

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Impacto de estructuras hidráulicas (tajamares) en la dinámica costera. Caso de estudio: desembocadura del río Magdalena, Colombia

Impact of fluvial hydraulic structures (jetties) on coastal dynamics. Case of study: mouth of Magdalena River, Colombia

DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2025.652>

Fecha de recepción: 2024-10-30 / Fecha de evaluación: 2025-08-29 / Fecha de aceptación: 2025-10-08

Ricardo José Molares Babra¹

Molares Babra, R. J. (2025). Impacto de estructuras hidráulicas (tajamares) en la dinámica costera. Caso de estudio: desembocadura del río Magdalena, Colombia. *Boletín Científico CIOH*, 44(2), 43-60. <https://doi.org/10.26640/22159045.2025.652>.

RESUMEN

Este estudio analiza los procesos de erosión costera en el delta del río Magdalena, tomando como base el análisis de imágenes satelitales y fotografías aéreas de los últimos 30 años. Se evidencia que la construcción de los espolones de Bocas de Ceniza en 1935 ha sido un factor clave en los procesos de erosión al oeste del río. A partir de imágenes satelitales y cartas náuticas de la época se documentan la evolución y los cambios en la costa del delta del río Magdalena, así como en sus principales formas costeras (ciénaga de Mallorquín, flecha de isla Verde y flecha de Puerto Velero). Los resultados muestran que entre 1935 y 2022, al este de los tajamares, la acreción ha sido limitada (+387 ha) debido a la extensión de las estructuras costeras, mientras que la erosión ha afectado una zona más al este (+1600 ha). Al oeste de los tajamares la erosión ha sido aún más marcada (-3336 ha), provocando un retroceso de la línea de costa a lo largo de 24.6 km desde la desembocadura del río y causando la desaparición de isla Verde. Este cambio en la morfología de la costa y del fondo marino permitió la sedimentación y formación de la flecha de Puerto Velero (+374 ha), que continúa en crecimiento, aunque se observa erosión (-163 ha) a sotavento de esta. La aplicación de la ecuación parabólica de Hsu indica que la línea de costa de la barra de Mallorquín ha alcanzado un estado de equilibrio estático, sugiriendo un transporte neto de sedimentos prácticamente nulo y una disminución en el suministro de sedimentos hacia el oeste. Esto podría incrementar la vulnerabilidad de la flecha de Puerto Velero a la erosión, ya que su crecimiento aún depende de los sedimentos provenientes del noreste. Así, la estabilidad de la barra de Mallorquín podría afectar la futura evolución de esta flecha costera. El análisis histórico también confirma la presencia de densos ecosistemas de manglar en el área antes de las obras de encauzamiento en la desembocadura del río Magdalena. Sin embargo, esta protección natural no fue suficiente para evitar la pérdida de 2566 ha, lo que sugiere que los manglares dejan de proporcionar una defensa efectiva contra la erosión costera cuando su capacidad de retención de sedimentos disminuye debido a la interrupción de su suministro. En contraste, la formación y crecimiento de la flecha de Puerto Velero no se vieron obstaculizados por la ausencia de estos ecosistemas, alcanzando un área de 374 ha con un avance de aproximadamente 141 m/año. En conclusión, los manglares representan una solución basada en la naturaleza para la protección costera que solo será efectiva si se restituye el suministro de sedimentos.

PALABRAS CLAVES: erosión costera, transporte de sedimentos, mangle, sedimentación deltaica.

¹ Orcid: 0000-0003-3384-1618. Universidad de la Costa. Programa de Doctorado en Desarrollo Sostenible. Correo electrónico: ricardomolares@yahoo.com

ABSTRACT

This study analyses coastal erosion processes in Magdalena River delta, based on the analysis of satellite images and aerial photographs from the last 30 years. Evidence suggests that the Bocas de Ceniza jetties construction in 1935 has been a key factor in the coastal erosion processes to the west of the river. Using satellite images and nautical charts, the evolution and changes in the coast of the Magdalena River delta, as well as its main coastal landforms (Mallorquín swamp, Verde Island spit, and Puerto Velero spit), are documented. Results show that between 1935 and 2022, accretion has been limited (+387 ha) by the extension of the coastal structures, to the east of the jetties, while erosion has affected an area further east (+1600 ha). Erosion has been even more pronounced (-3336 ha) to the west of the jetties, retreating a 24.6 km of the coastline from the river mouth and the disappearance of Verde Island. This change, in the coast morphology and seabed, allowed sedimentation and formation of the Puerto Velero spit (+374 ha), which continues to grow, although erosion (-163 ha) is observed leeward. The application of Hsu's parabolic equation indicates that the Mallorquín bar coastline has reached a state of static equilibrium, suggesting nearly zero net sediment transport and a sediment supply decrease to the west. This could increase the vulnerability of the Puerto Velero spit to erosion, since its growth still depends on sediment from the northeast. Thus, the Mallorquín bar stability could affect the future evolution of this coastal spit. Historical analysis also confirms the presence of dense mangrove ecosystems in the area before the channelling works at the Magdalena River mouth. However, this natural protection was insufficient to prevent the loss of 2,566 ha, suggesting that mangroves cease to provide effective coastal protection when their sediment retention capacity decreases due to interrupted sediment supply. In contrast, the formation and growth of the Puerto Velero spit were not hindered by the absence of these ecosystems, reaching an area of 374 ha with a growth rate of approximately 141 m/year. In conclusion, mangroves represent a nature-based solution for coastal protection that will only be effective if the sediment supply is restored.

KEYWORDS: Coastal erosion, sediment transport, mangroves, deltaic sedimentation.

INTRODUCCIÓN

El análisis global de las líneas de costa, basado en imágenes satelitales entre 1984 y 2016, revela que el 24 % de las playas arenosas está sufriendo erosión a tasas superiores a 0, m/año, mientras que el 28 % muestran acreción y el 48 % permanecen estables (Luijendijk *et al.*, 2018). A este fenómeno se suman las crecientes demandas del comercio mundial y del transporte multimodal, que han impulsado la construcción de tajamares en las desembocaduras de ríos para reducir la sedimentación en los canales de acceso marítimo. Estas estructuras, si bien logran mantener la navegabilidad, generan asimetrías en el balance sedimentario: provocan acumulación de sedimentos en la zona de barlovento y déficit en sotavento, ya que los sedimentos fluviales son arrastrados hacia aguas profundas (Komar, 1996).

Este problema es global y ha sido documentado en diversas desembocaduras y deltas tales como:

río Sheyang, China (Wang *et al.*, 2022); ensenadas en St. Lucie, Ocean City y las líneas costeras de Long Island, Nueva Jersey, Delmarva y Carolina del Sur en Estados Unidos han sido afectadas por tajamares (Galgano, 2009); estuario de Shiribetsu (Japón), estuario de Guadiana (España), estuario de Duero (Portugal), estuario de Patos (Brasil) (Franzen *et al.*, 2023); río Tweed (Australia) y río Nerang (India) (Boswood y Murray, 2001).

El cambio climático, en particular el aumento del nivel del mar, complica aún más la dinámica costera. Aunque la magnitud de este aumento es incierta, el último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) proyecta que el nivel del mar podría elevarse entre 0.28 y 1.01 metros para el año 2100, dependiendo de los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (Calvin *et al.*, 2023). Este incremento afectará las costas no protegidas, acelerando su retroceso.

Sin embargo, las fuerzas que impulsan la erosión costera son complejas y específicas de cada región. Además, del aumento eustático del nivel del mar, factores locales como el hundimiento del terreno, la compactación y las interferencias humanas, como la construcción de represas, influyen en la disponibilidad de sedimentos. Estos factores, combinados con las corrientes de deriva litoral y la intervención humana mediante estructuras como espolones y tajamares, interrumpen los flujos sedimentarios y exacerban los problemas de erosión.

En Colombia, la erosión costera afecta la región del Caribe. Un diagnóstico nacional reciente indica que 522 km de la costa Caribe, aproximadamente un tercio de su longitud, están impactados por la erosión (Posada Posada & Henao Pineda, 2008). En el departamento del Atlántico, el 55 % del litoral presenta niveles de amenaza alta y media, con sectores particularmente vulnerables como Astilleros y Bocatocino (Ricaurte-Villota *et al.*, 2018).

La construcción de los tajamares en Bocas de Ceniza, en la desembocadura del río Magdalena (Colombia), ha sido identificada como una de las principales causas del retroceso de la costa en la región, desde 1936. Este retroceso ha provocado la desaparición de isla Verde, la erosión de las playas de Puerto Colombia y de la barra de la ciénaga de Mallorquín, así como la formación de la flecha de Puerto Velero, alterando la morfología costera (Alvarado, 2005; Correa *et al.*, 2005; Koopmans, 1971; Martínez *et al.*, 1990; Molina *et al.*, 2001; Nuñez, 2004; Orejarena *et al.*, 2015; Rivillas-Ospina *et al.*, 2017; Restrepo y López, 2008, Andrade, 2023; Villate *et al.*, 2020) en el que variaciones interanuales de la descarga tienen una gran influencia (Ávila y Gallo, 2021; Higgins *et al.*, 2016; Restrepo *et al.*, 2017). Estos estudios, aunque en muchos casos cuantifican el retroceso de la línea de costa, lo hacen en sectores específicos de la costa y no calculan las áreas erosionadas (o sedimentadas), de tal forma que no es evidente el impacto en el delta del Magdalena; en muchos casos no consideran líneas de costa inmediatamente anteriores a la fecha de construcción de los tajamares de Bocas de Ceniza.

Aunque estas obras cumplieron con su objetivo original de evitar la sedimentación en el puerto de Barranquilla, su impacto en el

equilibrio sedimentario ha sido significativo, desprotegiendo zonas costeras y fomentando procesos erosivos (Andrade, 2023). En respuesta, se han implementado medidas de protección costera como espolones y rompeolas. Sin embargo, estas estructuras, aunque mitiguen el retroceso en ciertos sectores, no son sostenibles a largo plazo, especialmente frente al aumento del nivel del mar.

Las políticas ambientales nacionales y locales reconocen el problema de la erosión, pero las estrategias de mitigación se centran en la reducción de emisiones de GEI y en la protección de ecosistemas. Estas medidas, aunque importantes, son insuficientes y no abordan las causas profundas, como la interrupción del transporte litoral, que es clave para el mantenimiento de la línea de costa.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se centra en el sistema deltaico y turbidítico del río Magdalena en plena costa caribeña colombiana. Con una cuenca de drenaje de 2.57×10^5 km², el río Magdalena entrega el 26 % del agua dulce total (205 km³/año) y el 38 % de la carga de sedimentos (144 X 106 ton/año). El río Magdalena es considerado uno de los ríos con mayor descarga de sedimentos y agua dulce al océano del mundo (Restrepo y Kjerfve, 2000).

El río Magdalena crea un delta dominado por el río y el oleaje, en forma de arco con una superficie aproximada de 1690 km² (Higgins *et al.*, 2016; J. C. Restrepo *et al.*, 2016). El delta tiene un canal de descarga principal (Bocas de Ceniza), una descarga distributiva importante en la bahía de Cartagena (Canal del Dique) y una compleja red de conexiones menores con la ciénaga Grande de Santa Marta (Restrepo *et al.*, 2016). Bocas de Ceniza está alineada con un cañón submarino empinado, el cañón del Magdalena. La morfología y arquitectura de este cañón está relacionada con el aporte sedimentario del río Magdalena (Ercilla *et al.*, 2002; Romero-Otero *et al.*, 2015; Vernet *et al.*, 1992). Los sedimentos depositados en el cañón alimentan un sistema turbidítico mediante procesos de deslizamientos y corrientes de turbidez, desencadenados por eventos sísmicos (Ercilla *et al.*, 2002; Kolla y Buffler, 1983; Restrepo, 2014; Romero-Otero *et al.*, 2015).

Para el estudio se consideraron accidentes geográficos específicos asociados al delta del río Magdalena. La ciénaga de Mallorquín es un elemento central de la investigación. Por otro lado, se consideró isla Verde, por su completa desaparición y la flecha de Puerto Velero, por su

aparición y crecimiento permanente durante los últimos 40 años. La costa al este de los tajamares de Bocas de Ceniza es de interés debido al proceso de sedimentación resultante de la construcción de las obras hidráulicas en la desembocadura del río Magdalena (Fig. 1).



Figura 1. Área de estudio. Isla Verde se resalta en rojo, debido a su desaparición después de 1935.

Ecosistemas marino-costeros

La línea costera del delta del río Magdalena se enmarca en la Unidad Ambiental Costera (UAC) del río Magdalena, Complejo Canal del Dique – Sistema Lagunar de la Ciénaga Grande de Santa Marta, la cual se extiende desde la desembocadura del río Córdoba (departamento del Magdalena) hasta punta Comisario (departamento de Sucre). Incluye la isla Tierra Bomba, isla Barú y el archipiélago de Nuestra Señora del Rosario (MADS, 2013), cubriendo la línea costera de los departamentos del Magdalena a partir de la población de Ciénaga, y de los departamentos del Atlántico, Bolívar y Sucre.

Considerando características hidrológicas, ecosistémicas y geográficas de la UAC, esta se puede dividir varios sectores, donde se destacan dos que cubren el área de interés para el proyecto así:

- **Desembocadura río Córdoba – desembocadura río Magdalena.** En este sector, el bosque de manglar se ha ido recuperando por la ejecución de trabajos

hidráulicos en el complejo lagunar de la ciénaga Grande de Santa Marta en los años 90 y 2000, lo que incrementa la resiliencia de la línea de costa, aunque se sigue experimentando un déficit en el suministro de sedimentos, lo que origina procesos de erosión costera que ponen en riesgo infraestructura vial (por ejemplo, en el KM 19).

- **Desembocadura del río Magdalena – Punta Canoas.** Este sector carece de ecosistemas de manglar ya que en su mayoría ha desaparecido por la erosión. Tampoco existen pastos marinos o arrecifes de coral que podrían reducir la energía del oleaje y mitigar procesos de erosión. Por otra parte, existen dunas que aumentan la resiliencia costera ante eventos erosivos, producto de marejadas y tormentas; sin embargo, el sistema de dunas está experimentando un proceso de invasión de plantas que pone en peligro las especies nativas que recubren las dunas, lo que consecuentemente pone en riesgo estas estructuras costeras.

El caso de isla Verde es particularmente interesante, ya que, aunque estaba poblada

por ecosistemas de manglar, estos no fueron suficientes para protegerla del déficit sedimentario causado por la construcción de los tajamares de Bocas de Ceniza, lo que llevó a su desaparición. Según documentos de la época, en 1744 la isla consistía en extensos manglares anegadizos (Núñez, 2004).

La isla, por estar próxima a las Bocas de Ceniza, estaba cubierta de vastos y tupidos manglares que bordeaban varios caños laterales, como el Brazo de la Culebra y el Caño de la Piña; se destacaban varias especies de manglares como el mangle colorado (*Rhizophora mangle*), el mangle salado (*Avicennia nitida*), *Laguncularia racemosa*; en la parte de formación arenosa existían especies tales como el manzanillo (*Hippomane mancinella*), el cual era muy tóxico. Su extensa vegetación la complementaban montes espinosos que alcanzaban una altura promedio de 3 a 5 m, además vegetación de plantas halófilas, como *Batis maritima* y *Sesuvium portulacastrum* (Núñez, 2004).

Este tipo de ecosistema propio de las ensenadas y lagunas tropicales estaba además constituido por matorrales que se dispersaban de una manera extensiva. En 1947,

Los manglares hoy han desaparecido casi por completo y solo quedan en esos parajes millares de troncos escuetos, con vestigios de la vegetación primitiva. La causa de esta alteración ecológica es, al parecer, atribuible a la obra indirecta del hombre; en efecto, la construcción del dique de piedra, que se extiende por toda la orilla del río Magdalena desde muy cerca de Las Flores hasta rematar en el malecón o tajamar occidental de las Bocas, cerró por completo el paso de las aguas hacia los esteros. (Citado por Núñez, 2004).

En la flecha de Puerto Velero, al ser una formación joven, las principales especies de vegetación que dominan este ambiente eólico son *Sesuvium portulacastrum*, *Ipomoea pes-caprae*, *Cyperus ligularis* y *Calotropis procera*. Además, en la costa y en la zona posterior se observa una significativa acumulación de troncos transportados por la deriva litoral desde el río Magdalena. Estos troncos han facilitado la retención de sedimentos, favoreciendo la colonización de las especies predominantes en este sector, especialmente

Sesuvium portulacastrum e *Ipomoea pes-caprae*. En sectores más elevados, además de las dos especies anteriores, se puede encontrar la especie *Cyperus ligularis*, la cual se presenta en la base de formaciones de dunas (Villate *et al.*, 2020).

METODOLOGÍA

Para determinar el impacto de la ubicación de los tajamares de Bocas de Ceniza en la dinámica costera del delta del río Magdalena, se digitalizaron los litorales de imágenes satelitales de diferentes años, descargadas de Google Earth. Considerando las limitaciones temporales de las imágenes en relación con la fecha de construcción de los tajamares (1935), se utilizó la carta náutica Puerto Colombia – Santa Marta 5688 (ed. 1938). El levantamiento hidrográfico para esta carta se realizó a bordo del USS Nokomis entre 1935 y 1936, lo que se convirtió en la base para los cálculos, considerando que la finalización de la construcción de los tajamares fue para esa fecha, aunque hubo otras obras posteriores.

Evaluación de la evolución del litoral en la zona del delta del río Magdalena

Se emplearon imágenes satelitales y cartografía náutica para evaluar la morfología y morfodinámica costera en las inmediaciones de la desembocadura del río Magdalena (Tabla 1). Las imágenes satelitales fueron descargadas utilizando Google Earth a una escala aproximada de 1:40000, georreferenciadas y digitalizadas con el software Surfer. La cartografía náutica empleada corresponde a la carta 5688, con una escala de 1:80000.

El análisis de la evolución temporal y espacial de la línea de costa se realizó comparando su posición en diferentes momentos antes y después de la construcción de los tajamares de Bocas de Ceniza (1935), tomando como referencia el periodo 1935-2021, subdividido en ventanas temporales determinadas por la disponibilidad de imágenes (Bombino *et al.*, 2022). Para el caso de la flecha de Puerto Velero, cuyo origen es posterior a 1935, se consideró el periodo de 1986 a 2021.

La digitalización de la línea de costa, basada en fotointerpretación, permitió identificar y extraer esta línea de las diferentes imágenes disponibles. Debido a la variabilidad en las

condiciones oceanográficas y las fuentes de información (cartografía e imágenes satelitales), se eligió como referencia la línea de separación

entre las áreas húmedas y secas (Boak y Turner, 2005; Bombino *et al.*, 2022), que corresponde a la línea de más alta marea.

Tabla 1. Lista de imágenes y cartografía náutica usada para la digitalización de la línea de costa.

Imágenes / cartografía náutica	Fecha de adquisición / edición
Carta náutica Puerto Colombia-Santa Marta (5688). Ed.: 1938	1935
NASA Skylab Satellite	1973
Google Earth ciénaga de Mallorquín	1985, 2000, 2009, 2021
Google Earth Puerto Velero	1986, 1987, 1988, 1991, 1997, 2000, 2006, 2009, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2021

La evolución de la línea de costa y su variación en el tiempo se evaluó integrando los enfoques metodológicos de Aiello *et al.* (2013), Barbaro *et al.* (2019), Bombino *et al.* (2022). Para el caso de la flecha de Puerto Velero, el análisis abarcó el periodo 1986-2021, mientras que, para otras áreas de interés, se consideró la ventana 1935-2021.

La estimación de áreas costeras erosionadas o sedimentadas se realizó considerando el ancho de costa afectado por los cambios morfológicos observados entre las imágenes. Dado que en la zona de estudio la marea es de tipo micromareal, con un rango de variación de decenas de centímetros (Molares, 2004), se determinó que sus efectos sobre la posición del litoral son insignificantes.

Las imágenes fueron descargadas mediante Google Earth Pro (GEP) para dos áreas de interés (Fig. 2). La selección de estas áreas consideró tanto la cobertura como la disponibilidad de imágenes en el periodo de estudio, además de la facilidad de manejo, ya que el tamaño de cada imagen varió entre 30 y 60 MB, con una resolución de 7218 x 3912 píxeles.

La primera área abarcaba desde el este del tajamar occidental en el departamento del Magdalena hasta la bahía de Sabanilla al oeste del tajamar oriental (36 km de línea de costa). La segunda área, contigua a la primera, incluía la flecha de Puerto Velero, desde el borde oeste de la primera área hasta la ensenada Playa de las Damas al suroeste, cubriendo aproximadamente 20.5 km de línea de costa.

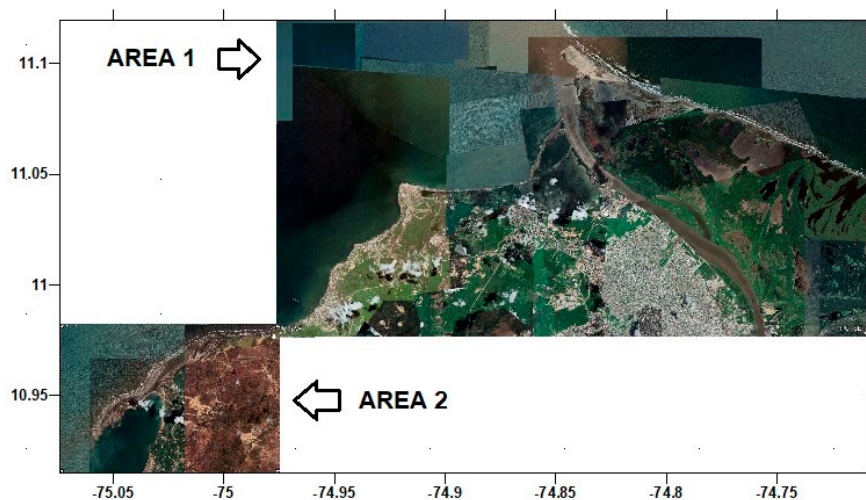


Figura 2. Cubrimiento de las áreas escogidas para la descarga de imágenes desde GEP para el análisis de línea de costa.

Para la georreferenciación, se definieron cuatro puntos de control en los vértices de cada imagen, correspondientes a las áreas previamente definidas (Tabla 2). En el área 1 se descargaron cuatro imágenes con un intervalo

aproximado de diez años entre ellas. En el área 2, debido a la alta dinámica de la flecha de Puerto Velero, se descargaron quince imágenes con intervalos de tiempo variables, dependiendo de su disponibilidad.

Tabla 2. Puntos de control (PC) en las cuatro esquinas de las imágenes para las dos áreas de descarga de imágenes desde Google Earth.

	Área 1		Área 2	
Punto	PC_NW	PC_NE	PC_NW	PC_NE
Lat	11.119639	11.119639	10.982091	10.982091
Long	-74.97755	-74.709157	-75.074066	-74.97499
Punto	PC_SW	PC_SE	PC_SW	PC_SE
Lat	10.976276	10.976276	10.915004	10.915004
Long	-74.97755	-74.709157	-75.074066	-74.97499

La imágenes aéreas y cartografía náutica empleada para el análisis de la línea de costa se relacionan en la Tabla 3.

Una vez obtenidas las imágenes, los puntos de control fueron utilizados para su georreferenciación en Surfer, asegurando que las posiciones de los vértices (latitud y longitud) coincidieran con los puntos previamente definidos.

Tabla 3. Lista de imágenes de satélite y cartografía náutica usadas para la digitalización y cálculos de la dinámica de la línea de costa y erosión costera.

Imágenes / Cartas náuticas	Fecha de adquisición / levantamiento
Carta náutica Puerto Colombia - Santa Marta (5688). Ed.: 1938	1936
Carta náutica del río Magdalena–Puerto de Barranquilla - Servicio Hidrográfico de la Marina Francesa (edición 1938).	1936
NASA Skylab Satellite	1973
GEP imagen ciénaga de Mallorquín	1985, 2000, 2009, 2021
GEP image Puerto Velero	1986, 1987, 1988, 1991, 1997, 2000, 2006, 2009, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2021

Una vez digitalizadas todas las líneas de costa, se superpusieron en pares consecutivos en el tiempo, de acuerdo con la disponibilidad de imágenes satelitales y cartografía náutica. Definidas las áreas de erosión y sedimentación, se

procedió a calcularlas utilizando las herramientas de Surfer. De igual manera, se determinaron las distancias de avance o retroceso de la línea de costa correspondientes al periodo comprendido entre las líneas base (Fig. 3).

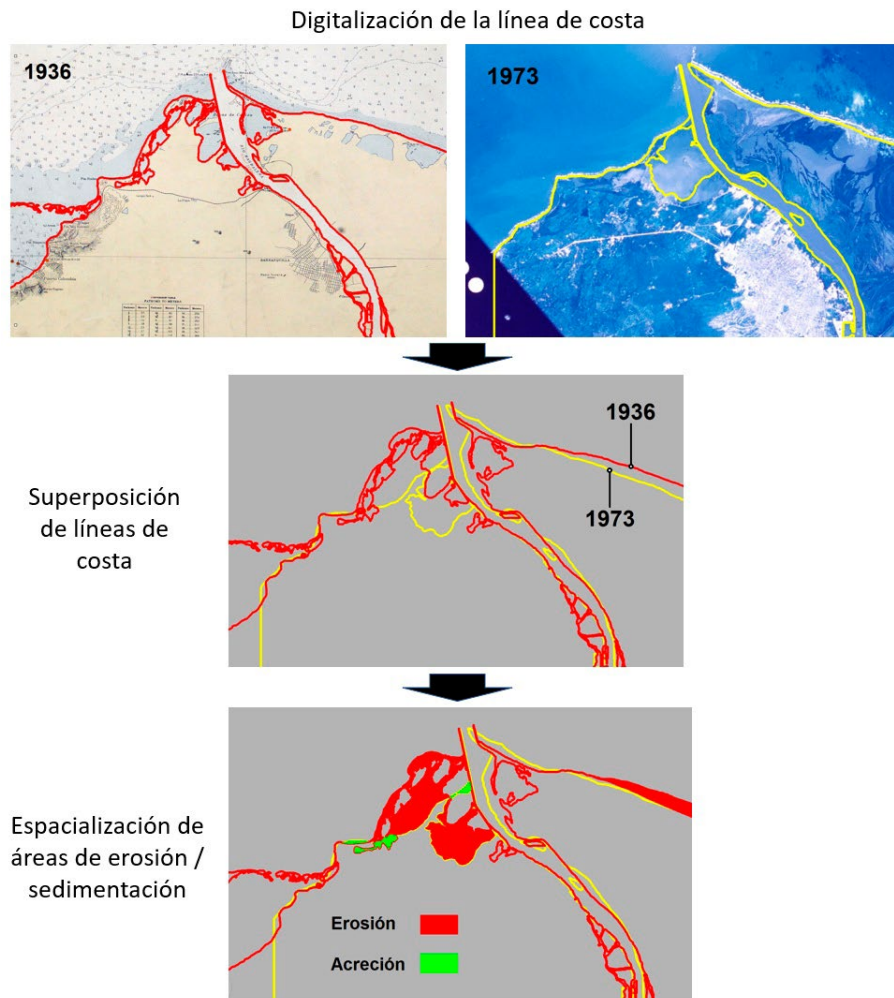


Figura 3. Metodología para la determinación de zonas de erosión y sedimentación en el área de estudio.

Equilibrio morfodinámico

Con el propósito de conocer si la línea de costa alcanzó el equilibrio morfodinámico a barlovento del tajamar occidental, se aplicó el modelo parabólico empírico basado en la ecuación de forma de bahía parabólica (Hsu y Evans, 1989), que define la forma en planta de una playa crenulada en equilibrio estático, en la que un punto P en la costa curva se puede calcular mediante:

$$\frac{R_N}{R_0} = C_0 + C_1 \left(\frac{\beta}{\theta_N} \right) + C_2 \left(\frac{\beta}{\theta_N} \right)^2 \quad [1]$$

En la ecuación 1 los parámetros principales son el ángulo β (ángulo formado por la dirección

de la cresta de la ola y la línea de control, que une el punto de difracción con el punto donde comienza el tramo recto de la playa) y la longitud R_0 (longitud de la línea de control). Se supone que la dirección de las olas es paralela a la sección recta de la playa. Con base en los parámetros de entrada datos, el modelo calcula, para el rango deseado del ángulo θ_N , la longitud correspondiente R_N que genera la forma estable de la playa. Las tres constantes C se obtienen mediante análisis de regresión y dependen de β . En la ecuación los parámetros se utilizan como proporciones (por ejemplo, R_N / R_0 , β / θ_N), lo que permite que el modelo sea adimensional.

Por otra parte, se calcula la razón de indentación (a/R_0), en donde la máxima indentación (o retracción) a es medida normal desde la línea

de control (R0) al punto del mayor retroceso de la línea de costa. La razón de la indentación con respecto a la línea de control (R0) teniendo en cuenta el ángulo β , resulta en un valor el cual en caso de ser menor que el valor crítico indicaría que la línea de costa es inestable y no ha alcanzado la estabilidad morfodinámica (Silvester y Hsu, 1993).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se muestran los principales resultados de la comparación y análisis de las líneas de costa de los diferentes años, considerando las principales

características costeras como son el litoral al este de la desembocadura del río Magdalena y al oeste, destacando la barra de la ciénaga de Mallorquín, isla Verde y la flecha de Puerto Velero.

Barra de Mallorquín

En 1935 se inició un importante proceso de erosión al oeste de la desembocadura del río Magdalena, que provocó la pérdida de 1600 ha entre 1935 y 1973 a un ritmo de 42 ha/año. Hasta la fecha este proceso de erosión continua, aunque ralentizado, con una tasa de erosión promedio de 17 ha/año entre 1973 y 2022 (Fig. 4).

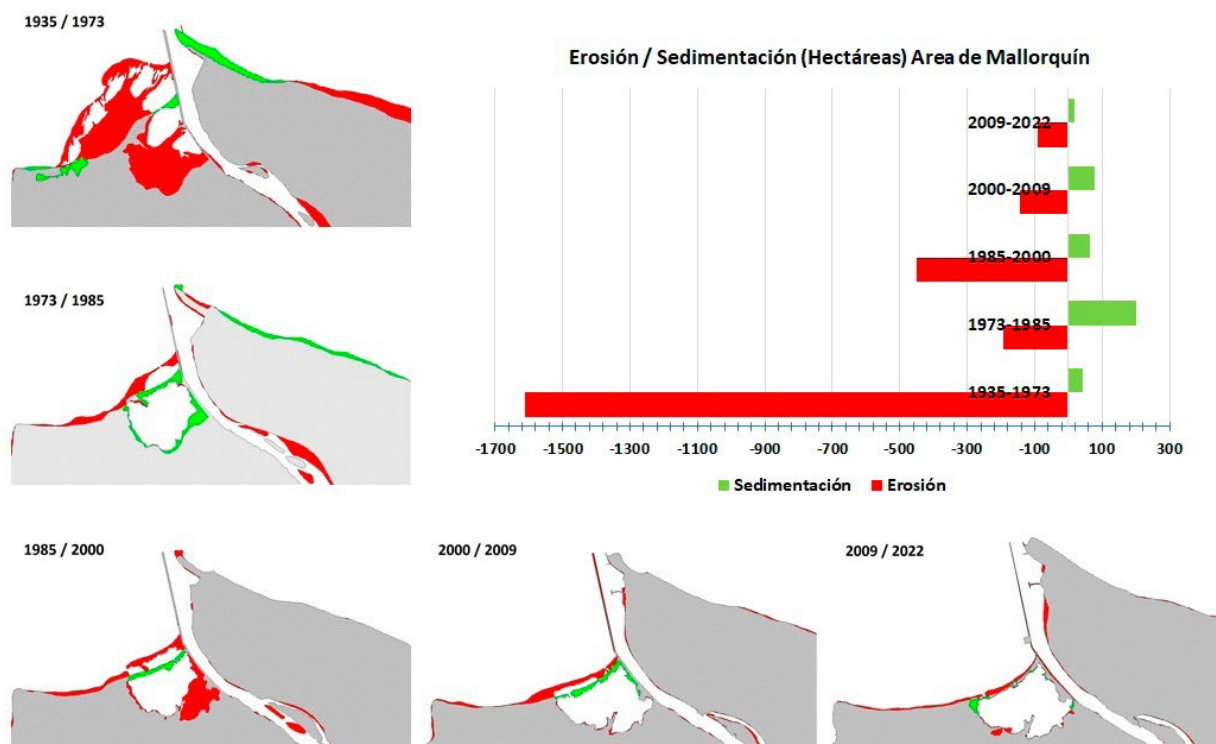


Figura 4. Áreas erosionadas (rojo) y sedimentadas (verde) frente a la ciénaga de Mallorquín durante diferentes periodos de tiempo entre 1935 y 2022.

En cuanto al ritmo de retroceso anual del litoral, este ha sido mayor en el extremo oriental de la barra de Mallorquín con una media anual (1935-2022) de 45 m/año, mientras que en el extremo oeste fue de 5 m/año; sin embargo,

se debe considerar que este proceso se ha ido desacelerando a una tasa de 18 m/año en el caso del transecto 5 (T5). En el resto de la barra los valores de las tasas son más pequeños (Fig. 5; Tabla 4).

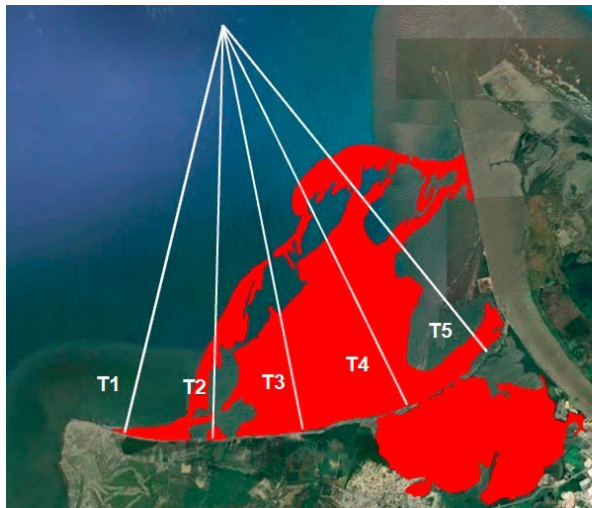


Figura 5. Rata de retroceso de la línea de costa frente a la ciénaga de Mallorcaín a lo largo de cinco transectos y para diferentes lapsos de tiempo, entre 1935 y 2022.

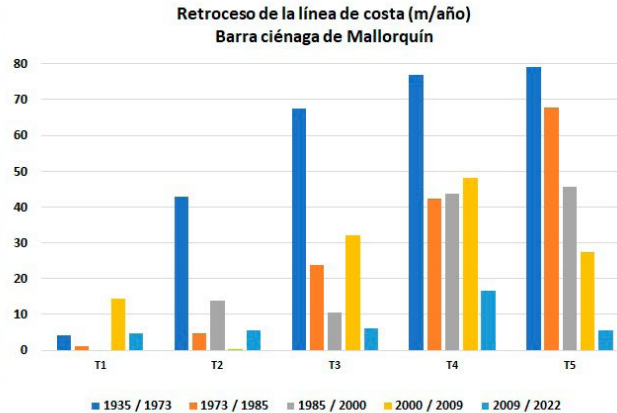


Tabla 4. Rata de retroceso de la línea de costa (m/año) para los periodos y transectos indicados.

Lapso	T1	T2	T3	T4	T5	Promedio
1935-1973	4	43	68	77	79	54
1973-1985	4	15	24	42	68	31
1985-2000	0	14	11	44	46	23
2000-2009	14	0	32	48	27	24
2009-2022	5	6	6	16	6	8
Promedio	5	16	28	46	45	28

El litoral ha ido retrocediendo desde 1935, desde 391 m en el extremo occidental de la barra de la ciénaga (T1) hasta 4.8 km en la zona más próxima al tajamar occidental (T5) (Tabla 5), hasta alcanzar un estado morfodinámico más equilibrado, considerando la ralentización del proceso de erosión.

Tabla 5. Retroceso de la línea de costa (m) para los periodos y transectos indicados.

Lapso	T1	T2	T3	T4	T5
1935-1973	155	1634	2565	2918	3004
1973-1985	45	181	286	507	812
1985-2000	0	207	160	657	684
2000-2009	130	3	289	434	246
2009-2022	61	72	81	214	72
Total	391	2098	3381	4730	4818

Isla Verde

La inexistencia de cartografía náutica posterior a 1936 y antes de la disponibilidad de imágenes satelitales (1984) no permite establecer la morfodinámica de isla Verde y su proceso de desaparición. Se estima que el proceso de erosión costera provocó la pérdida de 516 ha (Fig. 6). La rápida y acelerada erosión de isla Verde inició en 1925 con las primeras obras de encauzamiento de la desembocadura del río Magdalena (Núñez, 2004).

Flecha de Puerto Velero

Para analizar la morfodinámica de la flecha de Puerto Velero se amplió el área de interés a ambos lados de este, encontrándose tres sectores característicos. El primer (transecto 1) y tercer sector (transecto 3) al noreste y sur de la flecha, respectivamente, tienen características claramente erosivas, mientras que la flecha (transecto 1) ha sufrido una importante progradación a un ritmo promedio anual (1986-2022) de +141 m/año. A partir de 1988 la sedimentación se desaceleró hasta alcanzar un mínimo de +50 m/año en el periodo comprendido entre 2009 y 2013, aunque se desaceleró entre el periodo 1986 y 2013, donde disminuyó a +46 m/año. A partir de 2013 el proceso de sedimentación se aceleró hasta alcanzar +138 m/año en el periodo 2018-2021, pero en ocasiones las tasas de sedimentación aumentaron (Fig. 7). En 2022 la flecha alcanzó 4.8 km de largo.

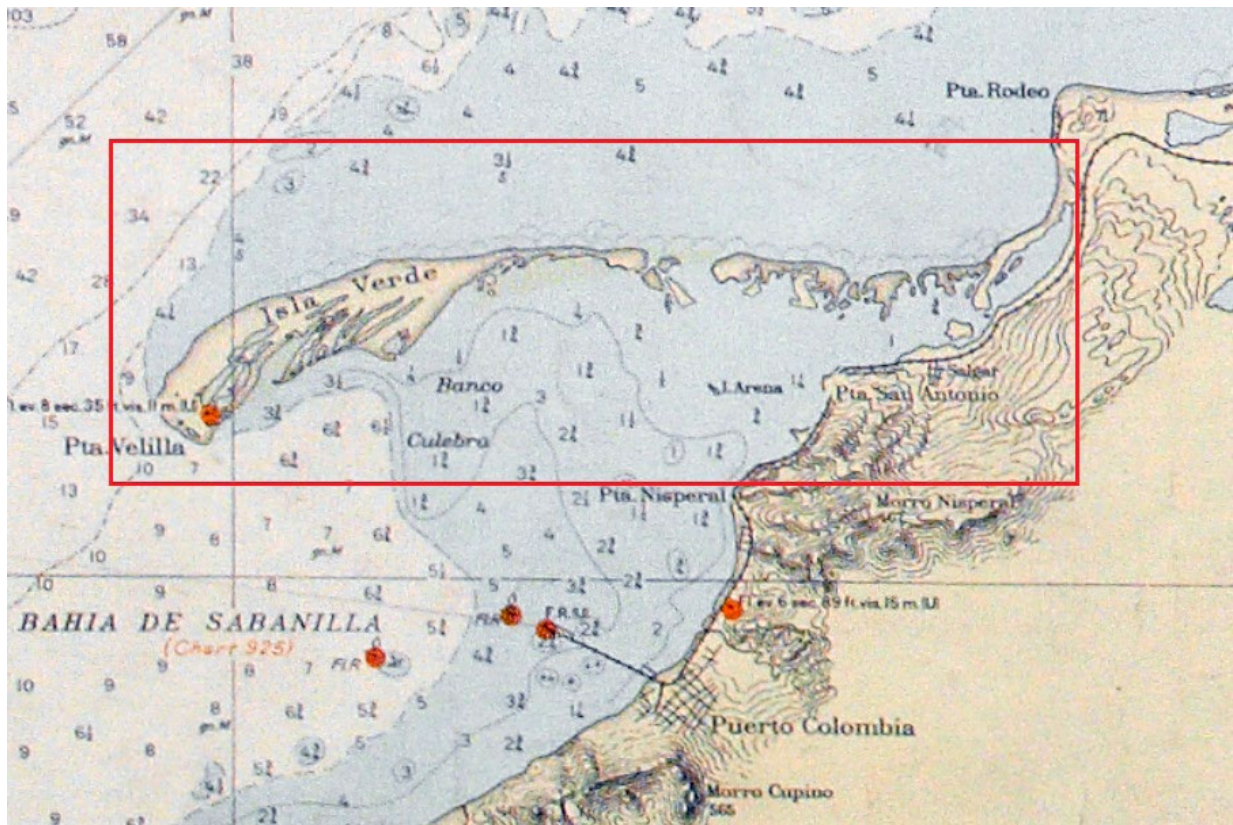


Figura 6. Se muestra isla Verde en la carta náutica de 1935 Puerto Colombia-Santa Marta. Carta náutica Puerto Colombia-Santa Marta (5688). Ed.: 1938.

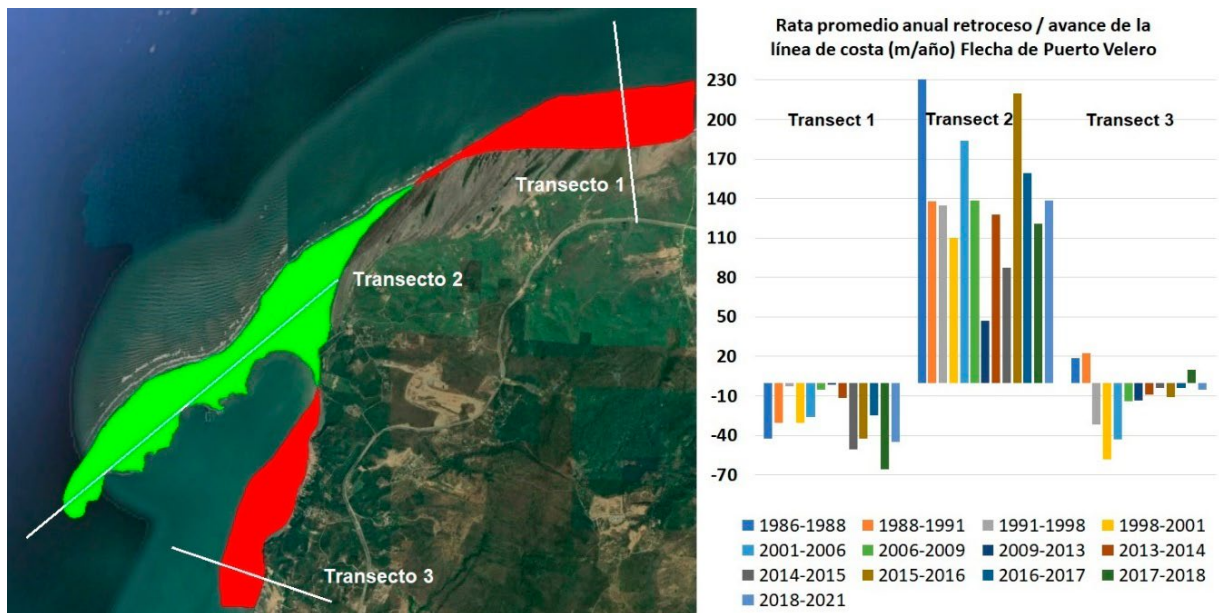


Figura 7. Tasa media anual de retroceso y avance de la línea de costa a lo largo de los transectos indicados y para los períodos correspondientes.

La sedimentación ha sido predominante, aunque durante el periodo 2009-2013 se presentó erosión (Fig. 8); sin embargo, esto no limitó el crecimiento y proyección de la flecha, ya que

creció 50 m para el mismo período. Esto indica que el alargamiento de la flecha se produjo a expensas de su ancho.

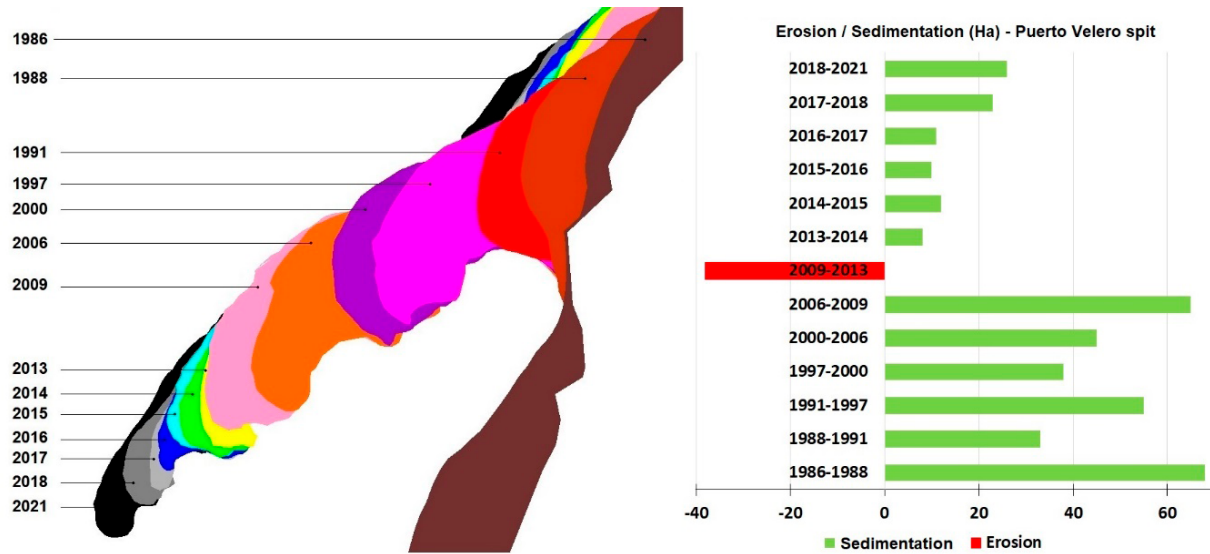


Figura 8. Proceso de crecimiento de la flecha de Puerto Velero entre 1986 y 2021. A la derecha, áreas sedimentadas (verde) y erosionadas (rojo) (ha), según el análisis del borde costero para los períodos correspondientes.

La erosión y sedimentación entre 1935 y 2022 para toda el área de interés se indica en la Figura 9.

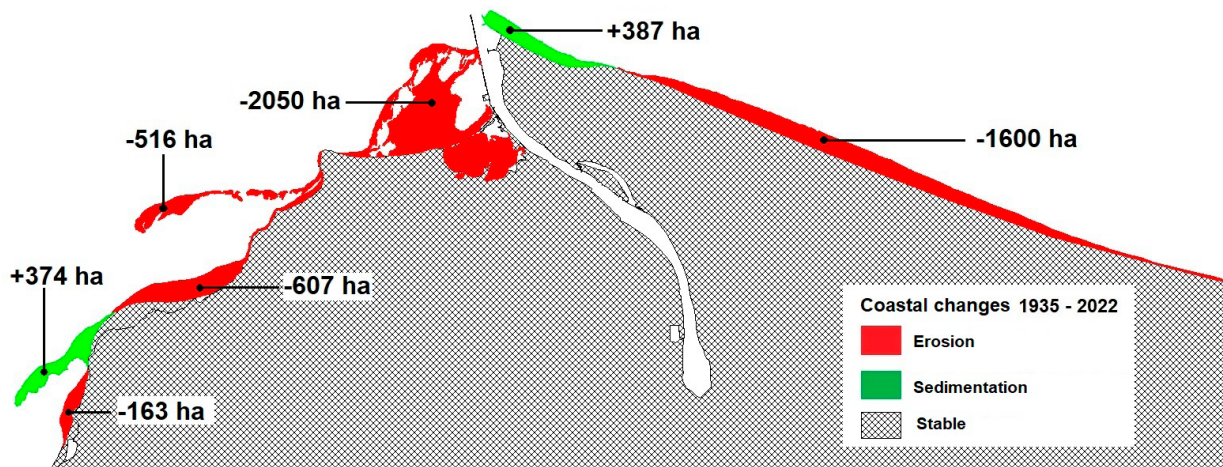


Figura 9. Zonas de erosión (rojo) y acreción (verde) en el delta del Magdalena entre 1935-2022.

Para evaluar los cambios en el fondo se contó con levantamientos batimétricos realizados por la Autoridad Marítima Colombiana (Dimar). Los datos utilizados fueron levantamientos batimétricos de los primeros 30 km del río Magdalena (2021) y de las cartas náuticas colombianas: 612: Aproximación a Barranquilla (2011), 407: Puerto Colombia a Santa Marta (1989), 408: Punta Canoas-Puerto Colombia (1999), 253: Río Magdalena-Bocas de Cenizas (2021). Este dato se comparó con los datos batimétricos de la carta náutica de 1938 de Puerto Colombia-Santa Marta (5688) (Fig. 10).

La característica más destacada es la formación de un canal submarino frente a la desembocadura del río Magdalena, resultado de la erosión del fondo marino, que aumentó la profundidad entre 60 y 80 m. A ambos lados del canal se observa sedimentación que varía entre 10 y 30 m. Al oeste de los tajamares, frente a la ciénaga de Mallorquín, la erosión del fondo oscila entre 5 y 10 m. En contraste, al este, la zona muestra una sedimentación que alcanza hasta 20 m.

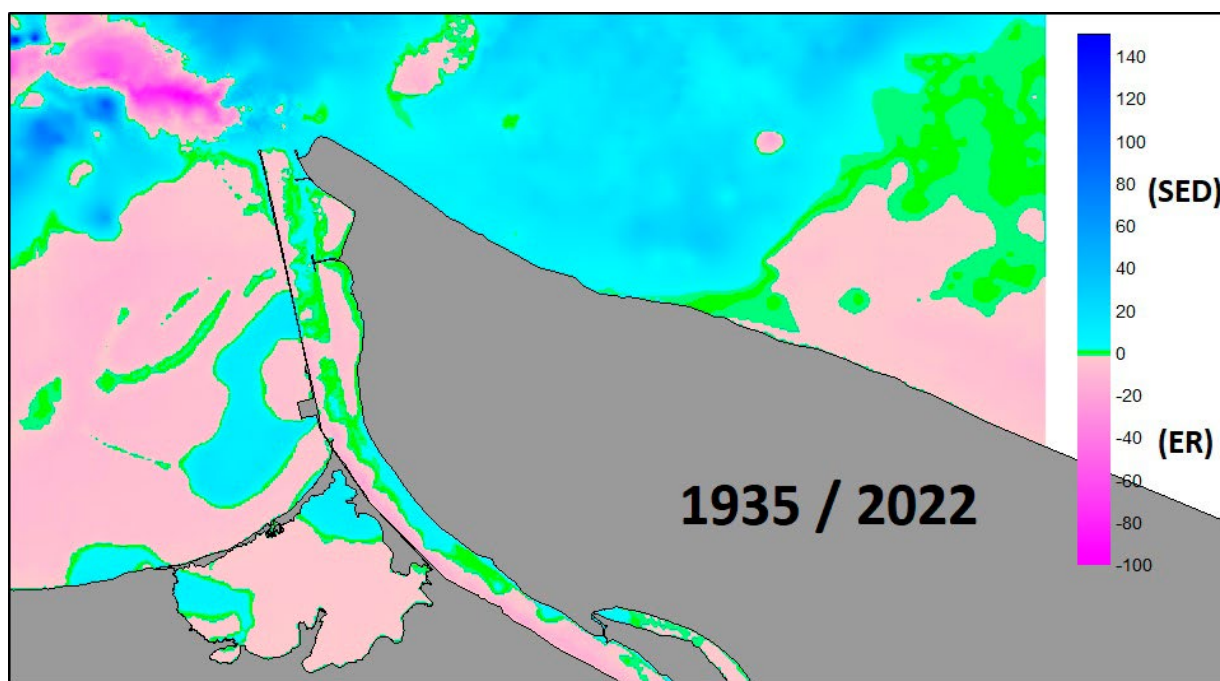


Figura 10. Zonas de sedimentación (azul) y erosión (fucsia) del fondo marino en las inmediaciones de la desembocadura del río Magdalena entre 1935-2021.

Estados morfodinámicos

El resultado de la aplicación de la ecuación parabólica de Hsu (Hsu y Evans, 1989) indica que la línea de costa de la barra de Mallorquín se encuentra en equilibrio estático (Fig. 11), lo que sugiere que el transporte neto de sedimentos es prácticamente nulo y que las olas rompen de manera simultánea a lo largo de la playa. Además, al aplicar el concepto de indentación, la razón de indentación ($a/R0$) arroja un valor de 0.44; lo cual para un ángulo β de 36.48° confirma que la playa se encuentra en un estado de estabilidad morfodinámica (Silvester y Hsu, 1993).

En el caso de la flecha de Puerto Velero la dinámica de la línea de costa a lo largo de los transectos indicados en la Fig. 7 muestra un crecimiento continuo en el transecto 2, lo que indica que la flecha aún no ha alcanzado el equilibrio y, por lo tanto, se encuentra en un estado morfodinámico inestable. Por el contrario, en el transecto 3, al suroeste, la playa parece estar acercándose al equilibrio morfodinámico, ya que los datos sugieren que la tasa de retroceso de la línea de costa se está ralentizando, muy probablemente debido a la protección que ofrece la flecha a medida que sigue creciendo. En cambio, en el transecto 1 al noreste de la flecha, la línea

de costa permanece en un estado inestable, con una tendencia erosiva constante. Los resultados sugieren que la erosión en esta sección es la fuente de sedimentos para el crecimiento de la flecha, dado que el comportamiento erosivo en esta zona coincide con el proceso de progradación de la flecha.

Entre 1986 y 2013 el crecimiento de la flecha (trayecto 2) se fue reduciendo en cada período, al igual que la tasa de erosión al noreste (trayecto 1). Sin embargo, entre 2013 y 2021 se observó una aceleración tanto en el crecimiento de la flecha como en la erosión al noreste.

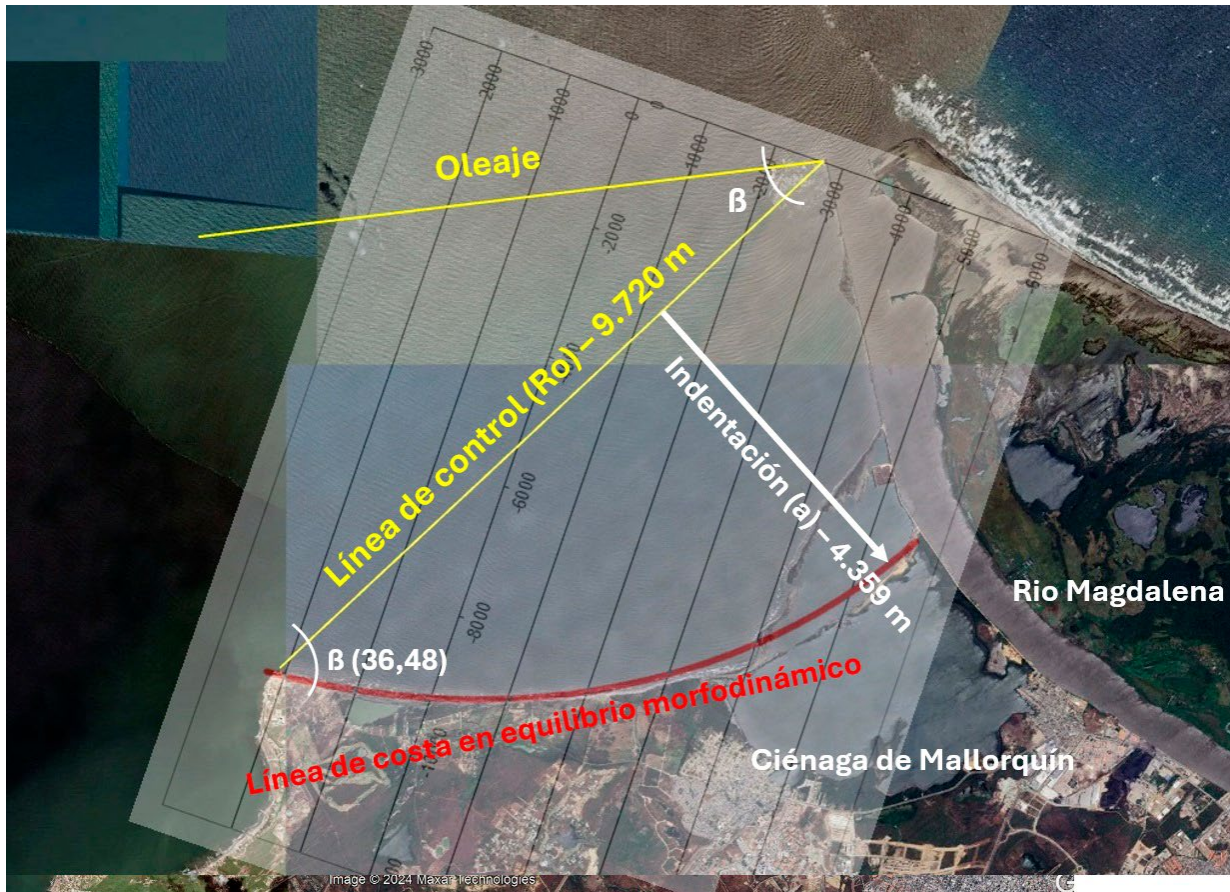


Figura 11. Aplicación de la ecuación parabólica de Hsu para determinar el estado morfodinámico de la barra de la ciénaga de Mallorquín.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos evidencian que la modificación de la descarga del río Magdalena, particularmente por la construcción de los tajamares en Bocas de Ceniza, ha generado un déficit crónico de sedimentos en la zona costera adyacente. Este déficit ha desencadenado procesos erosivos significativos incluso en sectores con ecosistemas de manglar saludables y sin presión urbana directa, como isla Verde y el borde costero de la ciénaga de Mallorquín, donde se registró una pérdida de 2566 hectáreas.

La presencia del manglar no fue suficiente para mitigar la erosión, lo que sugiere que su capacidad de protección costera depende críticamente del suministro sedimentario. En contraste, en Puerto Velero la ausencia del manglar no impidió la formación y crecimiento de una flecha litoral, alimentada por sedimentos erosionados de zonas a barlovento. Este comportamiento confirma que la disponibilidad de sedimentos es el factor determinante en la evolución morfodinámica de la costa.

El retroceso de la línea de costa en Mallorquín muestra una tendencia hacia el equilibrio morfodinámico bajo condiciones de déficit sedimentario, aunque eventos extremos podrían revertir esta estabilización. La aplicación de la ecuación parabólica de Hsu y el análisis de la razón de indentación respaldan esta interpretación.

Estos hallazgos refuerzan la hipótesis de que la interrupción del transporte de deriva litoral por estructuras rígidas como tajamares puede desencadenar procesos erosivos severos, incluso en presencia de ecosistemas naturalmente resilientes. La restauración del suministro sedimentario emerge como una condición necesaria para la recuperación costera, especialmente en zonas con manglar.

CONCLUSIONES

El transporte de sedimentos a lo largo del litoral, a sotavento de la desembocadura del río Magdalena, se alimentaba de los sedimentos resuspendidos de la playa (por el oleaje) y del aporte de sedimentos del río, pero una vez construidos los tajamares de Bocas de Ceniza el suministro de sedimentos a la corriente de deriva litoral disminuyó.

Como consecuencia de esto y de forma inmediata comenzó la erosión del frente costero de la actual ciénaga de Mallorquín, así como la erosión de isla Verde. Una vez desaparecida isla Verde el puerto de Puerto Colombia paralizó operaciones debido al desmejoramiento de la condición del mar en el sector del muelle, casi 50 años después de que la flecha de Puerto Velero iniciará su formación por la migración de sedimentos erosionados desde la desembocadura del río Magdalena. A sotavento de la flecha, la falta de sedimentos, debido a la interrupción del transporte de deriva litoral originó un proceso de erosión.

Durante el período 1935-2022 al este de la desembocadura del Magdalena se produjo la acumulación de arenas en un área de 387 ha, controlada por la extensión del tajamar oriental; por otra parte, se evidenció un proceso de erosión más al este, el cual llevó a la pérdida de 1600 ha, también por reducción en el suministro de sedimentos y asociados a otros procesos relacionados con la reducción de las estructuras

de intercambio de masas de agua de la ciénaga Grande de Santa Marta, por la construcción de la carretera entre Barranquilla y Santa Marta.

Al oeste de los tajamares la erosión es predominante, alcanzado en los últimos 87 años la pérdida de terreno costero en aproximadamente 3336 ha. Esto produjo el retroceso del litoral a lo largo de 24.6 km después de la desembocadura del río Magdalena y la desaparición de isla Verde. Los cambios en el fondo y en la morfología de la costa permitieron el proceso de sedimentación y la formación de la flecha de Puerto Velero que cubre un área de 374 ha, con una longitud de 4.8 km, manteniendo su crecimiento. Al oeste de la flecha y, por interrupción del transporte de deriva asociado al crecimiento de la flecha, el proceso de erosión ha llevado a la pérdida de 163 ha.

En el caso de la ciénaga de Mallorquín el retroceso de la línea de costa se ha ralentizado desde un promedio de -54 m/año entre 1935-1973 a 8 m/año en el periodo 2009-2022, indicando que la línea de costa está encontrando el estado de equilibrio bajo las condiciones de déficit sedimentario, lo que es confirmado mediante la aplicación de la ecuación parabólica de Hsu y el cálculo de la razón de indentación. Sin embargo, condiciones de oleaje extremas, repetitivas y por encima del régimen climático anual podrían llevar a la pérdida de la ciénaga por la erosión de la barra de Mallorquín, en caso de que no se restituya el suministro sedimentario.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Dirección General Marítima (Dimar) y, especialmente, al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH) por el aporte de información batimétrica, registros meteorológicos y de boyas de oleaje. Asimismo, al programa de Doctorado en Desarrollo Sostenible de la Universidad de la Costa, ya que fue en el marco de este en el que se desarrolló la presente investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aiello, A., Canora, F., Pasquariello, G., & Spilotro, G. (2013). Shoreline variations and coastal dynamics: A space-time data analysis of the Jonian littoral, Italy. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 129, 124-135. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.06.012>

- Andrade, C. (2023). *The artificial modification of the coastal geography between Bocas de Ceniza and the Bay of Cartagena. Consequences on the current human geography on the Colombian Caribbean coast. - La modificación artificial de la geografía costera entre Bocas de Ceniza y la Bahía de Cartagena - Consecuencias en la geografía humana actual en la costa Caribe colombiana*. 52, 63–81.
- Alvarado, M. (2005). Cartagena y el plan de restauración ambiental del canal del Dique y Barranquilla, y las obras de profundización del canal navegable de acceso a la zona portuaria: visión general. In Juan D. Restrepo (Ed.), *Los sedimentos del río Magdalena: reflejo de la crisis ambiental* (1st ed., pp. 217–254). EAFIT.
- Ávila, B., & Gallo, N. (2021). Morphological behavior of the Magdalena River delta (Colombia) due to intra and interannual variations in river discharge. *Journal of South American Earth Sciences*, 108, 103215. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103215>
- Boak, E. H., & Turner, I. L. (2005). Shoreline definition and detection: A review. In *Journal of Coastal Research* (Vol. 21, Issue 4, pp. 688–703). <https://doi.org/10.2112/03-0071.1>
- Bombino, G., Barbaro, G., D'Agostino, D., Denisi, P., Foti, G., Labate, A., & Zimbone, S. M. (2022). Shoreline change and coastal erosion: The role of check dams. First indications from a case study in Calabria, southern Italy. *Catena*, 217. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106494>
- Boswood, P. K., & Murray, R. J. (2001). *World-wide sand bypassing systems: data report (Compiled 1997)*. www.env.qld.gov.au
- Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., ... Ha, M. (2023). IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.
- (P. Arias, M. Bustamante, I. Elgizouli, G. Flato, M. Howden, C. Méndez-Vallejo, J. J. Pereira, R. Pichs-Madruga, S. K. Rose, Y. Saheb, R. Sánchez Rodríguez, D. Ürgé-Vorsatz, C. Xiao, N. Yassaa, J. Romero, J. Kim, E. F. Haites, Y. Jung, R. Stavins, ... C. Péan, Eds.). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Correa, I. D., Alcántara-Carrió, J., & González, D. A. (2005). Historical and Recent Shore Erosion along the Colombian Caribbean Coast. *Journal of Coastal Research*, 49, 52–57.
- Ercilla, G., Alonso, B., Estrada, F., Chiocci, F. L., Baraza, J., & Farran, M. L. (2002). The Magdalena Turbidite System (Caribbean Sea): present-day morphology and architecture model. *Marine Geology*, 185(3–4), 303–318. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(02\)00182-2](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(02)00182-2)
- Galgano, F. A. (2009). *Middle States Geographer* (Vol. 42).
- Higgins, A., Restrepo, J. C., Ortiz, J. C., Pierini, J., & Otero, L. (2016). Suspended sediment transport in the Magdalena River (Colombia, South America): Hydrologic regime, rating parameters and effective discharge variability. *International Journal of Sediment Research*, 31(1), 25–35. <https://doi.org/10.1016/J.IJSRC.2015.04.003>
- Hsu, J. R. C., & Evans, C. (1989). Parabolic bay shapes and applications. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 87(4), 557–570. <https://doi.org/10.1680/jicep.1989.3778>
- Kolla, V., & Buffler, R. T. (1983). Morphologic, acoustic, and sedimentologic characteristics of the Magdalena Fan. *Geo-Marine Letters*, 3(2), 85–91. <https://doi.org/10.1007/BF02462452>
- Komar, P. D. (1996). Tidal-Inlet Processes and Morphology Related to the Transport of Sediments. *Journal of Coastal Research*, 23–45. <http://www.jstor.org/stable/25736067>
- Koopmans, B. N. (1971). *Interpretación de fotografías aéreas en morfología costera: relacionada con proyectos de ingeniería* (1st ed.). Centro Interamericano de Fotointerpretación.
- Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., & Aarninkhof, S. (2018).

- The State of the World's Beaches. Scientific Reports, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6> PMID:29703960 PMCID:PMC5923213
- MADS. (2013). *Decreto 1120 del 2013. Por el cual se reglamentan las Unidades Ambientales.* (1120; p. 10).
- 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>
- Molares, R. J. (2004). Clasificación e identificación de las componentes de marea del Caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH*, 22, 105–114. <https://doi.org/10.26640/22159045.132>
- 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). *Bol. Cient. CIOH*, 19, 68–79. https://doi.org/10.26640/01200542.19.68_79
- Núñez, H. (2004). La desaparición de Isla Verde. Un desastre ecológico del siglo XX en el Caribe colombiano. *Huellas - Universidad Del Norte*, 60, 27–33.
- Orejarena, A., Afanador, F., Ramos, I., Conde, M., & Restrepo, J. (2015). Evolución morfológica de la espiga de Galerazamba, Caribe colombiano Galerazamba Spit morphological evolution, Colombian Caribbean. *Bol. Cient. CIOH*, 33, 123–144. https://doi.org/10.26640/01200542.19.68_79
- Posada Posada, B. O., & Henao Pineda, W. (2008). *Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe colombiano.* Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras - Invemar. <http://hdl.handle.net/1834/6682>
- Restrepo, J. C. (2014). *"Dinámica Sedimentaria en Deltas Micromareales-Estratificados de Alta Descarga: Delta del Río Magdalena (Colombia-Mar Caribe)"* Asesores. Universidad del Norte.
- Restrepo, J. C., Orejarena R, A. F., & Torregroza, A. C. (2017). Suspended sediment load in northwestern South America (Colombia): A new view on variability and fluxes into the Caribbean Sea. *Journal of South American Earth Sciences*, 80, 340–352. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2017.10.005>
- Restrepo, J. C., Schrottke, K., Traini, C., Ortiz, J. C., Orejarena, A., Otero, L., Higgins, A., & Marriaga, L. (2016). Sediment transport and geomorphological change in a high-discharge tropical delta (Magdalena River, Colombia): Insights from a period of intense change and human intervention (1990-2010). *Journal of Coastal Research*, 32(3), 575–589. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00263.1>
- Restrepo, J. D. & Kjerfve, B. (2000). Magdalena river: Interannual variability (1975-1995) and revised water discharge and sediment load estimates. *Journal of Hydrology*, 235(1–2), 137–149. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00269-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00269-9)
- Restrepo, J. D. & López, S. A. (2008). Morphodynamics of the Pacific and Caribbean deltas of Colombia, South America. *Journal of South American Earth Sciences*, 25(1), 1–21. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2007.09.002>
- Ricaurte-Villota, C., Coca-Domínguez, O., González, M. E., Bejarano-Espinosa, M., Morales, D. F., Correa-Rojas, C., Briceño-Zuluaga, F., Legarda, G. A., & Arteaga, M. E. (2018). *Amenaza y vulnerabilidad por erosión costera en Colombia: enfoque regional para la gestión del riesgo.*
- Rivillas-Ospina, G. D., Ruiz-Martínez, G., Silva, R., Mendoza, E., Pacheco, C., Acuña, G., Rueda, J., Félix, A., Pérez, J., & Pinilla, C. (2017). Physical and morphological changes to wetlands induced by coastal structures. In *Coastal Research Library* (Vol. 21, pp. 275–315). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56179-0_9
- Romero-Otero, G. A., Slatt, R. M., & Pirmez, C. (2015). Evolution of the Magdalena deepwater fan in a tectonically active setting, offshore Colombia. In *AAPG Memoir* (Vol. 108, pp. 675–707). American Association of Petroleum Geologists. <https://doi.org/10.1306/13531953M1083656>

- Silvester, R., & Hsu, J. R. C. (1993). Coastal stabilization: Innovative concepts: Richard Silvester and John R.C. Hsu. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1992, xiv + 578 pp. (hardcover) ISBN 0-13-14310-9. *Sedimentary Geology*, 88(1-2), 153-154. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(93\)90155-X](https://doi.org/10.1016/0037-0738(93)90155-X)
- Vernette, G., Mauffret, A., Bobier, C., Briceno, L., & Gayet, J. (1992). Mud diapirism, fan sedimentation and strike-slip faulting, Caribbean Colombian Margin. *Tectonophysics*, 202(2-4), 335-349. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90118-P](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90118-P)
- 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(sp1), 711-716. <https://doi.org/10.2112/SI95-138.1>
- Wang, Y. H., Wang, Y. H., Deng, A. J., Feng, H. C., Wang, D. W., & Guo, C. S. (2022). Emerging Downdrift Erosion by Twin Long-Range Jetties on an Open Mesotidal Muddy Coast, China. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/jmse10050570>