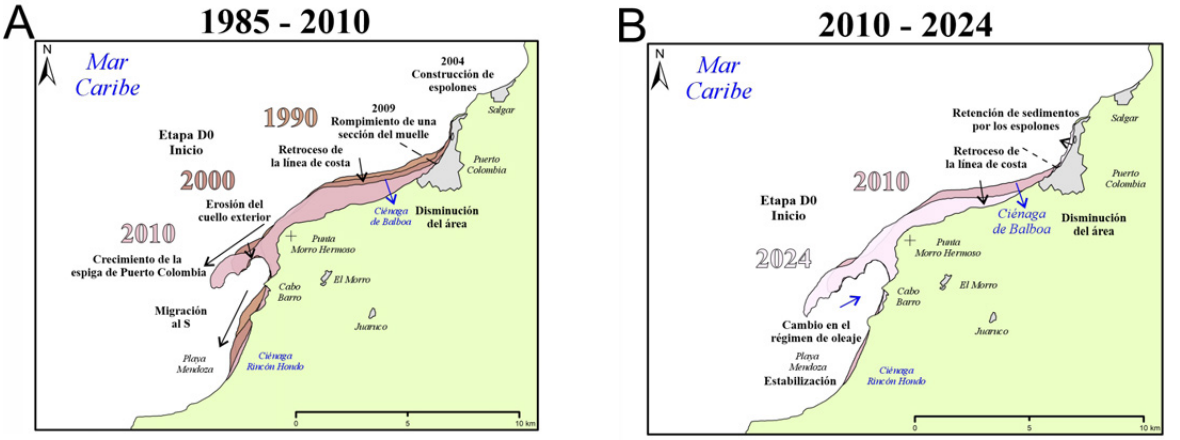

Figura 13. Evolución multitemporal de la línea de costa entre los municipios de Tubará y Puerto Colombia. **A.** De 1985 a 2010. **B.** De 2010 a 2024.

La espiga de Puerto Colombia para el 2024 tiene una longitud aproximada de 5,3 km, y su tasa de crecimiento es de +119 m/año (WLR) para el periodo de 1973 y 2024 (Figura 9); este valor es similar a los obtenidos por otros autores, a pesar de haber sido calculados en periodos o por métodos diferentes (EPR o LRR) (Tabla 7).

Tabla 7. Tasas de acreción reportadas para la espiga de Puerto Colombia (Z4).

Tasa de acreción (m/año)	Periodo	Parámetro	Publicación
+119	1973-2024	WLR	Este estudio
+108	1985-2020	No especifica	Anaya-Vásquez (2022)
+138,7	2005-2020	LRR	Ferrucho-Maloof *et al.* (2022)
+117	2004-2019	EPR	Villate *et al.* (2020)
+103	1986-1996	EPR	Molina *et al.* (2001)

La posición de la línea de costa depende de diversos factores que se pueden clasificar por su origen: geológicos (tectónica regional, isostasia, sismos, desequilibrio en el aporte de sedimentos), oceanográficos (mareas, corrientes, temperatura superficial del mar, aumento del nivel del mar), climatológicos o atmosféricos (cambio climático, variaciones estacionales interanuales e intraanuales, tormentas o eventos extremos) y antrópicos (rellenos, obras de mitigación, variación en la cantidad de aporte de sedimentos); o por el tiempo en que actúan (corto, mediano o largo plazo), lo cual condiciona su grado de magnitud e influencia y dificulta su predicción. Martinez *et al.* (1990) mencionan que las espigas han sido temporales y eventualmente tienden a romperse (etapa D2 del modelo de Forbes *et al.* (1995)), ya que están fuertemente amenazadas por eventos de inundación asociados a tormentas de olas y son muy vulnerables debido a su forma delgada y baja, para finalmente migrar en favor de la deriva litoral provocando serios problemas para las construcciones desarrolladas allí (Anfuso *et al.*, 2015; Reyes-Salazar y Ramírez, 2023). Raasveldt y Tomic (1958) afirman que "esta región en la inmediata vecindad de la desembocadura del río Magdalena nos permite dirigir una mirada al laboratorio de la naturaleza, que sin fatiga crea siempre nuevas formas y las destruye apenas terminadas como si ya estuviera aburrida de ellas, sustituyéndolas por otras de diferente aspecto". Anaya-Vásquez (2022) hace una predicción de un aumento en la longitud de la espiga de Puerto Velero de 1485 m, desde el año 2021 hasta el 2030, y el ancho menor de 193 m acorde con los aumentos y disminución de áreas debido a la acreción en la espiga y erosión en Puerto Colombia, presentados por Reyes-Salazar y Ramírez (2023) para el 2031 y 2041.

Conclusiones

El área adyacente a la desembocadura del río Magdalena ha experimentado cambios significativos a lo largo del tiempo que se han registrado a través de la cartografía histórica y las imágenes satelitales. Se tienen mapas desde aproximadamente el año 1600, con anotaciones de la toponimia de brazos, canales, bancos de arena e islas. A partir de 1825 es posible la georreferenciación de estos mapas por medio de rasgos geográficos reconocibles que muestran el cambio de posición y forma de las islas Verde y Sabanilla durante las etapas de establecimiento (D1), rompimiento (D2) y encallamiento (D3-S4), ocurrido hasta 1985. Es decir, estos cuerpos de arena migraron hacia el suroeste en favor de la deriva litoral, con una posterior fragmentación hasta llegar a las orillas de donde hoy en día está Puerto Colombia. El encallamiento permite un aumento en la superficie areal de la ciénaga de Balboa, entre 1973 y 1985, que alcanza un máximo de 281,5 ha. Muchos autores conciben la construcción del tajamar de Bocas de Ceniza como un factor que aceleró el proceso de desaparición de estos cuerpos de arena debido al déficit de sedimentos causado. A su vez, la migración de sedimentos produjo movimientos en la línea de costa entre la Punta Morro Hermoso, Cabo Barro y Playa Mendoza (Z5), hasta su posterior estabilización cerca del 2010.

A partir de 1985 se establece una etapa de inicio (D0), que es analizada dentro del periodo del presente estudio (1973-2024). Los sedimentos encallados en Puerto Colombia (Z2) continúan su migración en favor de la deriva litoral, lo que da como resultado una tasa alta de erosión (WLRmín = –27 m/año), provoca un retroceso de la línea de costa de 1156,6 m y una disminución de la ciénaga de Balboa de aproximadamente el 75 % del área calculada para 1985. Las obras de infraestructura construidas en la Z1, diseñadas para evitar la erosión costera, han atrapado sedimentos allí, sin embargo, es posible que hayan acelerado los procesos erosivos en la Z2. El crecimiento de la espiga de Puerto Velero se da con una tasa de +119 m/año (WLR), y en el 2024 tiene una longitud aproximada de 5,3 km. Este crecimiento está relacionado con acreción de sedimentos en la línea de costa en la Z4, con tasas hasta de +31,2 m/año.

Además, esto ha creado una zona con playas protegidas al oleaje, donde la altura de la ola es muy baja y su dirección predominante proviene del oeste-suroeste.

Las espigas son cuerpos de arena temporales que tienden a modificarse y romperse rápidamente. Por tanto, la infraestructura que se realiza allí es muy vulnerable a estos cambios.

Agradecimientos

A las personas que revisaron el manuscrito y contribuyeron a mejorar la redacción y presentación de lo aquí descrito, en especial al profesor Francisco Velandia, por sus sugerencias para fortalecer la estructura del artículo, y a los profesionales de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander, por la revisión ortotipográfica.

Referencias

Anaya-Vásquez, Y. (2022). Evolución morfodinámica en el sector costero Santa Verónica - Salgar (Atlántico) en el periodo 1985-2000 y prospectivas a mediano plazo (2030). Tesis, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia.

Anfuso, G.; Rangel-Buitrago, N.; Correa-Arango, I.D. (2015). Evolution of sandspits along the Caribbean Coast of Colombia: natural and human influences. In: G. Randazzo, D. Jackson, J. Cooper (eds.). *Sand and Gravel Spits* (pp. 1-19). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13716-2_1

Bird, E. (2019). Coastline changes. In: C.W. Finkl, C. Makowski (eds.). *Encyclopedia of Coastal Science* (pp. 612-620). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93806-6_93

Boak, E.H.; Turner, I.L. (2005). Shoreline definition and detection: A review. *Journal of Coastal Research*, *21*(4), 688-703. https://doi.org/10.2112/03-0071.1

Bolívar, M.; Rivillas-Ospina, G.; Fuentes, W.; Guzmán, A.; Otero, L.; Ruiz, G.; Silva, R.; Mendoza, E.; Maza, M.; García, L.; Berrío, Y. (2019). Anthropic impact assessment of coastal ecosystems in the municipality of Puerto Colombia, NE Colombia. *Journal of Coastal Research*, *92*(Special Issue 1), 112-120. https://doi.org/10.2112/SI92-013.1

Bordine, B.W. (1974). Neogene biostratigraphy and paleoenvironments, Lower Magdalena Basin, Colombia. PhD Thesis, Louisiana State University, USA.

Burningham, H.; Fernandez-Nunez, M. (2020). Shoreline change analysis. In: D.W.T. Jackson, A.D. Short (eds.). *Sandy Beach Morphodynamics* (pp. 439-460). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102927-5.00019-9

Carter, R.W.G.; Woodroffe, C.D. (1995). *Coastal evolution: late Quaternary shoreline morphodynamics*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511564420

Cifuentes-Ossa, M.A.; Rosero-Henao, L.V.; Josephraj-Selvaraj, J. (2017). Detección de cambios de la línea costera al norte del Distrito de Buenaventura mediante el uso de sensores remotos. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, *46*(1), 137-152. https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2017.46.1.719

Crowell, M.; Leatherman, S.P.; Buckley, M.K. (1993). Shoreline change rate analysis: Long term versus short term data. *Shore & Beach, 61*(2), 13-20.

Del Río, L.; Gracia, F.J.; Benavente, J. (2013). Shoreline change patterns in sandy coasts. A case study in SW Spain. *Geomorphology*, *196*, 252-266. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.07.027

Dugand, A. (1947). Aves del departamento del Atlántico, Colombia. *Caldasia*, *4*(20), 499-648.

Ferrucho-Maloof, I.E.; Otero-Díaz, L.J.; Cueto-Fonseca, J.E. (2022). Cambios recientes de la línea de costa entre Bocas de Ceniza y Puerto Velero (Atlántico, Colombia). *Boletín de Geología*, *44*(3), 159-178. https://doi.org/10.18273/revbol.v44n3-2022007

Flórez, A.; Robertson, K. (2001). Morfodinámica del litoral caribe y amenazas naturales. *Cuadernos de Geografía*, *10*(1), 1-35.

Forbes, D.; Taylor, R.; Shaw, J.; Carter, R.; Orford, J. (1990). Development and stability of barriear beaches on the Atlantic coast of Nova Scotia. *Canadian Coastal Conference*. Kingston, Canada.

Forbes, D.; Orford, J.; Carter, R.; Shaw, J.; Jennings, S. (1995). Morphodynamic evolution, self-organisation, and instability of coarse-clastic barriers on paraglacial

coasts. *Marine Geology*, *126*(1-4), 63-85. https://doi.org/10.1016/0025-3227(95)00066-8

Fuentes-Delgado, J.E. (2022). La desaparición de las islas: cambios ambientales en el delta del río Magdalena desde la cartografía histórica. *Historia y Espacio*, *18*(58), 159-192. https://doi.org/10.25100/hye.v18i58.11446

García-Laiton, L. (2021). Clima marítimo, procesos de erosión/acreción y amenazas/vulnerabilidades por erosión: Caso de estudio de la Barrera costera de Puerto Velero, Departamento del Atlántico. Tesis de Maestría, Universidad del Norte, Colombia.

Himmelstoss, E.A.; Henderson, R.E.; Kratzmann, M.G.; Farris, A.S. (2018). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide. U.S. Geological Survey Open-File Report 2018-1179. https://doi.org/10.3133/ofr20181179

Kolla, V.; Buffler, R.; Ladd, J. (1984). Seismic stratigraphy and sedimentation of Magdalena Fan, Southern Colombian Basin, Caribbean Sea. *AAPG Bulletin*, *68*(3), 316-332. https://doi.org/10.1306/AD460A1C-16F7-11D7-8645000102C1865D

Link, T. (1927). Post-Terciary strand-line oscillations in the Caribbean coastal area of Colombia, South America. *The Journal of Geology*, *35*(1), 58-72.

Markham, B.L.; Storey, J.C.; Williams, D.L.; Irons, J.R. (2004). Landsat sensor performance: History and current status. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *42*(12), 2691-2694. https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.840720

Martínez, J. (1993). Geomorfología y amenazas geológicas de la línea de costa del Caribe Central colombiano: sector Cartagena - Bocas de Ceniza. *Publicaciones Geológicas Especiales del Ingeominas*, *19*, 1-62.

Martinez, J.O.; Pilkey, O.H.; Neal, W.J. (1990). Rapid formation of large coastal sand bodies after emplacement of Magdalena river jetties, northern Colombia. *Environmental Geology and Water Sciences*, *16*(3), 187-194. https://doi.org/10.1007/BF01706043

McFeeters, S.K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, *17*(7), 1425-1432. https://doi.org/10.1080/01431169608948714

Molina, L.; Pérez, F.; Martínez, J.; Franco, J.V.; Marín, L.; González, J.L.; Carvajal, J.H. (1998). Geomorfología y aspectos erosivos del litoral caribe colombiano. Publicaciones Geológicas Especiales del INGEOMINAS, 21, 114.

Molina, A.; Molina, C.; Thomas, Y.F.; Molina, L. E. (2001). Comportamiento de la línea de costa del caribe colombiano. Sector entre Barranquilla, desde Bocas de Ceniza hasta la Flecha de Galerazamba 1935-1996. *Boletín Científico CIOH*, *19*, 68-79. https://doi.org/10.26640/22159045.101

Natesan, U.; Parthasarathy, A.; Vishnunath, R.; Kumar, G.E.J.; Ferrer, V.A. (2015). Monitoring longterm shoreline changes along Tamil Nadu, India using geospatial techniques. *Aquatic Procedia*, *4*, 325-332. https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.044

Núñez-Cabarcas, H.A. (2003). La desaparición de Isla Verde. Un desastre ecológico del siglo XX en el caribe colombiano. *Huellas*, *69-70*, 27-33.

Orford, J.D.; Carter, R.W.G.; Forbes, D.L. (1991). Gravel barrier migration and sea level rise: Some observations from Story Head, Nova Scotia, Canada. *Journal of Coastal Research*, *7*(2), 477-488.

Ortiz, J.C.; Salcedo, B.; Otero, L.J. (2014). Investigating the collapse of the Puerto Colombia Pier (Colombian Caribbean Coast) in March 2009: Methodology for the reconstruction of extreme events and the evaluation of their impact on the coastal infrastructure. *Journal of Coastal Research*, *30*(2), 291-300. https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-12-00062.1

Ortiz-Royero, J.C. (2007). Huracanes y tormentas tropicales en el Mar Caribe colombiano desde 1900. *Boletín Científico CIOH*, *25*, 54-60. https://doi.org/10.26640/01200542.25.54_60

Ortiz-Royero, J.C.; Otero, L.J.; Restrepo, J.C.; Ruiz, J.; Cadena, M. (2013). Cold fronts in the Colombian Caribbean Sea and their relationship to extreme wave events. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *13*(11), 2797-2804. https://doi.org/10.5194/nhess-13-2797-2013

Osorio, A.F.; Mesa, J.C.; Bernal, G.R.; Montoya, R.D. (2009). Reconstrucción de cuarenta años de datos de oleaje en el mar Caribe colombiano empleando el modelo WWIII™ y diferentes fuentes de datos. *Boletín Científico CIOH*, *27*, 37-56. https://doi.org/10.26640/01200542.27.37_56

Otvos, E.G. (2012). Coastal barriers - Nomenclature, processes, and classification issues. *Geomorphology*, *139-140*, 39-52. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.10.037

Oyedotun, T.D.T. (2014). Shoreline geometry: DSAS as a tool for historical trend analysis. In: A. Goudie (ed.). *Geomorphological Techniques* (pp. 1-12). Cambridge University Press.

Pajak, M.; Leatherman, S. (2002). The high water line as shoreline indicator. *Journal of Coastal Research*, *18*(2), 329-337.

Phiri, D.; Simwanda, M.; Salekin, S.; Nyirenda, V.R.; Murayama, Y.; Ranagalage, M. (2020). Sentinel-2 data for land cover/use mapping: A review. *Remote Sensing*, *12*(14). https://doi.org/10.3390/rs12142291

Qiao, G.; Mi, H.; Wang, W.; Tong, X.; Li, Z.; Li, T.; Liu, S.; Hong, Y. (2018). 55-year (1960–2015) spatiotemporal shoreline change analysis using historical DISP and Landsat time series data in Shanghai. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *68*, 238-251. https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.02.009

Raasveldt, H.; Tomic, A. (1958). Lagunas colombianas. Contribución a la geomorfología de la costa del mar Caribe con algunas observaciones sobre las Bocas de Ceniza. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, *10*(40), 175-198.

Rangel-Buitrago, N.G.; Anfuso, G. (2009). Assessment of coastal vulnerability in La Guajira Peninsula, Colombian Caribbean Sea. *Journal of Coastal Research*, *56*, 792-796.

Rangel-Buitrago, N.G.; Anfuso, G.; Williams, A.T. (2015). Coastal erosion along the Caribbean coast of Colombia: Magnitudes, causes and management. *Ocean and Coastal Management*, *114*, 129-144. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.06.024

Rangel-Buitrago, N.; Williams, A.T.; Anfuso, G. (2018). Hard protection structures as a principal coastal erosion management strategy along the Caribbean coast of Colombia. A chronicle of pitfalls. *Ocean and Coastal Management*, *156*, 58-75. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.04.006

Reyes-Salazar, F.J.; Ramírez, H.M. (2023). Evaluation of coastal erosion in the jurisdiction of the municipalities of Puerto Colombia and Tubará, Atlántico, Colombia in Google Earth Engine with Landsat and Sentinel 2 images. *International Journal of Geological and Environmental Engineering*, *17*(10), 128-146.

Ricaurte-Villota, C.; Coca-Domínguez, O.; Bejarano-Espinosa, M.; Morales, D.; Correa-Rojas, C.; Briceño-Zuluaga, F.; Legarda, G.; Aretaga, M. (2018). *Amenaza y vulnerabilidad por erosión costera en Colombia: enfoque regional para la gestión del riesgo*. INVEMAR, 33.

Ruge, G.; Gómez, J.; Castilblanco, C. (2010). Evaluación morfodinámica de la línea de costa entre los sectores de Bocatocino (departamento de Atlántico) y Ciénaga (departamento del Magdalena). Proyecto GEO-0902. INGEOMINAS.

Sánchez-Moreno, H.; Bolívar-Anillo, H.J.; Villate-Daza, D.A.; Escobar-Olaya, G.; Anfuso, G. (2019). Influencia de los impactos antrópicos sobre la evolución del bosque de manglar en Puerto Colombia (Mar Caribe colombiano). *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, *15*(1), 1-16.

Santos, C.A.G.; Nascimento, T.V.M. do; Mishra, M.; Silva, R.M. da. (2021). Analysis of long- and short-term shoreline change dynamics: A study case of João Pessoa city in Brazil. *Science of the Total Environment*, *769*, 144889. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144889

Scott, D.B. (2005). Coastal changes, rapid. In: M.L. Schwartz (ed.). *Encyclopedia of Coastal Science* (pp. 253-255). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/1-4020-3880-1_76

Thieler, R.; Himmelstoss, E.; Miller, T. (2005). *User Guide y Tutorial for the Digital Shoreline Analysis System (DSAD) version 3.2. Extension for ArcGIS v.9.0*. USGS.

Thom, B.G.; Cowell, P.J. (2005). Coastal changes, gradual. In: M.L. Schwartz (ed.). *Encyclopedia of Coastal Science* (pp. 251-253). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/1-4020-3880-1_75

Valentin, H. (1952). Die Küsten der Erde. Petermanns Geogr. Mitteilungen.

Vargas-Cuervo, G. (2012). Procesos de erosión y sedimentación costera entre Bocas de Ceniza y Puerto Colombia, Colombia. *XX Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrogeología*. Barranquilla, Colombia.

Vernette, G.; Correa, I.D.; Bernal, G. (2012). *Introducción a los cambios del nivel del mar y sus consecuencias sobre la zona costera*. Universidad Nacional de Colombia.

Villate, D.A.; Portz, L.; Manzolli, R.P.; Alcántara-Carrió, J. (2020). Human disturbances of shoreline morphodynamics and dune ecosystem at the Puerto Velero spit (Colombian Caribbean). *Journal of Coastal Research*, *95*, 711-716. https://doi.org/10.2112/SI95-138.1

Wright, L.D.; Thom, B. G. (1977). Coastal depositional landforms: A morphodynamic approach. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, *1*(3), 412-459. https://doi.org/10.1177/030913337700100302

Fecha de recibido: 04 de junio de 2024
Fecha de aceptado: 25 de marzo de 2025