



Análisis Multitemporal de la Línea de Costa en el Sector Playa Salguero (Santa Marta), entre el Periodo 2016 al 2025

Paula Andrea López Muñoz
Vanessa Susana Santander Pontón
Erika Gisella Rodríguez Aguilar
Miguel Mauricio Castañeda Castañeda
Leyton Adrián Gutiérrez Serna

Trabajo de grado presentado para optar al título de Especialista en Sistemas de Información
Geográfica

Asesora: Ana María Giraldo Patiño, Magíster (MSc) en Teledetección

Asesores de recursos académicos: Juan Pablo Charry Osorio (asesor bibliográfico)

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual
Manizales, Caldas, Colombia

2025

Cita	(López Muñoz et al., 2025)
Referencia	López Muñoz et al., (2025). <i>Análisis multitemporal de la línea de costa en el sector playa Salguero (Santa Marta), entre el periodo 2016 al 2025</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.



Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual, II

Declaración de inteligencia artificial: el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como ChatGPT, Claude y Gemini de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

Biblioteca y Centro de Recursos: <https://biblioteca.umanizales.edu.co/>

Repositorio Institucional: <http://ridum.umanizales.edu.co/>

Universidad de Manizales: www.umanizales.edu.co

Revistas: <http://revistasum.umanizales.edu.co/>

Fondo Editorial: <https://editorialum.umanizales.edu.co/>

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Manizales ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A cada una de nuestras familias, por el apoyo incondicional en todo el proceso académico que estamos culminando en esta especialización, por acompañarnos a cumplir nuestras metas durante toda nuestra trayectoria profesional y complementar nuestras vidas.

Paula López, Vanessa Santander y Erika Rodríguez

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento está dirigido para nuestra asesora del proyecto de grado, la ingeniera Ana María Giraldo y a los tutores que nos apoyaron en este proceso académico.

Paula López, Vanessa Santander y Erika Rodríguez

Tabla de Contenido

Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
1 Planteamiento del Problema	12
1.1 Área de Estudio	14
1.1.1 Aspectos Físicos, Geología y Geomorfología.....	15
1.2 Antecedentes	17
2 Justificación	24
3 Objetivos.....	27
3.1 Objetivo General	27
3.2 Objetivos Específicos.....	27
4 Marco Teórico.....	28
4.1 Erosión Costera	28
4.2 Teledetección y herramientas SIG	29
4.3 Digital Shoreline Analysis System (DSAS).....	31
5 Metodología	33
6 Resultados	42
6.1 Fases 1, 2 y 3 - Variación Espacio Temporal de la Línea de Costa	42
6.2 Fase 4 - Tasas de Erosión y Acreción	44
6.3 Fase 5 - Zonas Susceptibles a Procesos de Erosión y Acreción.....	48
6.4 Fase 6 - Propuestas para la Gestión Costera	49
7 Discusión.....	56
7.1 Fases 1, 2 y 3 - Variación Espacio Temporal de la Línea de Costa	56
7.2 Fase 4 - Tasas de Erosión y Acreción	57

7.3 Fase 5 - Zonas Susceptibles a Procesos de Erosión y Acreción.....	60
7.4 Fase 6 - Propuestas para la Gestión Costera	61
9 Conclusiones	64
10 Recomendaciones.....	66
Referencias	67
Anexos.....	76

Lista de Tablas

Tabla 1 Características de las imágenes a descargar	34
Tabla 2 Campos agregados a la tabla de atributos de las líneas de costa.....	36
Tabla 3 Descripciones de las fórmulas y variables utilizadas por el DSAS calcular las métricas de movimiento y tasas de cambio de la línea de costa.	37
Tabla 4 Información de las imágenes satelitales descargadas para la digitalización de las líneas de costa.	42
Tabla 5 Categorías de tendencia de evolución de la línea de costa en Playa Salguero	47
Tabla 6 Listado información para medidas de gestión costera	51
Tabla 7 Listado de literatura sobres soluciones basadas en naturaleza (SbN)	53

Lista de Figuras

Figura 1 Mapa del área de estudio, ubicada en Playa Salguero al sur-oeste del municipio de Santa Marta.	15
Figura 2 Esquema metodológico planteado para el desarrollo de la metodología, en los cuales se estiman 6 fases para ejecutarla.	34
Figura 3 Figura explicativa de como el DSAS mide la variación de la línea de costa en el tiempo usando transectos y los indicadores que calcula. Línea base en color negro, transecto en color gris, en líneas multicolores las diferentes líneas de costa y en círculos de colores las intersecciones entre el transecto y las líneas.	38
Figura 4 Figura explicativa de la aplicación de la fórmula de regresión lineal realizada por el DSAS para calcular la tasa de LRR.	39
Figura 5 Imágenes satelitales y líneas de costa (en color amarillo) de Playa Salguero, entre los años 2016 al 2025.	43
Figura 6 Tasas de cambio (LRR) de la línea de costa en playa Salguero, periodo 2016 al 2025.	45
Figura 7 Movimiento neto de la línea de costa (NSM) en playa Salguero, periodo 2016 al 2025.	46
Figura 8 Mapa temático indicando las zonas susceptibles a la erosión y acreción costera.	49

Siglas, Acrónimos y Abreviaturas

CIOH	Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas
cm	Centímetros
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DSAS	Digital Shoreline Analysis System
EPR	Tasa de Punto Final
INVEMAR	Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés
LRR	Tasa de Regresión Lineal
m	Metros
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
MCDA	Análisis de decisiones multicriterio.
NDWI	Índice de Diferencia Normalizada de Agua (Siglas en inglés)
NSM	Movimiento Neto de la Línea de Costa
SbN	Soluciones Basadas en la Naturaleza
SCE	Máxima Distancia del Desplazamiento de la Línea de Costa
SIG	Sistemas de Información Geográfica
UNGRD	Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres

Resumen

La erosión costera es un problema ambiental y socioeconómico que afecta diversas regiones del mundo, y Colombia no es ajena a esta problemática. Playa Salguero, en Santa Marta, ha evidenciado cambios significativos en su línea de costa debido a factores naturales y antrópicos. Este estudio tuvo como objetivo analizar la dinámica costera de esta zona mediante un análisis multitemporal utilizando los SIG, con el fin de comprender mejor los patrones de erosión y acreción y proponer recomendaciones de gestión costera acordes a las condiciones locales. La metodología empleó imágenes satelitales y las líneas de costa desde 2016 a 2025, procesados y analizados con herramientas de geoprocésamiento como ArcGIS Pro y DSAS. Se aplicaron indicadores como la LRR, NSM y SCE, para cuantificar las variaciones espaciales y temporales. Se identificaron las zonas más susceptibles a procesos erosivos y de acreción. En promedio la tasa erosión costera de Playa Salguero es de 26 cm por año y la acreción de 182 cm por año. El movimiento neto de la línea es de 6,23m con desplazamiento negativo y 16,21 m movimiento positivo. A partir de los resultados obtenidos se dieron recomendaciones de gestión costera, priorizando las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN), sobre las medidas de mitigación de obras duras. De esta manera, este estudio contribuye al monitoreo y manejo sostenible del litoral, proporcionando información fundamental para las instituciones ambientales y autoridades locales encargadas de la planificación territorial en Playa Salguero.

Palabras clave: erosión costera, análisis multitemporal, SIG, playa Salguero.

Abstract

Coastal erosion is an environmental and socioeconomic problem that affects various regions of the world, and Colombia is no stranger to this problem. Playa Salguero, in Santa Marta, has shown significant changes in its coastline due to natural and anthropogenic factors. The objective of this study was to analyze the coastal dynamics of this area through a multitemporal analysis using GIS, in order to better understand erosion and accretion patterns and propose coastal management recommendations according to local conditions. The methodology used satellite images and coastlines from 2016 to 2025, processed and analyzed with geoprocessing tools such as ArcGIS Pro and DSAS. Indicators such as LRR, NSM y SCE were applied to quantify spatial and temporal variations. The areas most susceptible to erosion and accretion processes were identified. On average, the coastal erosion rate of Playa Salguero is 26 cm per year and accretion is 182 cm per year. The net movement of the line is 6.23 m with negative displacement and 16.21 m with positive movement. Based on the results obtained, coastal management recommendations were given, prioritizing Nature Based Solutions (NBS) over hard works mitigation measures. In this way, this study contributes to the monitoring and sustainable management of the coastline, providing fundamental information for environmental institutions and local authorities in charge of territorial planning in Playa Salguero.

Keywords: coastal erosion, multitemporal analysis, GIS, Salguero beach.

Introducción

La erosión costera es un problema ambiental y social que afecta muchas regiones del mundo, ya que causa la pérdida de territorio, infraestructura y ecosistemas, aumentando la vulnerabilidad de las comunidades que habitan en las zonas costeras. Colombia no es ajena a esta situación, y Playa Salguero, en Santa Marta, ha mostrado cambios importantes en su línea de costa debido a factores naturales, como el oleaje y las corrientes, así como a causas humanas, entre ellas el crecimiento urbano desorganizado y la intervención en ecosistemas que protegen la franja costera. Comprender cómo se comporta y cambia la línea de costa es clave para la gestión adecuada de estas áreas, especialmente en contextos de cambio climático y vulnerabilidad. Por esta razón, el uso de análisis multitemporales con Sistemas de Información Geográfica (SIG) se convierte en una herramienta esencial, ya que permite monitorear y medir los procesos de erosión y acreción de manera organizada, facilitando la toma de decisiones en la planificación territorial y la gestión de las zonas costeras. Este estudio tiene como objetivo analizar la dinámica costera de Playa Salguero mediante un análisis multitemporal con SIG entre 2016 y 2025, para comprender mejor los patrones de erosión y acreción y proponer recomendaciones de manejo costero acordes con las condiciones locales. Para esto, se utilizaron imágenes satelitales de PlanetScope y World Imagery Wayback y datos históricos anuales de la línea de costa, los cuales fueron procesados y analizados con herramientas como ArcGIS Pro y DSAS, usando indicadores como la Tasa de Cambio de la Línea de Costa, Movimiento Neto de la Línea de Costa y la Máxima Distancia del Desplazamiento de la Línea de Costa (LRR, NSM y SCE) para identificar las áreas con mayor susceptibles a estos procesos.

En este contexto, la investigación busca responder a la siguiente pregunta: ¿Cuáles son las zonas más susceptibles a procesos de erosión y acreción en Playa salguero y como se puede mejorar la gestión costera, considerando posibles relaciones con factores naturales y antrópicos?

Este análisis es importante, porque contribuye al ordenamiento sostenible de la franja costera, ofreciendo información basada en datos confiables que pueden apoyar el trabajo de las autoridades ambientales y locales en la planificación territorial. Se espera que los resultados faciliten la implementación de estrategias de prevención y adaptación frente a la erosión costera, priorizando Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) y fortaleciendo la sostenibilidad de la línea de costa en Playa Salguero.

1 Planteamiento del Problema

Las zonas costeras se definen como aquellas áreas en las que existe interacción directa entre el medio terrestre y el marino, en donde se presentan fenómenos, físicos, químicos, atmosféricos, biológicos, geológicos, sociales y culturales que permiten flujos de materia y energía entre ambos medios (Yincan et al, 2017). Estas zonas poseen vital importancia ecológica, social y de desarrollo económico, ya que constituyen hábitat de diversas especies de flora y fauna. Además, proveen diversos servicios ecosistémicos como regulación climática, provisión de alimentos y soporte para los asentamientos humanos, industriales y comerciales, entre otros (Merlotto et al., 2019), lo que facilita el desarrollo cultural, turístico y económico de las comunidades que las habitan (Banco de Occidente, 2022).

Sin embargo, estas zonas costeras a lo largo del tiempo se han visto modificadas por fenómenos naturales, principalmente por la erosión costera, entendiéndose este como un proceso dinámico en diversas escalas temporales y espaciales (Akhter et al., 2024; Imam et al., 2024; Khakhim et al., 2024; Saleem & Awange, 2019), donde intervienen procesos naturales como por ejemplo el oleaje, las corrientes e inundaciones, y también acciones antrópicas como la inadecuada planificación territorial de infraestructura, asociada a actividades industriales, portuarias, habitacionales, turística, viales, comerciales, productivas, extracción de arenas, minerales y recursos marinos (B. D. Angnuureng et al., 2023; Islam et al., 2025; MADS, 2018). Dichas acciones humanas han generado una aceleración directa de esta dinámica, generando así marcados impactos ambientales y sociales (D. B. Angnuureng et al., 2025; Aouiche et al., 2016).

La erosión costera se manifiesta principalmente a través de cambios en la línea de costa, los cuales resultan de la interacción compleja entre factores que operan en diferentes escalas temporales. Como causas fundamentales de largo plazo se identifican las variaciones del nivel del mar y el cambio climático global. Estos procesos se ven intensificados por factores de corto plazo como las variaciones en la energía del oleaje y eventos atmosféricos extremos (tormentas). A su vez, los factores de mediano plazo son: la reducción en el aporte sedimentario, alteraciones en las descargas fluviales, retención de sedimentos en represas y la implementación inadecuada de estructuras de protección costera rígidas, que contribuyen a desestabilizar el equilibrio sedimentario natural, acelerando la degradación de los sistemas costeros (D. B. Angnuureng et al., 2025; Dong et al., 2024; Joe et al., 2025).

Las evidencias históricas han documentado un incremento del nivel del mar de 0,10 a 0,20 m en el siglo XX y estiman que podría aumentar entre 0,20 y 0,88 m para finales del siglo XXI. Considerando que aproximadamente el 80% de las costas mundiales han sufrido proceso de erosión y que se intensifica con el aumento del nivel del mar, urge cartografiar y monitorear sistemáticamente los cambios de la dinámica costera, con el fin de que los entes territoriales y las instituciones mundiales encargadas de monitorear y mitigar problemáticas ambientales y sociales relacionadas con la erosión costera, tomen decisiones informadas para mitigar los efectos adversos y desarrollar estrategias de gestión sostenible de los recursos costeros (Akhter et al., 2024; Khakhim et al., 2024).

Colombia no es ajena esta problemática mundial, ya que al poseer dos litorales; uno sobre el océano pacífico y otro sobre el mar caribe, presenta mayor susceptibilidad a los fenómenos erosivos. Esta problemática se intensifica debido al considerable asentamiento humano en las zonas costeras, la costa Caribe ejemplifica claramente esta situación, dado que se concentra el 21.6% de acuerdo con el último Censo Nacional (DANE, 2018), de acuerdo con investigaciones realizadas, se puede concluir que aproximadamente el 50% de la costa caribe colombiana enfrenta una erosión costera severa, al presentar tasas de erosión mayores a 1,5 m por año, solamente el 32% del territorio es estable y 18% presenta acreción (Rangel et al., 2015).

En los últimos 10 años este deterioro costero se ha investigado por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH), Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR) y diferentes universidades (Coca Domínguez & Ricaurte Villota, 2019), sin embargo, el comportamiento de este fenómeno no ha sido ampliamente investigado en el país. Instituciones como la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, sugiere que se requieren más estudios sobre el tema con el fin de buscar soluciones a las problemáticas actuales, con medidas que no aumenten el problema, como ha pasado con el tema de espolones, malecones, enrocados, entre otros (Ministerio de Ambiente de Colombia, 2022; Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2019).

Se ha demostrado que la escasa investigación sobre este fenómeno ha derivado en una planificación deficiente y un ordenamiento inadecuado. En consecuencia, las intervenciones han sido desde la reacción, orientadas a emergencias inmediatas, en lugar desde la prevención. Esto ha causado impactos graves en los ecosistemas y en las comunidades que dependen de ellos (Toimil et al., 2023). De esta manera se debe realizar trabajos que sirvan como argumento para la toma de

decisiones por parte de las entidades que vigilan el ordenamiento territorial marino costero y generar estrategias de conservación de los ecosistemas como los manglares, los arrecifes de coral, bosque seco tropical, dunas, entre otros, los cuales actúan como barreras naturales para proteger las costas de la acción de las olas y la erosión, cuya degradación puede provocar problemas más graves (Rangel et al., 2015; Rojas et al., 2017).

Las playas del departamento de Magdalena presentan una alta intervención turística, sumado a esto, la construcción de espolones en la bahía de Santa Marta ha generado una aceración de la erosión costera hacia el sur-oeste de la población, la cual ha tenido reportes de amenaza por erosión desde hace varios años, incluyendo a Playa Salguero, como punto crítico susceptible a este fenómeno (Coca Domínguez & Ricaurte Villota, 2019; Ricaurte Villota et al., 2018).

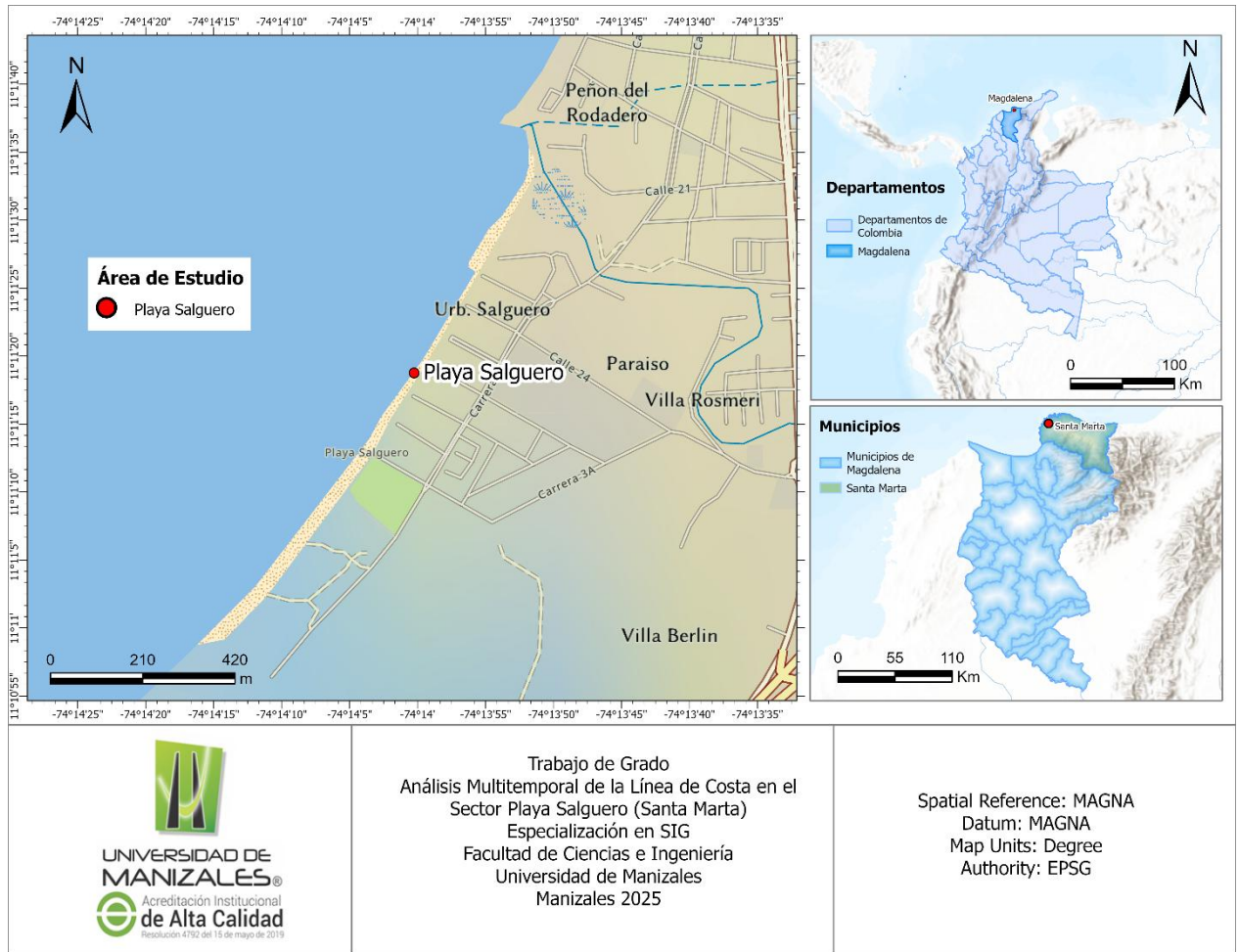
Esta playa sufre un acelerado proceso de erosión costera que ha reducido significativamente su extensión, impactando negativamente el turismo y la comunidad local de acuerdo con lo conceptuado por el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés, en los diferentes informes que ha emitido por solicitud de la misma comunidad que allí habita (INVEMAR, 2023b). Se ha observado que la erosión ha dejado expuestas las cimentaciones de las construcciones cercanas a la orilla, ha alterado el entorno natural y ha eliminado los espacios previamente utilizados para actividades turísticas (INVEMAR, 2021a).

1.1 Área de Estudio

El área de estudio del presente trabajo está ubicada en el departamento del Magdalena, en el municipio de Santa Marta, específicamente en el sector de Playa Salguero, al sur-oeste de la ciudad (**Figura 1**). Playa Salguero comprende una longitud de 1,50 Km aproximadamente y está limitada al norte por el trazo del río Gaira y al sur por Punta Gloria.

Figura 1

Mapa del área de estudio, ubicada en Playa Salguero al sur-oeste del municipio de Santa Marta.



1.1.1 Aspectos Físicos, Geología y Geomorfología

Santa Marta se encuentra ubicada en la Región Caribe, al norte de Colombia. Su temperatura promedio anual es de aproximadamente 28 °C, con variaciones que alcanzan los 29 °C en los períodos secos (enero) y descienden hasta los 23 °C durante la temporada de lluvias (octubre). La presencia de la Sierra Nevada actúa como una barrera natural que contribuye a la regulación de la temperatura marina. En cuanto a la precipitación, el promedio mensual varía entre 6,5 mm en los meses secos y 240 mm en los más lluviosos, lo que representa un acumulado anual cercano a los 1.300 mm. De acuerdo con el diagnóstico de ordenamiento territorial, entre 1985 y 2020 la población asentada en el área se ha duplicado (Alcaldía Distrital de Santa Marta, 2020).

La geología en Santa Marta ha evolucionado por la continua interacción tectónica de la Placa Caribe. Diversos modelos plantean que la placa Caribe se originó en el Pacífico y comenzó a desplazarse hacia el este al mismo tiempo que América del Norte y del Sur se alejaban. Durante el tránsito entre el Cretácico Superior y el Paleógeno, este movimiento oriental propició la acreción de varios terrenos oceánicos sobre el norte de Sudamérica (Londono et al., 2015). Más adelante, entre el Eoceno Tardío y el Oligoceno Temprano, la placa Caribe modificó tanto su dirección como su tasa de convergencia. La aparición de regímenes tectónicos transpresivos y transtensivos facilitó la formación de bloques tectónicos y la apertura de cuencas sedimentarias, que posteriormente controlaron la acumulación de sedimentos en dichas zonas (Gómez Tapias & Mateus Zabala, 2020).

El macizo de Santa Marta se caracteriza por ser un punto topográfico elevado independiente de los relieves restantes que conforman las cadenas montañosas de la cordillera de los Andes colombianos (Rodríguez-García et al., 2020). Este sistema orográfico costero es considerado como uno de los más altos de la tierra y sus límites estructurales están determinados por la falla de Oca al norte y el sistema de fallas de Santa Marta al occidente (Alcaldía Distrital de Santa Marta, 2020; Gómez Tapias & Mateus Zabala, 2020; Restrepo & Toussaint, 2020).

Localmente las unidades aflorantes en playa Salguero y playas aledañas incluyen el Batolito de Santa Marta, compuesto por tonalitas y ocasionalmente granodioritas y granitos, esta unidad se encuentra en contacto intrusivo con paleocenos esquistos de Gaira. Además, se evidencia la presencia de depósitos aluviales (Alcaldía Distrital de Santa Marta, 2020).

En cuanto a la geomorfología, esta playa describe una morfología baja y rectilínea, con un cordón de dunas que separan la playa de la llanura costera. A lo largo del tiempo, la alta intervención por edificaciones ha venido degradando la depositación de estos médanos. La playa está integrada por una costa que contiene una serie de bahías amplias resguardadas por unas puntas rocosas duras, las cuales reflejan una extensión de las colinas altas de origen cristalino (Punta Gloria) moldeadas por la erosión, dando lugar a un acantilado muy definido, con un perfil convexo y cubierto de vegetación (Säenz-Reyes et al., 2017).

1.2 Antecedentes

A nivel global, la erosión costera constituye un problema de investigación prioritario debido a que afecta todas las costas del mundo, incrementando especialmente la vulnerabilidad en zonas de alta concentración poblacional. Las diferentes metodologías empleadas en los estudios internacionales y naciones contemplan mayoritariamente el uso de herramientas de teledetección y sistemas de información geográfica (SIG), los cuales se han consolidado como estándar para el monitoreo ambiental costero. Entre las metodologías más utilizadas para determinar la erosión costera se encuentran el análisis espectral multitemporal, el uso del aplicativo de Sistemas de Análisis de Líneas de Costa Digital (DSAS por sus siglas en inglés) creado por el Servicio Geológico de Estados Unidos en 1992, para medir tasas de erosión y acreción (Himmelstoss et al., 2024), análisis multicriterio y modelos predictivos como el de Kalman y redes bayesianas.

En el contexto internacional, un estudio reciente realizado en Italia desarrolló un marco analítico multinivel que integra sensores remotos RapidEye, Sistemas de Información Geográfica (QGIS, DSAS) y redes bayesianas para modelar riesgos de erosión costera y cambios en la calidad del agua bajo escenarios de cambio climático y gestión, incluyendo Soluciones Basadas en la Naturaleza. Los análisis revelaron una relación entre variables oceanográficas, evolución de la línea de costa y variaciones en la calidad del agua, con una mayor probabilidad de erosión/acreción y turbidez ante el aumento simulado de la altura significativa de las olas, pese a las limitaciones de datos, los resultados aportan insumos valiosos para orientar políticas de adaptación en la gestión costera (Dal Barco et al., 2024).

Otro estudio en Acapulco propone una metodología multicriterio orientada a identificar áreas aptas para el desarrollo urbano en municipios costeros, considerando tanto la adaptación y mitigación al cambio climático, utilizando herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) y el análisis de decisiones multicriterio (MCDA). Se generaron mapas temáticos de vegetación, recarga de agua subterránea, tenencia de la tierra, riesgo de inundación, uso urbano actual y presencia de cuerpos de agua, los cuales fueron integrados en el análisis para determinar zonas urbanizables con bajo impacto ambiental, se identificaron 367 km² adecuados para expansión urbana y otras áreas clasificadas como no aptas debido a su peligrosidad ambiental y social (Guerrero-Morales et al., 2021).

Complementariamente, un estudio desarrollado por la Universidad Santiago de Compostela en España utilizó herramientas de código abierto para la estimación de las variaciones costeras y de los cambios volumétricos empleando un pequeño sector gallego. El estudio comparó la eficacia de soluciones de código abierto frente a software privativo, encontrando altos niveles de concordancia en los resultados obtenidos (ratios ≥ 0.97). Se comprobó que se obtienen tiempos de procesos muy parecidos, lo cual ofrece una mejor opción de decisión a los usuarios que requieran usar herramientas sin coste para la gestión costera (Gómez, 2023).

En India, se evaluaron los cambios de línea de costa en los últimos 30 años, identificando patrones de erosión y acreción en las cuencas costeras de Tamil Nadu. Se aplicó la herramienta DSAS para analizar las tendencias de cambio en la línea costera utilizando el End Point Rate (EPR) y el Net Shoreline Movement (NSM). El EPR medio resultó ser de -0.26 m/año, mientras que el NSM fue de -8.03 m/año, sugiriendo que la línea costera de Tamil Nadu se está desplazando hacia el interior. Las tasas anuales de EPR y NSM varían considerablemente entre las diferentes cuencas, lo que llevó a utilizar estos índices para clasificar las cuencas costeras según su erosión y acreción. Las tasas estimadas y la categorización de las cuencas costeras podrían ser útiles para evaluar el impacto acumulativo de los peligros costeros y preparar planes de desarrollo sostenible (Sekar et al., 2024).

En Indonesia, un estudio desarrollado en la costa norte de la isla de Java, específicamente en el distrito de Batang, analizó los cambios en la línea de costa entre los años 2000 y 2023 utilizando imágenes satelitales de Landsat y PlanetScope a través de la DSAS, en conjunto con un modelo predictivo basado en el filtro de Kalman, se identificaron procesos simultáneos de erosión y acreción. Los resultados indican que, a lo largo del período analizado, ocurrieron cambios significativos en la línea costera, con proyecciones de que estas transformaciones continuarán en los próximos 10 y 20 años. Esta investigación demuestra la importancia del análisis multitemporal y del uso de herramientas estadísticas y de predicción para la gestión y monitoreo de zonas costeras vulnerables (Khakhim et al., 2024).

Otro estudio reciente y significativo en el análisis multitemporal de las líneas de costa fue llevado a cabo por Al-Attar y Basheer (2023). En su investigación, evaluaron las transformaciones costeras en Kuwait durante un período de 40 años (1980–2020), utilizando imágenes satelitales de Landsat y Sentinel-2A, además de herramientas SIG y el modelo DSAS. La investigación se estructuró identificando cuatro zonas del litoral kuwaití, permitiendo identificar áreas tanto de

erosión como de acreción mediante el cálculo de EPR. Los hallazgos mostraron que la tasa de acreción más alta alcanzó los 32.79 m/año, indicando que la línea de costa avanzó hacia el mar, mientras que la mayor tasa de erosión expresada en un valor negativo fue de -23.45 m/año señalando el retroceso de la línea hacia el continente. y presentaba fluctuaciones notables en diferentes sectores del litoral y en islas como Bubiyan y Failaka, permitiendo, realizaron mapas de proyecciones de la ubicación de línea de costa en el área para el año 2035, obteniendo como resultado que las tasas de cambio fueron insignificantes (Al-Attar & Basheer, 2023).

De las experiencias documentadas en Latinoamérica se destaca el estudio desarrollado por Gutiérrez Zambrano y Salazar Armijos (2021) en la costa ecuatoriana, específicamente entre la Puntilla de Santa Elena y Posorja, que evaluó diferentes variables principalmente las geologías y las oceanográficas con sensores remoto y SIG, que uso como metodología una adaptación del Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI). Se obtuvo como resultados que las estrictitas rígidas implementadas han cambiado el flujo y transporte de sedimentos, además se pudo concluir que en la unión del río se han incrementado las tasas de erosión (Gutiérrez Zambrano, 2021).

Siguiendo el mismo contexto geográfico, Mendoza Gil y Muñoz Trasmonte (2022) analizaron el cambio en la línea de costa generada por los procesos de erosión y sedimentación de la Bahía callao entre el 2001 y 2020. Consideraron factores naturales (geomorfología, geología, pendientes y dinámica costera) y factores antropogénicos, era importante incluir los actores antrópicos debido a que esta es una zona con alto turismo. Analizaron imágenes satelitales de LANDSAT y Sentinel, procesadas mediante ArcGIS 10.5 y QGIS 3.20.2, aplicando herramientas como el DSAS, con las que obtuvieron tasas promedio de evolución de la costa para el periodo evaluado. Finalmente, realizaron un comparativo con el "Aquamonitor", observando las mismas tendencias de erosión y sedimentación reportadas en este estudio (Mendoza & Muñoz, 2022).

En Colombia el estudio de la erosión costera ha sido abordado por el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR) desde 2001 dentro del Manejo de Zonas Costeras. En los primeros acercamientos a su evaluación a lo largo del país se observó lo extendido de esta problemática en las costas de Colombia, y la importancia de estudiar el fenómeno en detalle, por lo que en 2004 se vio la necesidad de crear el Programa de Geociencias Marinas y Costeras (GEO), cuyo enfoque inicial fue el estudio de las amenazas naturales. En 2006 el programa GEO inició el levantamiento a detalle de información a lo largo del país para realizar un diagnóstico de la erosión costera; los resultados de este arduo trabajo fueron publicados en tres documentos que

cubren la costa Caribe, la costa Pacífica y las zonas insulares de acuerdo a antecedentes reportados por el INVEMAR en 2011, con estos se logró tener un panorama completo de la extensión de la erosión y los puntos críticos en cada uno de los departamentos costeros del territorio colombiano (como se citó en (Ricaurte Villota et al., 2018)).

Se han realizado investigaciones de diferentes playas en las costas colombianas, para la determinación de la erosión costera, por ejemplo, Cardona Pérez (2024) en el municipio de Manaure, La Guajira, tuvo como objetivo abordar la problemática de la erosión costera desde una perspectiva científica y de gestión del riesgo de desastres. Su investigación empleó una metodología mixta, integrando variables cualitativas y cuantitativas mediante técnicas de análisis documental, geoespacial y trabajo de campo. A través del SIG Arcgis Pro y la interpretación de imágenes satélite Landsat y Sentinel, se realizó la delimitación de la línea de costa. Con esa información se determinaron índices de erosión y acreción a través de la herramienta DSAS, así como tres zonas críticas con alta vulnerabilidad: el corregimiento de El Pájaro, las playas de Mayapo y el área urbana de Manaure. La importancia de llevar a cabo procesos de planificación, estudios de detalle, fomentar la educación y sensibilización ambiental, sistemas de monitoreo, alertas tempranas y la implementación de proyectos de adaptación se destacan como elementos clave para abordar de manera efectiva el problema de la erosión costera en la zona costera de Colombia, especialmente en La Guajira (Cardona Pérez, 2024).

Gran variedad de personas en Colombia y el mundo aprovechan la región Caribe de Colombia, para hacer turismo y ha experimentado un crecimiento acelerado en las últimas tres décadas, lo que ha coincidido con un incremento significativo de la erosión costera. Un estudio basado en análisis multitemporal de imágenes satelitales comprendido entre (1980–2014) y trabajo de campo, identificó que cerca del 50% de la línea costera presenta erosión activa, atribuida tanto a factores naturales —como el desequilibrio sedimentario, el aumento del nivel del mar y las olas extremas— como a causas antrópicas, incluyendo la construcción inadecuada de infraestructura y la destrucción de manglares. La erosión costera ha ocasionado no solo la pérdida de playa y deterioro del paisaje, sino también altos costos económicos en implementación de medidas de protección y/o mitigación de dicho fenómeno. Adicional que los hallazgos encontrados evidencian la necesidad de una planificación territorial más efectiva, alineada con una planificación espacial Marina y políticas de manejo sostenibles en pro del cuidado y protección de estas (Rangel et al., 2015).

Uno de los estudios que se centró en el análisis del cambio de línea de costa fue realizado en las Islas del Rosario, de la región Caribe colombiana, donde se identificó mediante un análisis de fotografías aéreas e imágenes satelitales entre los periodos de (1954–2007) cambios morfológicos significativos en las islas: Grande, Rosario y Tesoro. Los resultados develaron una pérdida de línea de costa del 6.7 %, 8.2 % y 48.7 %, respectivamente, atribuida principalmente a desequilibrios morfodinámicos. La erosión fue más fuerte se evidencio en las costas expuestas a oleajes, afectando aproximadamente el 85 % del litoral analizado. Aunque el proceso erosivo ha sido constante durante más de 50 años debido al oleaje y la elevación del nivel del mar, se concluye que la intervención humana ha intensificado los efectos morfológicos de la erosión (Ortega Aguas, 2022).

Siguiendo la anterior investigación, en esta misma zona la autora Ortega realizó un estudio complementario, pero en este caso analizando imágenes satelitales desde 2010 a 2021, en la misma área de estudio, donde se reveló que las tres islas (Grande, Rosario y Tesoro), presentan una alta perdida de playa y un aumento en el nivel del mar, generando una nueva geomorfología de terrazas, en estudio hace énfasis en la necesidad de realizar políticas gubernamentales para mitigar y prevenir la erosión en las islas que predominan los corales (Ortega et al., 2023).

Otro estudio realizado en el Caribe colombiano analizó los cambios en la línea de costa del Parque Nacional Natural Vía Parque Isla de Salamanca entre los años 2000 al 2020, mediante un análisis multitemporal con imágenes satelitales Landsat 7 y 8 y la herramienta DSAS en ArcGIS. Los resultados evidencian que el 88,78% de la zona litoral presenta procesos de erosión, especialmente en la vía Barranquilla a Ciénaga, mientras que un 11,22% presenta acreción, influenciada principalmente por los aportes sedimentarios del río Magdalena. Factores climáticos, oceanográficos, geológicos y antrópicos inciden en esta dinámica, generando vulnerabilidad en las geoformas costeras y afectando la infraestructura vial, lo que resalta la necesidad de un monitoreo continuo para la gestión y mitigación del riesgo costero (Dávila Martínez, 2020).

Lopera (2018) Se llevó a cabo un estudio detallado sobre la migración de la línea de costa en los acantilados blandos tropicales situados entre Minuto de Dios y Puerto Rey, al norte de Arboletes —en la frontera Antioquia–Córdoba—. Para ello, se compararon datos históricos de 1938, 2009 y 2014 con una nueva cartografía de 2017, generada desde fotografías aéreas capturadas por drones y procesadas en ArcMap mediante DSAS. Los resultados revelan que el sector al norte

de Puerto Rey presenta algunas de las tasas de erosión más altas del mundo, aunque no se observó aceleración en el retroceso costero entre 2009 y 2017 (Cardona Lopera, 2018).

La Universidad del Norte desarrollo un estudio donde García Laiton (2021), hizo un análisis integral del clima marítimo y los procesos morfodinámicos en la barrera costera de Puerto Velero, en el Atlántico desde 1979 hasta 2018. El estudio conto con datos de oleaje como, altura, periodo pico, dirección media y los componentes zonal y meridional del viento los cuales se ingresaron a un modelo conocido como WAVEWATCH III (WWIII) de la NOAA. Mediante imágenes satélites con resolución de 30 metros en software SIG ArcGIS Pro, se evaluó el proceso de erosión y acreción, concluyendo una la erosión fue de 65,05% y la acreción de 34,95%, esta costa presenta predominancia de erosión moderada (García Laiton, 2021).

De manera complementaria, el estudio realizado por Rivera Payares (2022) en Santa Verónica y Galerazamba, en el departamento de Bolívar, analizó los cambios en la línea de costa. Para ello, se digitalizaron líneas de costa provenientes de imágenes satelitales de Google Earth Pro correspondientes a los años 2012, 2013, 2016, 2019 y 2021. Asimismo, se utilizó la extensión DSAS como complemento del software ArcGIS para calcular las tasas de erosión y acreción. Por medio de una boya, al igual que el estudio anterior realizaron uso del programa WAVEWATCH III, donde se tomó datos de las características del oleaje. Con base en el análisis de la altura significativa y el período pico, se establecieron los parámetros necesarios para aplicar el modelo SWAN, con el fin de observar el comportamiento del oleaje en aguas someras. Los resultados evidenciaron que se presentaron tasas de erosión elevadas en los años 2013 al 2016 y 2016 al 2017, con valores de -1.93 m/año y -1.32 m/año, indicando retroceso de la línea de costa en ambos periodos, y se evidencia una leve acumulación de sedimentos (acreción) para el periodo 2016-2017. Se destaca, además, que la ocurrencia del huracán Matthew en 2016 influyó significativamente en los cambios observados en la línea de costa, lo cual pone en evidencia la influencia de eventos extremos en la dinámica litoral del Caribe colombiano (Rivera Payares, 2022).

Otro estudio que se acerca al análisis de la presente investigación fue la desarrollada por (Villa Ealo et al., 2023) en playa Galerazamba-Bolovar, para ello se digitalizaron las líneas de costa usando imágenes satelitales de Google Earth Pro entre los años 1990–2022. La erosión costera durante estos 33 años se evaluó con ArcGIS DSAS. Asimismo, se empleó una boya virtual para obtener datos de ERA5 (altura significativa, periodo pico y dirección del oleaje), los cuales fueron procesados con la herramienta CAROL y simulados en SWAN esto en modo estacionario.

Finalmente, se realizó un análisis de susceptibilidad a la erosión, considerando factores geomorfológicos, retrocesos costeros y dinámica del oleaje. Los resultados indican que aproximadamente el 85 % del área tiene susceptibilidad moderada a alta frente a la erosión.

En cuanto a la costa del pacífico también se registras zonas críticas, en el Choco, la localización de las poblaciones en la parte final de los drenajes, en sitios donde se combinan los procesos fluviales y marinos, los pone en alto riesgo, aún más si se tiene en cuenta que muchos de estos drenajes pueden tener un carácter torrencial favorecido por un valle estrecho y empinado entre las colinas y montañas próximas, en Tumaco para el puerto La Barra, se descubrió que debido a la infraestructura predomina el fenómeno de acreción afectando la navegabilidad (Cantero et al., 2024).

Otro estudio del pacífico analiza la variación de la línea de costa en la Isla del Morro, Tumaco, entre 2013 y 2023, mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG), imágenes satelitales y el software DSAS. Utilizando Google Earth Engine y el índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI por sus siglas en inglés), se delimitaron con precisión las líneas costeras y se identificaron áreas de erosión y acreción. Los resultados revelaron una dinámica costera compleja, con un 50% del área afectada por erosión alta, especialmente en el noreste y suroeste, mientras que un 36% mostró procesos de acreción (Sánchez & Arango, 2024).

Las anteriores investigaciones demuestran que estas variaciones reflejan la influencia de diferentes factores naturales extremos, resaltando la necesidad de implementar estrategias de gestión costera integradas, como defensas costeras, restauración de ecosistemas y monitoreo continuo (Neal et al., 2018), para mitigar los impactos y potenciar la resiliencia del entorno costero en cuanto a la erosión que presentan.

Un estudio que vincula los antecedentes con respecto a las soluciones de gestión costera, en el Caribe Sur de Costa Rica (Castillo chinchilla & Piedra Castro, 2024), desarrollaron un plan de acción que incorpora soluciones basadas en la naturaleza, adaptadas a las características específicas de playas arenosas en comunidades como Vizcaya, Estrella, Cahuita, Manzanillo y Gandoca. A través de grupos focales, se identificaron impactos críticos como la pérdida de arena, vegetación dunar y biodiversidad, así como consecuencias económicas reflejadas en la disminución del turismo. Una de las conclusiones más importantes, es la viabilidad que este expresa en cuanto a la ejecución de proyectos en costas vivas o soluciones basadas en la naturaleza.

2 Justificación

La erosión costera es un fenómeno natural que se ha convertido en una problemática mundial para las comunidades costeras (D. B. Angnuureng et al., 2025) generando pérdidas progresivas del litoral costero afectando componentes ecosistémicos, ambientales, sociales, culturales y económicos, esto como consecuencia de la acción de factores como el oleaje, las corrientes marinas y el nivel del mar (Fondo Acción & Omacha, 2022; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016; Rangel et al., 2015). En Colombia con más de 3000 km de costa en la región del Caribe y el Pacífico (Cifuentes & Campo, 2021; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016) problemática ha ido aumentando considerablemente, gracias a los efectos del cambio climático y a las intervenciones de las actividades humanas, como el crecimiento urbanístico sin control, la extracción de recursos minerales y la deforestación del ecosistema de manglar, entre otros. Es de gran importancia entender que este fenómeno no solo interviene los ecosistemas marinos y costeros, sino que también tiene una influencia directa de manera negativa sobre las comunidades y en los sectores económicos de estos territorios (Ricaurte Villota et al., 2018).

Colombia actualmente cuenta con una población aproximada de 53 millones de habitantes concentrados principalmente en las grandes ciudades del país (DANE, 2024). En Colombia, cerca del 11 % de la población habita en zonas costeras con tendencia creciente por la urbanización (Ministerio de Ambiente de Colombia, 2022), donde la gestión de la erosión puede generar conflictos entre uso público y propiedad privada, y aunque las causas naturales no se eliminan, sus efectos pueden mitigarse con medidas estructurales, no estructurales y la reducción de actividades humanas que la agravan (MADS, 2018).

Durante los últimos años la erosión costera ha ocasionado pérdidas considerables de terrenos, playas e infraestructuras habitadas en diferentes zonas costeras del país como en Cartagena, Santa Marta y Tumaco, causando impactos económicos, ambientales y sociales (Ricaurte, Morales, Gonzales, Daza, Casadiego, & López, 2022). También se debe tener en cuenta situaciones como la disminución de áreas turísticas, el desplazamiento de comunidades, afectación de infraestructuras esenciales y la degradación de ecosistemas como manglares, pastos marinos y áreas coralinas. A pesar de la gravedad del problema hasta el momento no existe en el país acciones concretas, como programas de prevención o mitigación de los efectos adversos de este fenómeno,

solo algunos trabajos puntuales le han puesto el foco a esta problemática (Contraloría General, 2024).

Estudiar el retroceso de la línea de costa en los últimos años en Playa Salguero, es una necesidad que han venido proclamando los habitantes del sector, tal y como se evidencia en la parte considerativa del decreto 092 del 3 de abril de 2023 (Distrito Turístico Cultural e histórico de Santa Marta, 2023) debido a la falta de planificación territorial y a los constantes soluciones fallidas para mitigar la erosión, como la construcción de estructuras duras (espolones o enrocados) para la protección costera sin tener en cuenta la dinámica litoral de toda la zona costera de Santa Marta, hechos que repercuten negativamente sobre las playas aledañas a la construcción de estas estructuras incluyendo Playa Salguero.

La comunidad ha manifestado su descontento reiteradamente a través de constantes alertas dirigidas a las autoridades ambientales, al INVEMAR y al Ministerio del Medio Ambiente, debido a los continuos cambios que ha sufrido la playa, principalmente por la erosión. En respuesta, INVEMAR ha emitido diversos conceptos técnicos desde 2016 para atender las solicitudes de la comunidad y veedurías, quienes están sufriendo las consecuencias de la pérdida de superficie de playa, fundamental para el turismo local y la economía. Además, se han documentado riesgos en la infraestructura, como cimientos expuestos de algunas edificaciones. A este escenario se suma la carencia de sistema de alcantarillado en la zona, cuyos desechos desembocan directamente en el mar, lo que podría agravar aún más la erosión costera (INVEMAR, 2021b, 2023a, 2024, 2025).

La presente investigación se enfoca en el análisis multitemporal de la línea de costa en el sector Playa Salguero (Santa Marta) durante el periodo 2016–2025, a partir de imágenes satelitales PlanetScope y ESRI disponibles con resolución espacial de 3 metros y 4 bandas multiespectrales. Este tipo de insumos permite trabajar con una escala cartográfica de análisis confiable cercana a 1:10 000, mientras que en los entornos SIG la escala de visualización empleada fue de 1:300 para facilitar la interpretación y el trazado detallado de la línea de costa.

La elección del periodo de estudio se definió a discreción del equipo investigador, considerando los años en los que la comunidad ha venido presentando quejas y solicitudes de revisiones técnicas en este sector, según los conceptos técnicos presentados por el INVEMAR (INVEMAR, 2016, 2021b, 2023b, 2024), como también la disponibilidad de imágenes con calidad y resolución homogénea en todo el intervalo temporal y la necesidad de abarcar un rango de años

suficiente para identificar patrones de cambio y tasas de retroceso, con el fin de aportar información útil para proponer alternativas de manejo y gestión. .

Finalmente estudiar los cambios en línea de costa en este sector es fundamental para dar un concepto de la gestión costera adecuada, asociado a soluciones sostenibles que permitan mitigar los impactos negativos de este fenómeno. Una mayor comprensión de sus causas y consecuencias ayudará a proteger las comunidades, conservar los ecosistemas estratégicos y garantizar la sostenibilidad económica en sectores como el turismo, la pesca y el comercio. Asimismo, este estudio contribuirá al desarrollo de políticas públicas y estrategias de adaptación frente al cambio climático, fortaleciendo la capacidad de las poblaciones costeras para enfrentar desafíos futuros. Por lo tanto, abordar esta problemática no solo responde a una necesidad ambiental, sino también a una prioridad social y económica para el sector.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Realizar un análisis multitemporal de la línea de costa en el sector Playa Salguero (Santa Marta) entre el periodo 2016 al 2025.

3.2 Objetivos Específicos

- Determinar la variación espacio temporal de la línea de costa mediante imágenes satelitales en el periodo 2016 a 2025.
- Calcular las tasas de erosión y acreción costera entre los años 2016 y 2025 con uso del aplicativo DSAS, mediante métricas cuantitativas obtenidas del análisis multitemporal.
- Identificar las zonas más susceptibles a procesos de erosión y acreción costera.
- Proponer recomendaciones de gestión costera, considerando posibles relaciones con factores naturales y antrópicos.

4 Marco Teórico

4.1 Erosión Costera

La erosión costera constituye un proceso geomorfológico mediante el cual la línea de costa experimenta retroceso o las playas pierden sedimentos, producto del desgaste que genera la energía de las olas en el material continental y los factores erosivos, tanto naturales como aquellos generados por la actividad humana (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2019). Esta dinámica erosiva adquiere una dimensión aún más compleja cuando se analiza dentro del contexto de los ecosistemas costeros, ya que las zonas costeras representan ecosistemas dinámicos a diferentes escalas temporales y espaciales con una gran importancia ecológica, social y económica, debido a que albergan una amplia biodiversidad y constituyen las principales fuentes de ingreso para los locales como la pesca, el turismo y el comercio (Akhter et al., 2024).

A diferencia de la erosión costera, la acreción costera es la aglomeración de material particulado y que supera la altura de las mareas, este material proveniente en su mayoría de sedimentos continentales, este proceso es propio de las de las costas bajas y permite la conservación y crecimiento de las de las playas entre otras acumulaciones costeras costeras (García Laiton, 2021).

Este fenómeno amerita atención por parte de la comunidad científica y las entidades gubernamentales para la prevención de desastres y las pérdidas económicas y ambientales. Es fundamental medir los diferentes factores antrópicos que afectan directamente el equilibrio del litoral y aceleran la erosión costera, como ejemplo, la construcción de estructuras tales como malecones y espolones, así como la urbanización descontrolada en superficies de playa. También es necesario incluir variables cuantitativas que representen las afectaciones indirectas como el cambio climático, que ha aumentado el nivel del mar y posiblemente la aparición de fenómenos como tormentas.

Para comprender los factores naturales que producen la erosión costera, es esencial comenzar por entender la dinámica litoral relacionada con las mareas, las que se producen por la fuerza que genera la gravedad del Sol y la Luna sobre la tierra junto con la inercia de la rotación de tierra en casos extremos ocurre la marea de sicigia que tienen entre 2 – 2.5m de diferenciada altura, un ejemplo se vivió en 2002 en la costa de Jambelí (Fuentes & Moncada, 2021).

El oleaje constituye un factor determinante en la dinámica costera. En la costa Caribe colombiana, las alturas significativas oscilan entre 3,2 y 4,7 m, con periodos de retorno de 5 a 10 años (Orejarena Rondón, 2021). Esta característica abre el tema de investigación hacia la cantidad de playa retirada después de eventos de oleajes fuertes y si estos retiran gran cantidad de material fino de la playa, ya que existe una relación directa entre el tamaño del grano de arena y la pendiente de la playa, observándose que playas con sedimentos más gruesos tienden a tener una mayor inclinación (McFall, 2019).

La energía producida por las corrientes marinas condiciona de forma importante la erosión de las zonas costeras, estas se forman por el calentamiento que produce la radiación sobre el agua y la atmosfera cerca al ecuador, esto crea diferencias de densidad (salinidad y temperatura) para posteriormente producir el desplazamiento de masas de agua. De acuerdo con Tognin et al., 2024 la fuerza de corte del fondo originada por la interacción entre corrientes mareales y oleaje ocasionan un factor preciso para procesos de erosión en las costas.

Con el fin de establecer los indicadores de erosión y acreción, es necesario realizar mediciones, como se mencionó en los antecedentes para este proceso metodológicamente es necesario en el uso de herramientas geoespaciales. El análisis multitemporal de la línea de costa mediante imágenes satelitales se ha consolidado como una herramienta fundamental para evaluar la evolución de la erosión costera y sus tasas de cambio (Al-Attar & Basheer, 2023; Imam et al., 2024).

A través del uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y herramientas como ArcGIS y QGIS, es posible procesar y analizar series temporales de imágenes para calcular información cuantificable que permiten precisar las tasas de cambios a lo largo del tiempo y el espacio (Akhter et al., 2024; Zoysa et al., 2023). ArcGIS Pro es una aplicación de escritorio desarrollada por ESRI para el análisis, visualización y gestión avanzada de información geográfica, forma parte de la plataforma ArcGIS y permite trabajar con datos vectoriales y ráster, integra múltiples fuentes de información espacial, realizar análisis geoespaciales complejos y generar productos cartográficos de alta precisión (ESRI, n.d.).

4.2 Teledetección y herramientas SIG

La teledetección se traduce como la obtención de información sobre objetos o fenómenos en la superficie terrestre sin necesidad de estar presentes en el sitio, mediante el uso de imágenes satelitales y diversas técnicas de procesamiento (Marco Dos Santos et al., 2022). Esta se basa en los insumos generados por los sensores remotos instalados en los satélites, los cuales almacenan en sus píxeles distintos rangos de radiación electromagnética, permitiendo identificar detalles que el ojo humano no puede detectar (De la Cruz & Muñoz, 2016).

Existen tipos de sensores remotos, el primero de ellos, son los pasivos, que dependen de la energía solar y captan la radiación reflejada por la superficie terrestre, aunque su calidad puede verse afectada por la nubosidad (Jacobo et al., 2024), como es el caso de los satélites IKONOS, LANDSAT e IRIS; y los otros son los activos, que emiten su propia energía hacia la superficie y registran el retorno de esta, lo que les permite operar independientemente de la iluminación solar. No obstante, sus productos suelen ser más costosos y requieren equipos especializados para su procesamiento (Rosero Dávila & Tamayo Erazo, 2016), como en el caso de RADARSAT, ERS o JERS.

La capacidad de un sensor para registrar información se determina por cuatro tipos de resolución: espacial (tamaño del píxel en una imagen; a menor tamaño, mayor detalle), espectral (número y ancho de las bandas espectrales captadas), radiométrica (precisión en la detección de energía electromagnética, expresada en bits; por ejemplo, 8 bits = 256 valores o 10 bits = 1024 valores) y temporal (frecuencia de captura de imágenes en un mismo lugar) (Andreu et al., 2018).

En cuanto a las plataformas de descarga de imágenes satelitales, destacan Earth Explorer del U.S. Geological Survey, que ofrece acceso a imágenes históricas y recientes de misiones como Landsat y Sentinel-2, y el programa europeo Copernicus, que mediante el portal Open Access Hub brinda acceso a imágenes ópticas y de radar provenientes de los satélites Sentinel, útiles para análisis multitemporales, estudios ambientales y gestión del riesgo cuando el acceso de recursos financieros es limitado (*Copernicus*, n.d.).

De manera similar, Planet ofrece a través de su plataforma Planet Scope acceso a imágenes de alta resolución generadas por su constelación de satélites. Si bien se trata de un servicio comercial, la empresa permite la descarga de imágenes mediante cuentas educativas, lo que facilita su uso en proyectos académicos y de investigación como es el caso del presente trabajo (Planet Lab Inc, 2023).

Estas imágenes constituyen los insumos necesarios para el análisis espacial mediante herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica), entre las que sobresale el Digital Shoreline Analysis System (DSAS), desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) (Himmelstoss et al., 2024) para monitorear las líneas de costa a nivel mundial.

4.3 Digital Shoreline Analysis System (DSAS)

El DSAS es un aplicativo de SIG diseñado específicamente para evaluar la evolución de las líneas de costa, a través de cálculos estadísticos sobre las tasas de cambio a partir de múltiples posiciones históricas, ofreciendo un análisis detallado y cuantitativo de los procesos de erosión y acreción en intervalos de tiempo definidos (Sánchez & Arango, 2024).

El sistema funciona a partir de una línea base definida por el usuario, desde la cual se proyectan transectos perpendiculares hacia las distintas líneas de costa digitalizadas en diferentes fechas. De esta manera, DSAS calcula la distancia entre cada posición histórica y la línea base, integrando además información sobre la fecha y la incertidumbre posicional de cada línea (Centro de Ciencias Marinas Y Costeras Woods Hole, 2024).

En su versión más reciente, DSAS v6, la herramienta automatiza la generación de transectos, el cálculo de tasas de cambio y la estimación de incertidumbres asociadas, proporcionando métricas robustas y estandarizadas para el análisis del retroceso o avance costero (Himmelstoss et al., 2024) aportando de manera ágil, el monitoreo de entidades como el INVERMAR.

Entre las métricas que arroja el DSAS se encuentran el Net Shoreline Movement (NSM), que mide la distancia total de cambio entre la posición más antigua y la más reciente de la línea de costa; el End Point Rate (EPR), que calcula la tasa de cambio dividiendo la distancia NSM entre el número de años transcurridos entre las dos fechas extremas; y el Linear Regression Rate (LRR), que estima la tasa de cambio ajustando una recta de regresión a todas las posiciones históricas, lo cual permite reducir la influencia de valores atípicos y considerar múltiples fechas de análisis (Himmelstoss et al., 2021).

En conclusión, la combinación de la teledetección, las plataformas de acceso a imágenes satelitales y las herramientas SIG y aplicativos como el DSAS, constituye un soporte metodológico para el análisis de la dinámica costera. El uso de métricas como el NSM, EPR y LRR permite

cuantificar con precisión los procesos de erosión y acreción, identificar tendencias espaciales y temporales y aportar información confiable para la gestión territorial. En el contexto de esta investigación, estas herramientas resultan esenciales para comprender la evolución de la línea de costa en Playa Salguero, generar evidencia importante desde un ejercicio académico, permitiendo fortalecer la comprensión del territorio y aportando insumos para la toma de decisiones y planificación costera.

5 Metodología

Para determinar la evolución de la línea de costa entre el periodo 2016 al 2025 del área de estudio y comprender la dinámica de los procesos que la afectan, se empleó un método de investigación cuantitativa mediante herramientas geoespaciales. Este enfoque metodológico posibilita analizar de manera sistemática los datos obtenidos a partir de imágenes satelitales como fuente principal de datos de descarga libre, además, utilizando herramientas de SIG como ArGis, QGIS y aplicaciones como DSAS, para el desarrollo e interpretación de la información. El análisis multitemporal de la línea de costa permite evaluar los cambios espaciotemporales que ocurren en el límite tierra-mar, usando estadísticas específicas que permiten cuantificar las tasas de cambios a lo largo del tiempo y el espacio (Akhter et al., 2024). Diferentes autores que han realizado estudios sobre la evolución de la línea de costa desde los años 90 hasta la actualidad sugieren que la línea de más alta marea es el mejor indicador de la interfaz agua-tierra (Cui et al., 2022; Himmelstoss et al., 2024; Latif & Yong, 2021; Moore, 2000; Wang et al., 2024) Esta definición es la empleada en el presente estudio, teniendo en cuenta la discreta influencia de las mareas en el Caribe colombiano y la poca o nula sinuosidad de la costa en este sector en particular.

Para realizar el análisis multitemporal de la línea de costa en el sector de Playa Salguero, se ejecutaron una serie de fases, las cuales se presentan de manera organizada en un esquema metodológico (**Figura 2**). Cada una de las fases incluyen procedimientos y actividades orientados a alcanzar los resultados esperados en función de los objetivos planteados en este trabajo.

- **Fase 1: Descarga de imágenes satelitales**

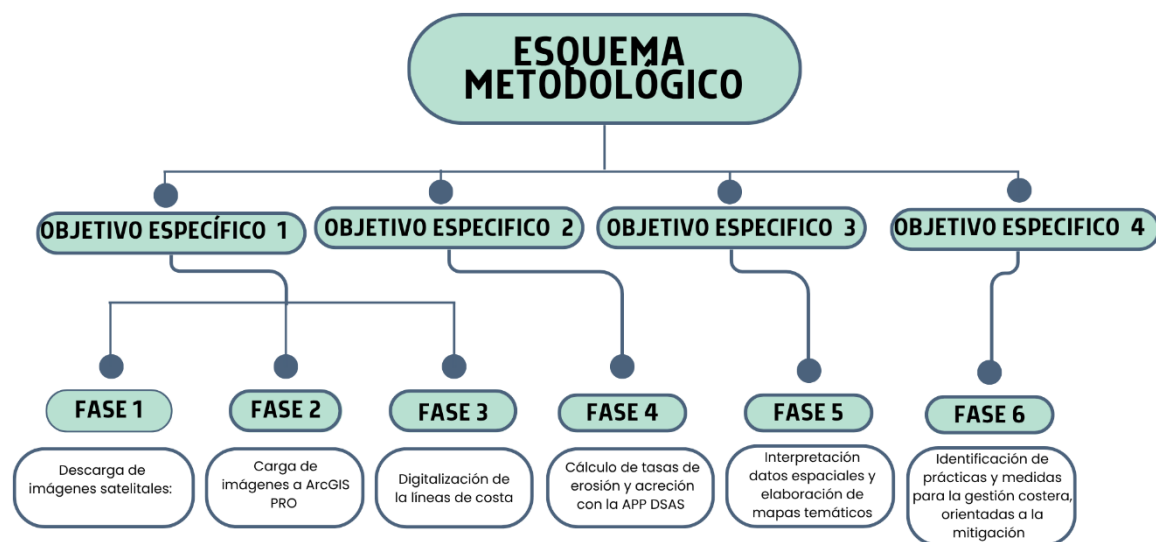
Las imágenes satelitales se obtuvieron a partir de la descarga en la plataforma Planet Explorer, la cual es una interfaz web desarrollada por la empresa Planet Labs Inc. Esta plataforma permite visualizar, filtrar y descargar imágenes multispectrales captadas por la constelación satélite Dove, con una resolución espacial de 3m (Planet Lab Inc, 2023). Para obtener la descarga de las imágenes es necesario registrarse con un correo institucional. De esta plataforma se descargaron imágenes del año 2017 al 2024 en formato GeoTIFF.

Otra plataforma que se utilizó para descargar imágenes fue la de World Imagery Wayback del ArcGIS Living Atlas, la cual es una herramienta para visualizar y descargar versiones pasadas del servicio de mapas satelitales de World Imagery de Esri, (ESRI, n.d.), de esta página se descargó

las imágenes de los años 2016 y 2025. Como criterio principal para la selección de las imágenes, se procuró que todas correspondieran, en lo posible, al mismo mes de captura en cada año, esto con el fin de garantizar condiciones climáticas similares en el área de estudio. Cabe anotar que también se consideraron fuentes como Sentinel, USGS y Copernicus, pero debido a la baja resolución espacial, estas imágenes fueron descartadas.

Figura 2

Esquema metodológico planteado para el desarrollo de la metodología, en los cuales se estiman 6 fases para ejecutarla.



● Fase 2: Carga de imágenes a ArcGIS PRO

Una vez descargada las imágenes, se procedió a cargarlas en ArcGIS Pro. La incorporación de las imágenes en el entorno de trabajo del software se realizó a través del panel *catalog* desde donde se accede a la ubicación del GeoTIFF en disco del ordenador, se arrastra la imagen a el mapa de trabajo de la interfaz del programa.

Tabla 1

Características de las imágenes a descargar

Característica	Detalle
Sensor	Óptico multiespectral
Resolución espacial	3 m
Nubosidad	< 10%
Período de tiempo	2016-2025

- **Fase 3: Digitalización de la línea de costa**

La digitalización de la línea de costa de cada una de las imágenes satelitales descargadas en los diferentes años, se realizó siguiendo el criterio del límite húmedo/seco visible en las imágenes, este método, aunque subjetivo ha sido ampliamente utilizado en estudios de dinámica litoral debido a su capacidad para adaptarse a condiciones particulares del terreno y la variabilidad del entorno costero (Himmelstoss et al., 2024; Wang et al., 2024; Cui et al., 2022; Latif & Yong, 2021). En el caso de Playa Salguero, es un escenario propicio para aplicar este criterio, pues su morfología rectilínea de poca sinuosidad, junto con las fluctuaciones mareales casi imperceptibles, facilita la digitalización manual de un trazado lineal siguiendo el límite húmedo – seco (Himmelstoss et al., 2024; Wang et al., 2024; Cui et al., 2022; Latif & Yong, 2021).

Para digitalizar las líneas de costa en ArcGIS PRO, se utilizó la herramienta Create Features en un shapefile o feature class de tipo polilínea, trazando manualmente el límite húmedo-seco o el borde visible del mar, teniendo en cuenta algún contacto con infraestructuras o vegetación permanente. La precisión espacial se aseguró aplicando un zoom visual a escala 1:300 para facilitar la identificación del criterio húmedo – seco.

Asimismo, fue necesario trazar una línea base de referencia, con una distancia fija de 200 m hacia la tierra (onshore), siendo este un requisito fundamental solicitado por el aplicativo DSAS para determinar las tasas de cambio de la línea de costa.

Luego de digitalizadas las líneas, en la tabla de atributos se crearon algunos campos (**Tabla 2**), los cuales son necesarios para la carga de los archivos de la línea de costa en el DSAS. Las líneas de costa se unieron en una sola capa por medio del geoproceto *Merge*, cuya función es unir dos o más entidades con el mismo tipo de geometría. De esta capa resultante, se procedió a convertirla en un formato tipo GeoJSON, cuya extensión es el tipo de archivo que lee el DSAS. Para convertir la capa en GeoJSON se sigue la siguiente ruta: Caja de herramientas (Toolbox) > Conversion Tools > JSON > Features To JSON, esto con el fin de continuar el proceso hacia la fase 4.

Tabla 2*Campos agregados a la tabla de atributos de las líneas de costa*

Campo	Tipo
Shape Leng	Double
Fecha	Texto
ID	Double
Incertidumbre	Largo

- **Fase 4: Cálculo de tasas de erosión y acreción**

Para la estimación de las tasas de erosión y acreción en Playa Salguero, se utilizó la aplicación informática de acceso libre *Digital Shoreline Analysis System (DSAS)* por sus siglas en inglés), la cual funciona con los softwares de Sistemas de Información Geográfica de ESRI (ArcGIS PRO). El DSAS es el método más tradicional y ampliamente usado para determinar los cambios de la línea de costa (Imam et al., 2024, Castillo-Chinchilla et al., 2023; Cui et al., 2022; Castillo Charris & Gamarra Mendoza, 2014). Instituciones como INVEMAR utilizan esta herramienta para hallar las tasas de acreción y erosión en la Operación Estadística Índice de Erosión Costera Colombia (OE -IECC) la cual se encuentra en su proceso de acreditación por parte del DANE (Ricaurte, et al., 2022). La función de la aplicación es calcular las estadísticas de la tasa de cambio de una serie temporal de datos vectoriales de la línea de costa, por medio de transectos trazados entre una línea base y las diferentes líneas de costa, cada transecto tiene puntos de intersección con las diferentes líneas (Cui et al., 2022; Himmelstoss et al., 2021). En el caso de Playa Salguero el DSAS trazo 215 transectos con una separación de 10 m (entre transectos). Según el manual del aplicativo (Himmelstoss et al., 2021) la aplicación mide la distancia que hay desde la línea base hasta la serie temporal de los datos de la línea de costa, es decir hasta las intersecciones entre las líneas de costa y los transectos, esta distancia sirve para calcular las estadísticas de tasa de cambio como: el Movimiento Neto de la Línea de Costa (NSM) que mide la distancia en metros entre la línea de costa más antigua y la más reciente; la Tasa de Punto Final o tasa de erosión y acreción (EPR), que divide la distancia del movimiento de la costa por el número de años transcurridos entre las dos posiciones y la Distancia Máxima de Desplazamiento (SCE), que mide la mayor distancia en metros de todas las líneas de costa (**Figura 3**). Otra estadística que genera el programa es la Tasa de Regresión lineal (LRR), esta estima la tasa de cambio aplicando la fórmula

de regresión lineal, calculando mínimos cuadrados a todas las posiciones temporales como se explica en la **Figura 4**.

En la **Tabla 3** se presenta un resumen de las métricas calculadas por el DSAS, las fórmulas aplicadas y las variables asociadas a estas, para dar una mejor comprensión de cómo es el procedimiento establecido por la herramienta para determinar las tasas y movimientos de la línea de costa.

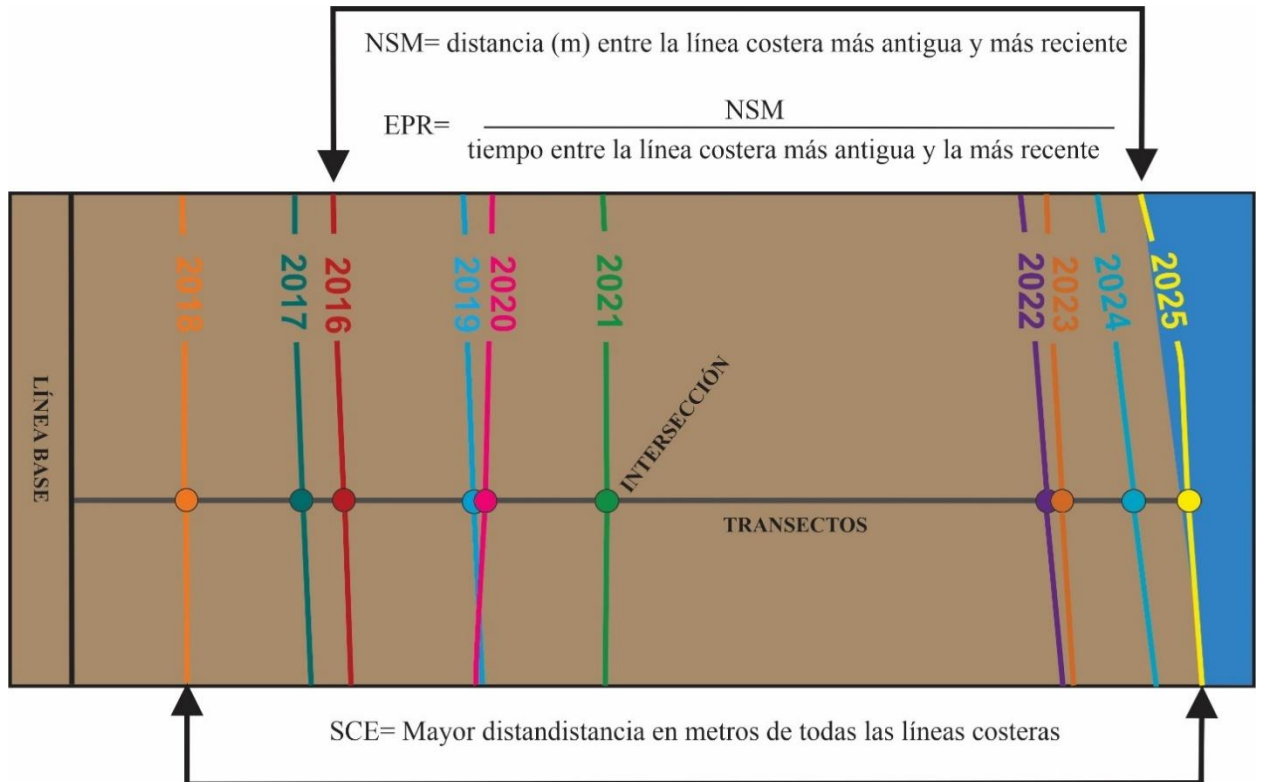
Tabla 3

Descripciones de las fórmulas y variables utilizadas por el DSAS calcular las métricas de movimiento y tasas de cambio de la línea de costa.

Métrica	Descripción	Fórmula	Variables	Observaciones
NSM: Movimiento Neto de la Línea de Costa	Mide la distancia neta entre la línea de costa más antigua y la más reciente sobre un transecto.	$NSM = d$	d= Distancia entre líneas en metros	No considera tiempo, solo desplazamiento
EPR: Tasa de Cambio en Puntos Extremos	Calcula la tasa de cambio dividiendo la distancia neta por el tiempo transcurrido.	$EPR = \frac{d}{t}$	d: Distancia (m) t: tiempo (años)	Usa solo dos fechas inicio y final.
LRR: Tasa de Regresión lineal	Estima la tasa de cambio aplicando regresión lineal de mínimos cuadrados a todas las posiciones temporales.	$y = at + b$	y= Posición a= Pendiente = tasa de cambio (m/año) t= tiempo (años) b=Intercepto	Usa todas las líneas de costa disponibles y permite calcular error estándar e intervalos de confianza.
SCE: Distancia Máxima de Desplazamiento	mide la mayor distancia en metros de todas las líneas de costa	$SCE = Dmax$	Dmax= Diferencia máxima entre posiciones de líneas de costa	Mide la variabilidad máxima, sin tener en cuenta el tiempo. Refleja la amplitud del cambio espacial.

Figura 3

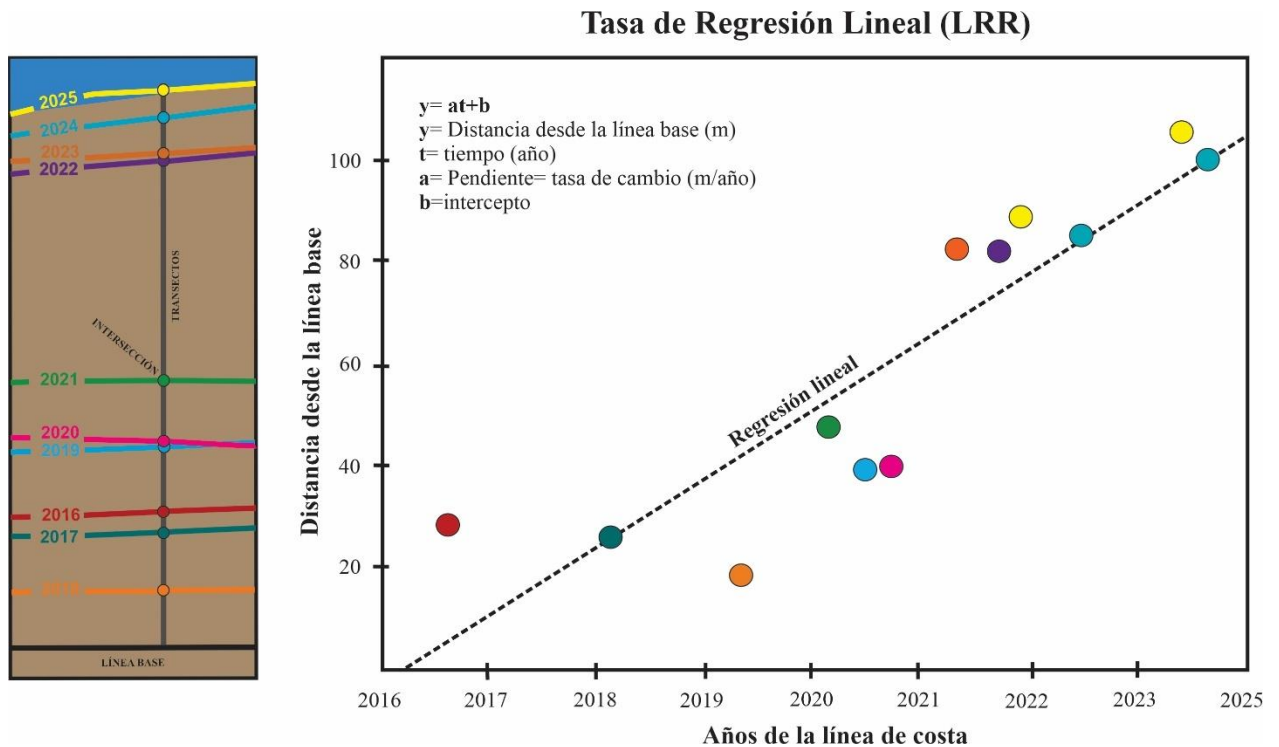
Figura explicativa de como el DSAS mide la variación de la línea de costa en el tiempo usando transectos y los indicadores que calcula. Línea base en color negro, transecto en color gris, en líneas multicolores las diferentes líneas de costa y en círculos de colores las intersecciones entre el transecto y las líneas.



Nota: Imagen modificado de Himmelstoss et al., (2021).

Figura 4

Figura explicativa de la aplicación de la fórmula de regresión lineal realizada por el DSAS para calcular la tasa de LRR.



- **Fase 5: Interpretación de datos espaciales, elaboración de mapas temáticos**

Una vez obtenida los porcentajes de erosión y acreción se continuó con la interpretación de estos datos. Para esto, se partió de la premisa de que los cambios en la superficie terrestre costera están directamente relacionados con los cambios en la posición de la línea de costa, es decir, cuando la línea de costa avanza hacia el mar, acrecienta la superficie terrestre y cuando la línea de costa retrocede hacia la tierra se disminuye la superficie terrestre, es decir ocurre erosión. La representación de estos resultados será indicada con signo negativo a los valores que señalen erosión o pérdida de terreno y valores con signo positivo cuando se indiquen acreción o ganancia de terreno.

Para evaluar estos cambios, se valoró el área total de playa existe actualmente y se generó polígonos que plasmen los contrastes entre las zonas de pérdida y ganancia de playa según los resultados arrojados por el DSAS, obteniendo una visión completa de que las zonas que sufrieron erosión y acreción en el sector y evaluando la dinámica en la costa durante el periodo analizado.

El resultado, es un mapa temático con las zonas más susceptibles a la erosión y acreción en la playa Salguero.

- **Fase 6: Identificación de prácticas y medidas para la gestión costera, orientadas a la mitigación**

Para la identificación de prácticas y medidas de mitigación, se llevó a cabo una búsqueda sistemática de información secundaria proveniente de fuentes bibliográficas, estudios técnicos y documentos institucionales como los informes anuales del estado de los ambientes Marino y Costeros en Colombia y conceptos técnicos, del INVERMAR.

Esta revisión se enfocó en identificar literatura sobre factores tanto naturales como antrópicos. Entre los factores naturales se consideraron las condiciones geológicas, climáticas, hidrológicas y geográficas del área de estudio, tales como la dinámica de la línea de costa, el tipo de suelo, la topografía, los patrones de precipitación y la exposición al oleaje.

En cuanto a los factores antrópicos, se incluyeron aspectos relacionados con las actividades humanas, como la ocupación del territorio, la urbanización, las infraestructuras costeras (muros, espolones, vías), las obras de protección, el manejo del saneamiento básico y el uso del suelo. Esta recopilación de información permitió establecer un diagnóstico integral del contexto físico y social de la zona, que sirvió de base para proponer recomendaciones de gestión costera adaptadas a las condiciones específicas del entorno.

Finalmente, para dar cumplimiento al objetivo específico número 4, se optó por una metodología cualitativa y analítica, que se basó en el cruce de información técnica, bibliográfica e institucional, junto con los resultados del análisis de la línea de costa desde 2016 hasta 2025. Esto se dividió en tres fases:

La primera fase consiste en un análisis de patrones de erosión y acreción. Se uso los datos del análisis de la línea de costa, que se obtuvo con la herramienta DSAS, para identificar áreas críticas donde había cambios significativos. Con esto, se creó la línea base para comparar con estudios previos desarrollados por instituciones como INVEMAR, especialmente sobre cómo funciona la dinámica sedimentaria y estructuras como los espolones, afectan el transporte de estos en la costa.

En la segunda fase se realizó una revisión documental para encontrar factores naturales, como el oleaje, la geomorfología, nivel del mar, eventos extremos y factores antrópicos, como la

urbanización costera, obras de ingeniería, contaminación y la presión del turismo, que de alguna manera están afectado en cierta medida a los pobladores de esa zona. Se investigaron fuentes oficiales y literatura científica que se mencionan en la tala anterior para entender mejor la relación que existe entre dichos factores y se darán las posibles soluciones o recomendaciones basado en la literatura consultada.

Por último, en la tercera fase, se revisaron casos de estudio y documentos técnicos tanto nacionales como del extranjero sobre Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) y estrategias híbridas para luchar contra la erosión costera.

6 Resultados

Los resultados obtenidos a partir del desarrollo de las fases metodológicas descritas anteriormente, que responden a los objetivos específicos planteados en este trabajo y permiten evidenciar la evolución de la línea de costa en playa Salguero, se presentan a continuación.

6.1 Fases 1, 2 y 3 - Variación Espacio Temporal de la Línea de Costa

Para determinar la variación espacial de la línea de costa se descargaron 10 imágenes satelitales del año 2016 hasta el 2025, obtenidas de las plataformas de acceso libre Planet Scope y World Imagery Wayback (**Tabla 4**). Las imágenes fueron analizadas en software ArcGIS PRO, donde se llevó a cabo la digitalización manual de 10 líneas costa relacionadas con el periodo establecido (**Figura 5**). El trazo de las líneas se realizó siguiendo visualmente el criterio del límite húmedo-seco, el cual es considerado como una aproximación estándar para una representación precisa de la línea de costa. Posteriormente, a cada línea se le asignaron los atributos requeridos, donde se incluyó campos como la fecha, el ID y el nivel de incertidumbre, este último basado en la resolución y calidad de la imagen. La creación de estos campos en la tabla de atributos fue realizada con el fin de cumplir con los requisitos del DSAS, permitiendo así la incorporación al entorno de análisis y desarrollo de los cálculos de las tasas de cambio en la aplicación.

Tabla 4

Información de las imágenes satelitales descargadas para la digitalización de las líneas de costa.

Año	Fecha	Fuente	Resolución
2016	12-20-2016	World Imagery Wayback de Esri	1m
2017	09-16-2017	Planet Scope	3m
2018	09-09-2018	Planet Scope	3m
2019	09-14-2019	Planet Scope	3m
2020	09-15-2020	Planet Scope	3m
2021	09-27-2021	Planet Scope	3m
2022	09-08-2022	Planet Scope	3m
2023	08-01-2023	Planet Scope	3m
2024	09-18-2024	Planet Scope	3m
2025	02-02-2025	World Imagery Wayback de Esri	1m

Figura 5

Imágenes satelitales y líneas de costa (en color amarillo) de Playa Salguero, entre los años 2016 al 2025.



6.2 Fase 4 - Tasas de Erosión y Acreción

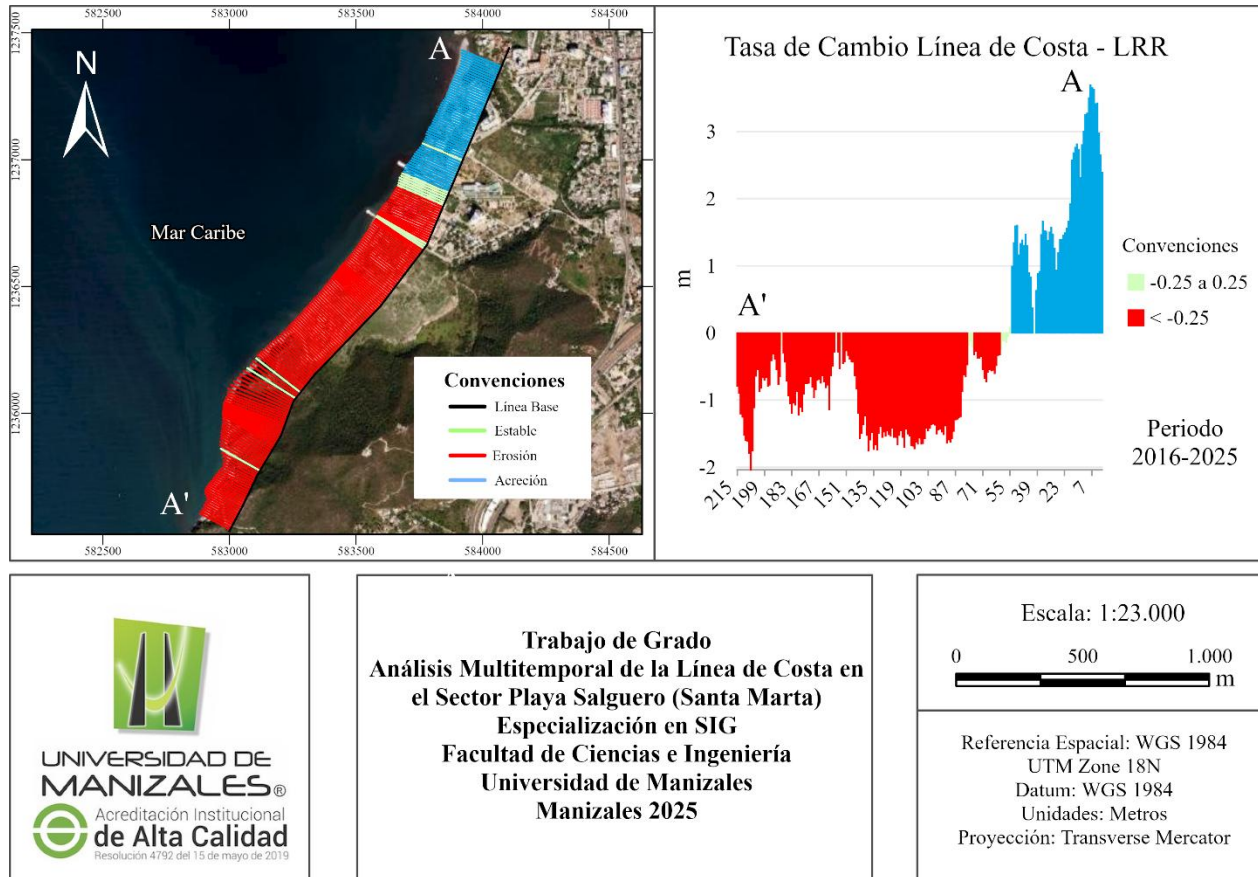
Las tasas de erosión y acreción del área de estudio fueron obtenidas por medio de la herramienta DSAS. La aplicación trazó 215 transectos espaciados cada 10m entre las diferentes líneas de costa y la línea base, con el fin de calcular los parámetros estadísticos, para el caso de Playa Salguero, se tuvieron en cuenta dos métricas principalmente para el análisis, obtenidas de la herramienta DSAS las cuales son: las tasas de cambio o regresión lineal (LRR) y el movimiento neto de la línea de costa (NSM) en los periodos establecidos (**Figura 6**). Cabe señalar que no se tuvieron parámetros como el EPR porque solo toma en cuenta la línea de costa inicial y la final y estos resultados no son muy relevantes para un análisis histórico como el que se quiso analizar en Playa Salguero, el cual es un análisis multitemporal de 10 líneas de costa, es decir en un periodo de 10 años (2016-2025).

Según los resultados alcanzados, el LRR o tasa de cambio de la línea de costa en Playa Salguero muestra un promedio de erosión costera de $-0,26$ m/año (**Figura 6** y **Tabla 5**), indicando que la línea de costa retrocede 26 cm por año. De los 215 transectos 159 revelaron una tendencia erosiva (**Tabla 5**) lo que equivale al 73,95% de toda el área, esta tendencia es reflejada mayoritariamente hacia el centro y sur de la playa (**Figura 6**). La máxima tasa de erosión (LRR) se dio en los transectos dispuestos al sur de la playa en Punta Gloria, con un máximo de $-2,02$ m/año, es decir 2,02 m por año en este sector y está relacionado con el año 2025 (**Figura 6**).

En términos de acreción, el 26,05% (**Figura 6** y **Tabla 5**) que corresponden a 56 de los transectos sugieren un aumento en la depositación de sedimentos en la playa, reflejados claramente hacia la parte norte de la costa, coincidiendo con la desembocadura del río Gaira (**Figura 6**). El promedio entre los periodos donde ocurrió aumento en la depositación de sedimentos en la playa es de $1,82$ m/año, siendo el $3,69$ m/año el pico máximo de acumulación, cuyo valor corresponde a el año 2023.

Figura 6

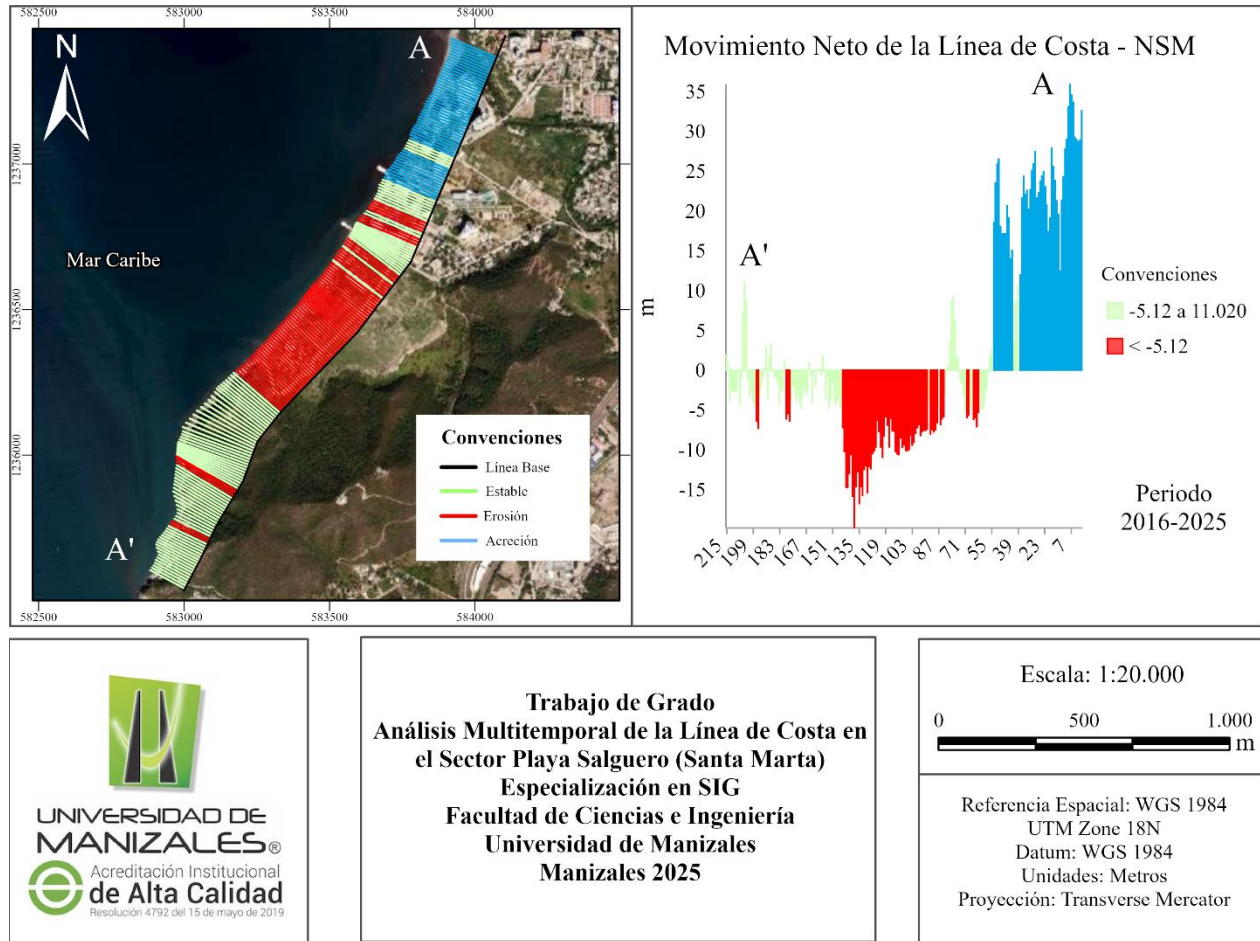
Tasas de cambio (LRR) de la línea de costa en playa Salguero, periodo 2016 al 2025.



En general el promedio de movimiento neto de la línea de costa (NSM) fue de 2,02 m ya sea distancias negativas o positivas, de los 215 transectos analizados, 136 reflejan un movimiento negativo, es decir un retroceso de la costa y esto equivale a 63,26% (**Tabla 5** y **Figura 7**). Asimismo, el NSM da un promedio de desplazamiento negativo de -6,23 m y la distancia máxima alcanzada negativamente es de -19,82 m, coincidiendo con el extremo noreste de la saliente de Punta Gloria y esta reportada para el año 2025 (**Figura 7**). El 36,74% del área expresa un desplazamiento positivo, con un promedio de movimiento neto (NSM) de 16,21 m y un pico máximo de movimiento de 35,92 m hacia la desembocadura del río Gaira (**Figura 7**), cuyo valor máximo de movimiento se refleja en la línea de costa del año 2023.

Figura 7

Movimiento neto de la línea de costa (NSM) en playa Salguero, periodo 2016 al 2025.



La distancia máxima de desplazamiento de la línea de costa (SCE) corresponde a 50,32 m (Tabla 5), ubicada en la desembocadura del río Gaira. Este comportamiento se asocia a la significativa descarga de sedimentos fluviales, que modifica de manera directa la dinámica litoral y condiciona procesos de acreción y erosión en este sector.

Tabla 5*Categorías de tendencia de evolución de la línea de costa en Playa Salguero*

Categorías	Unidades	Erosión	Acreción
LRR	m/año	-0,26	1,82
	%	73,95	26,05%
	N° Transectos	159	56
NSM	m	-6,23	16,21
	%	63,26	36,74
	N° Transectos	136	79
SCE	N° Transecto de mayor distancia		19
	Mayor distancia en metros		50,32

De acuerdo con los resultados anteriores, la evolución de la línea de costa entre el periodo 2016 y 2025 evidencia que playa Salguero está dominada por procesos erosivos, ya sea por la ocurrencia de dichos procesos o por la extensión espacial. Según el análisis multitemporal, la tasa media de erosión de -1 m/año y la tasa máxima -2,04 m/año, así como el promedio de movimiento negativo de la línea de costa -6,23 m y la máxima de -19,82 m se dan mayoritariamente hacia la saliente de Punta Gloria (**Figura 6** y **Figura 7**), haciendo que este sector pierda terreno casi 2 m por año. Esto podría estar relacionado con la construcción de las obras de protección (espolones) iniciadas en agosto del año 2023 y que según el análisis se evidencia un aumento tanto en las tasas de erosión como en el retroceso de las líneas de costa para los años posteriores, es decir entre los años 2024 y 2025, periodo en el que se evidencia picos altos de estas tendencias.

Sin embargo, es de anotar que los procesos de acreción en algunos sectores, sobre todo hacia el costado derecho de los espolones y desembocadura del río Gaira (**Figura 6**), señalan tasas de sedimentación media de 1,82 m/año y una máxima de 3,69 m/año, lo que demuestra valores relativamente altos. La influencia de la dinámica fluvial del río Gaira y su aporte de sedimentos podría estar estrechamente relacionado con la presencia de tasas más altas en cuanto al avance de la playa en este sector.

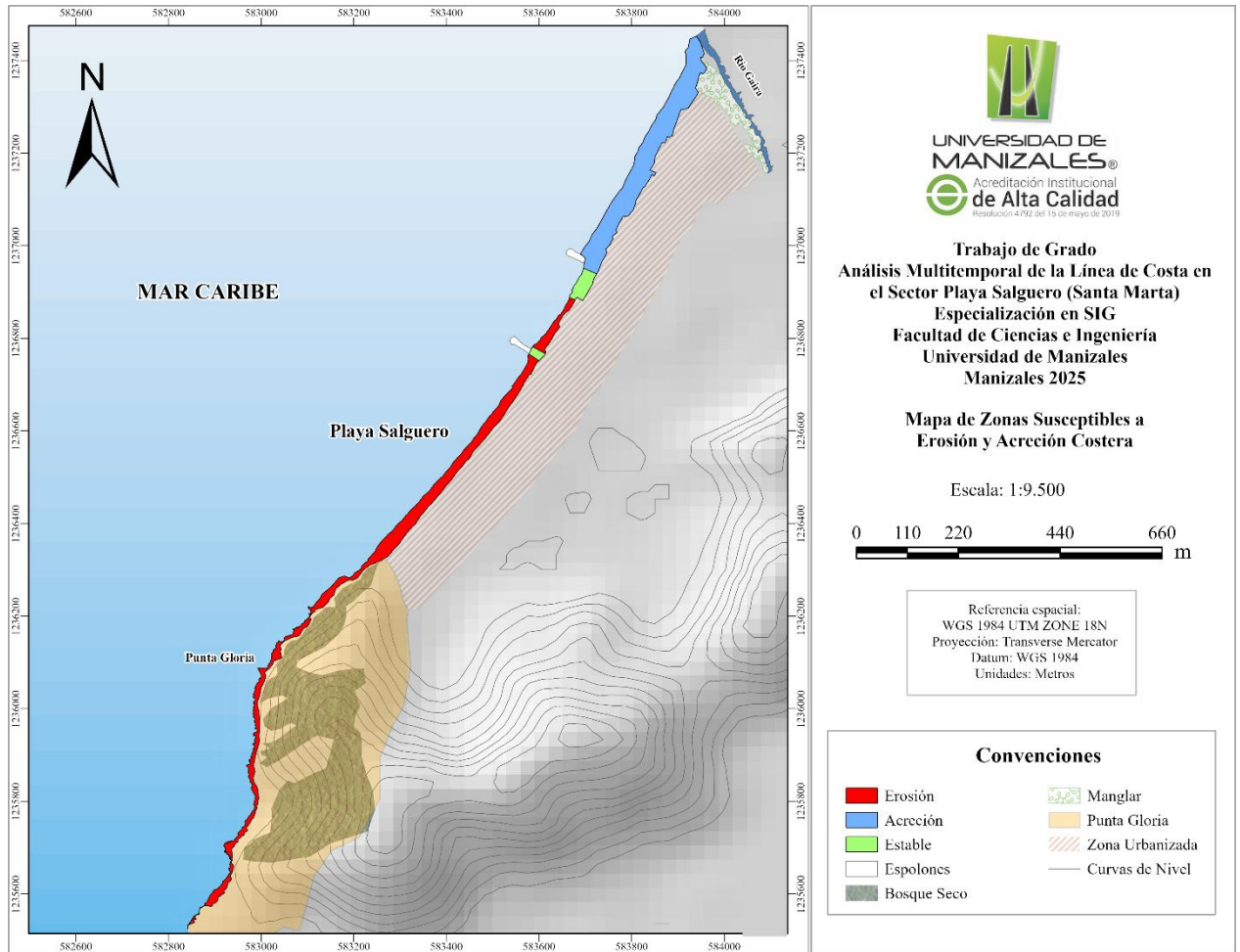
6.3 Fase 5 - Zonas Susceptibles a Procesos de Erosión y Acreción

Según los resultados del análisis multitemporal de la línea de costa de Playa Salguero se elaboró un mapa temático para representar las zonas susceptibles a los fenómenos destructivos como la erosión y a los acumulativos como la acreción costera (**Figura 8**). En análisis apunta a que la evolución de la línea de costa en esta playa está aumentando en el centro y sur, siendo el sector de Punta Gloria la geoforma costera saciada a la playa más afectada (**Figura 8**). Las tasas de erosión indican que el punto máximo de erosión se presenta allí mismo y según el periodo analizado (2016-2025) la erosión aumenta después del año 2023 y está relacionado con la construcción de unos espolones los cuales al parecer fueron implementados sin el debido estudio técnico y sin tener en cuenta la dinámica costera de todo el litoral adyacente, como lo son Punta Gloria, Cabo Tortuga, playa Pozos Colorados entre otros ubicados al sur y playa Rodadero y Bahía de Santa Marta al norte. Es de anotar que Punta Gloria es una morfología costera de origen volcánico, el cual es un importante punto ecológico dentro de la ciudad de Santa Marta y alberga especies de bosque seco. El área total del polígono que señala la zona susceptible a erosión en Playa Salguero (**Figura 8**), el cual fue trazado teniendo en cuenta el ancho actual de la playa es de 25237, 2 m².

Las tasas de acreción costera según el análisis multitemporal reflejan un aumento de acumulación hacia la parte norte de la playa, específicamente en el área de la desembocadura del río Gira. Esta área se extiende desde la boca del río hasta el costado noreste del primer espolón que se encuentra viniendo de este (**Figura 8**). La acumulación de sedimentos en este sector está asociado a la dinámica fluvial del río y se ve incrementada a partir de la construcción del espolón, hecho por el cual podría desencadenar una problemática a futuro en el sector, debido a la colmatación de la entrada o boca del río impidiendo que este llegue al mar y provocando inundación aguas arriba en la zona urbana. Con relación a los ecosistemas, la confluencia de agua dulce y salada hace condiciones óptimas para los manglares adyacentes al río, pero si llegase a colmatar la desembocadura aumentaría la sedimentación, ocasionando que esta vegetación se tape provocando desencadenado su degradación. Asimismo, reduciría el oxígeno del agua afectando a los peces y crustáceos que habitan allí. El área total del polígono trazado para indicar la zona de acreción es de 24201,4 m².

Figura 8

Mapa temático indicando las zonas susceptibles a la erosión y acreción costera.



6.4 Fase 6 - Propuestas para la Gestión Costera

Partiendo de los resultados de los objetivos anteriores, se identificaron tendencias de erosión y acumulación de sedimentos en Playa Salguero. Se identificaron zonas críticas en el centro y sur de la línea de costa con una tasa de retroceso hasta $-0,26$ metros al año, mientras que al norte hay áreas donde se está acumulando sedimentos, lo que coincide con los informes de INVEMAR entre 2016 y 2024 y el análisis realizado en la herramienta DSAS. Estos hallazgos son de gran importancia para crear recomendaciones sobre cómo manejar la problemática de erosión desde distintas aristas, teniendo en cuenta tanto lo que pasa de forma natural como las presiones humanas en la zona.

También se identificó que las estructuras rígidas de protección, como los espolones que se pusieron en 2023, pueden causar erosión más abajo porque modifican la dinámica de sedimentos, como ya mencionó INVEMAR en su informe CPT-GEO-005-23 (INVEMAR, 2023a). Por todo esto, es clave que combinen las intervenciones estructurales con estrategias de manejo más flexibles que se enfoquen en la sostenibilidad y en hacer que la costa sea más resistente.

El anterior informe menciona también que el espolón construido en las coordenadas (11°11'26.41"N; 74°13'56.02"W) a finales de 2016 con un dique, ha potenciado en los últimos 7 años los efectos de erosión costera en el sector centro, a lo largo de 500 m de la línea de costa (INVEMAR, 2022, como se cita en (INVEMAR, 2023a). También es importante mencionar que en el informe técnico del INVEMAR CPT-GEO-001-24, la comunidad de cabañas Tahití hace una petición para que se establezca si el espolón frente a la calle 26 de Gaira aceleró procesos naturales de erosión durante y después de su construcción, a lo que INVEMAR concluye en la petición 2 que no se puede concluir que dicho espolón aceleró la erosión natural de la playa durante y después de su construcción ya que los periodos del 2022 y 2023 hubo eventos como huracanes que aceleraron procesos de erosión pero también de acreción.

La revisión documental permitió identificar los principales factores naturales y antrópicos que inciden en la dinámica costera de Playa Salguero. Entre los naturales se destacan la geomorfología del litoral, el oleaje de alta energía y los eventos extremos (huracanes, El Niño 2014–2016), mientras que entre los antrópicos sobresalen la urbanización costera, la construcción de espolones y muros, la presión del turismo y la contaminación del río Gaira, que limita el aporte de sedimentos en época de sequía.

En la siguiente **Tabla 6** se presentan los principales insumos técnicos, institucionales y bibliográficos que sustentaron este análisis:

Tabla 6
Listado información para medidas de gestión costera

Tipo de fuente	Referencia/Documento	Institución/Autor	Año	Enfoque principal
Informe técnico	CPT-GEO-005-23	INVEMAR	2023	Impacto de espolones en dinámica sedimentaria
Informe técnico	CPT-GEO-001-24	INVEMAR	2024	Solicitud comunitaria sobre erosión frente a calle 26 de Gaira.
Informe técnico	Estado actual de la erosión costera en Colombia	Rangel et al.	2018	Evaluación de estructuras duras en la costa Caribe.
Informe técnico	Estado del medio marino y costero	INVEMAR	2022	Condiciones ambientales y amenazas costeras.
Artículo científico	Advances in the study of coastal processes in the continental Colombian Caribbean coast	Pérez et al.	2022	Evaluar el estado del conocimiento científico sobre procesos costeros en el Caribe.
Informe Institucional	Plan Nacional de Gestión Integrada de la Zona Costera	MADS	2022	Lineamientos de manejo costero.

Dado a todo lo anterior la dinámica erosiva observada en Playa Salguero es una problemática común en muchas playas del mundo, como ha ocurrido en sectores como Punta Brava y Punta Betín, en Santa Marta. Factores como la geomorfología del litoral y la energía del oleaje que impacta en la línea de costa influyen significativamente en los procesos de erosión. En particular, cuando las olas rompen con alta energía sobre costas rocosas, pueden generar efectos erosivos intensos y dar lugar a formas características de erosión. Este comportamiento ha sido documentado por Conde (2015), como se cita en (Vargas-T. et al., 2016), lo cual permite tener una trazabilidad espacio temporal y conocimiento a los fenómenos erosivos que ocurren en la zona de estudio. A lo anterior se suma el deterioro de río Gaira por contaminación hídrica y residuos sólidos, que a su vez está afectando de forma directa con el aporte de sedimentos y más aún en épocas de sequía donde más se agudiza dicha problemática.

En Colombia la costa caribeña ha venido implementado la protección costera a través a de estructuras duras y en algunos casos la única estrategia de manejo frente a estos problemas de

erosión. A comienzos de 2016, al menos 1484 estructuras duras (transversales y longitudinales, como espolones, muros de contención, rompeolas, entre otros) habían sido construido, concentrándose principalmente en ciudades turísticas. De las cuales el 90% de estas estructuras duras no han sido muy exitosas o han fallado en su propósito. Estas estructuras han alterado las condiciones naturales del área de estudio, generando impactos como: blindaje costero, reducción del suministro de sedimentos hacia zonas de sotavento, intensificación de procesos erosivos, aparición de nuevos focos de erosión y deterioro de calidad paisajística costera entre otros (Rangel et al., 2018).

La erosión en la región está asociada con el desequilibrio sedimentario, las olas extremas, la degradación de los ecosistemas y el aumento del nivel del mar (Bernal et al., 2016; Genes et al., 2021, como se citó en (Pérez et al., 2022)). En el caso específico de Playa Salguero, los estudios realizados por Rangel et al. 2018 y los informes técnicos de INVEMAR; CPT-GEO-005-2, CPT-GEO-001-24 permiten contextualizar la problemática y se evidencia una alta exposición a procesos erosivos, a tal grado que su proceso de erosión es muy acelerado respecto a otras playas, y esto preocupa a sus habitantes. La situación se complicó con el evento de El Niño que se presentó entre finales de 2014 y mediados de 2016. La sequía que afectó a la región Caribe llevó a la comunidad a construir estructuras rígidas como medida de protección costera (Collazos, 2023).

En relación con la literatura sobre Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) y estrategias híbridas para la mitigación de la erosión costera, en la **Tabla 7** se presentan los documentos que fueron considerados en esta revisión:

Tabla 7*Listado de literatura sobre soluciones basadas en naturaleza (SbN)*

Ámbito	Autor(es) y año	Aporte principal relacionado con SbN
Nacional	MADS(2022)	Siembra de 1.5 km de uva de playa para frenar la erosión costera en Ciénaga
Internacional	Joe et al. (2025)	Uso de imágenes Landsat (2000–2024) para identificar patrones de oleaje y corrientes; se recomienda infraestructura costera sostenible como espolones ecológicos y restauración de manglares
Internacional	Louarn et al. (2025)	Señalan limitaciones de SbN en playas con alta presión turística y urbanización; recomiendan estudios de viabilidad técnica, social y ambiental.
Internacional	Castillo Chinchilla & Piedra Castro (2024)	Se diserta sobre SbN como métodos sostenibles para el cuidado del litoral, la conservación, comentan sobre la efectividad sembrar mangle u obras rígidas tipo 3D.
Internacional	Vieira et al. (2024)	Se aplica un modelo hidromorfodinámico simulando una SbN para disminuir el impacto por nivel del mar, marejadas ciclónicas y fluctuaciones.
Internacional	SOLTIG et al. (2024)	Promueven integrar escenarios de erosión y aumento del nivel del mar en la planificación costera para reducir vulnerabilidad.

El estudio realizado por (Joe et al., 2025) utiliza imágenes de satélite Landsat entre el 2000 y 2024. Con ese insumo, identificaron patrones estacionales de oleaje, incluidos los cambios en la altura de las olas y las corrientes litorales, que de alguna manera contribuyen al comportamiento dinámico de esa región costera. El estudio enfatiza la necesidad de infraestructura costera sostenible, como espolones ecológicos y restauración de manglares, para mitigar la erosión y fortalecer la resiliencia climática.

En este sentido, las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) emergen como alternativas viables económicamente sostenibles para la gestión de la erosión costera, al ofrecer beneficios múltiples relacionados con la protección del litoral, la conservación de ecosistemas y la mejora de la resiliencia comunitaria (Castillo chinchilla & Piedra Castro, 2024). La siembra de uva de playa (*Coccoloba uvifera*), recientemente implementada en sectores del Caribe colombiano como medida de estabilización de dunas y reducción de la energía del oleaje, se presenta como una alternativa viable para Playa Salguero, en combinación con acciones de restauración de coberturas vegetales y protección de ecosistemas costeros (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible MADS, 2022).

Entre las medidas con enfoque en Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) se destacan distintas alternativas. Una de ellas es la plantación de mangle rojo (*Rhizophora mangle*) en zonas de duna y postduna ubicadas en sectores críticos, lo cual ha demostrado ser una estrategia eficaz para disminuir la altura del oleaje en porcentajes que pueden variar entre el 13 % y el 100 %, según el área reforestada (Figlus et al., 2022, como se citó en Castillo chinchilla & Piedra Castro, 2024).

Por otra parte, se contemplan intervenciones de carácter rígido, como la implementación de arrecifes artificiales elaborados mediante impresión 3D. Estas estructuras funcionan como barreras capaces de disipar la energía del oleaje y disminuir la velocidad del flujo marino, favoreciendo la acumulación de sedimentos detrás de ellas y, con ello, reduciendo los procesos erosivos (Chauvin, 2018, como se citó en Castillo chinchilla & Piedra Castro, 2024).

Sin embargo, lo encontrado por (Louarn et al., 2025) sugiere que la aplicación de SBN en contextos donde las áreas de playa tienen mucha presión turística, se pueden presentar limitaciones significativas para su ejecución. Factores como la reducción del espacio costero, la presión sobre el uso de los suelos y la infraestructura densa y la pérdida de vegetación nativa pueden restringir el papel de los ecosistemas como zonas de amortiguación. Es así, que cualquier propuesta de intervenciones basadas en la naturaleza debe incluir estudios de ingeniería detallados que evalúen su viabilidad técnica, social y ambiental.

En ese mismo sentido, se ha demostrado que los enfoques clásicos de ingeniería dura son limitados y, en ocasiones, han acelerado la erosión en zonas sensibles del litoral, por lo que se han desarrollado opciones novedosas basadas en la naturaleza. Los hallazgos del estudio realizado por (Vieira et al., 2024) demostraron que la solución propuesta fomenta la sedimentación en el lado de sotavento, sin comprometer por completo el transporte longitudinal como lo hacen las soluciones tradicionales. Además, su comportamiento se asemejó al de una estructura emergida, proporcionando una mayor amplitud para proteger contra las fluctuaciones de marea, las marejadas ciclónicas, el aumento del nivel del mar, etcétera.

Finalmente, se deben aunar esfuerzos para fortalecer la relación entre los factores naturales y antrópicos a través de la planificación territorial y la gestión del riesgo, integrando estudios de variación del nivel del mar y escenarios de erosión costera en los planes reguladores de las zonas costeras, tal como se ha promovido en experiencias regionales exitosas (SOLTIG et al., 2024). La implementación de este tipo de enfoques permite identificar áreas prioritarias de intervención,

optimizar el uso del suelo en áreas de riesgo y reducir la vulnerabilidad de las comunidades e infraestructuras frente al cambio climático.

7 Discusión

7.1 Fases 1, 2 y 3 - Variación Espacio Temporal de la Línea de Costa

El análisis de la variación espacio-temporal de la línea de costa mediante imágenes satelitales utilizando ArcGIS Pro, en el período 2016-2025, permitió comprender con mayor precisión el comportamiento de la línea de costa en Playa Salguero a lo largo del período evaluado. Durante su desarrollo, se destacó la necesidad de contar con imágenes satelitales de alta resolución como insumo principal para llevar a cabo de manera efectiva la evaluación de la dinámica costera. Esta fase no solo posibilitó la digitalización de las líneas de costa del período analizado, sino que también permitió construir una base técnica sólida para el seguimiento de los cambios en la franja costera.

Particularmente, se priorizó la selección de imágenes con baja o nula nubosidad, considerando que la presencia de nubes y sombras interfiere significativamente en la identificación de coberturas y en la precisión de la digitalización de la línea de costa bajo el criterio húmedo-seco, lo cual afecta la calidad de los análisis. Contar con imágenes claras y con baja nubosidad constituye un requisito importante para garantizar resultados confiables en el monitoreo de cambios, especialmente en zonas donde las dinámicas de erosión y acreción pueden ser sutiles pero persistentes. En este sentido, asegurar la calidad de las imágenes empleadas contribuyó de forma directa a una mejor delimitación de la línea de costa durante los diez años analizados (Wu et al., 2025).

Asimismo, el desarrollo de las fases metodológicas para este objetivo evidenció que, aunque la digitalización manual es un procedimiento visual subjetivo que requiere dedicación y tiempo, resulta valiosa para identificar los cambios en la línea de costa de acuerdo con los recursos disponibles. Este método es especialmente adecuado en áreas de playa con alta dinámica de humedad superficial, donde los procesos automáticos de detección pueden enfrentar limitaciones para diferenciar con precisión las transiciones entre zonas húmedas y secas, lo que dificulta la interpretación de la línea de costa (Himmelstoss et al., 2024; Wang et al., 2024; Cui et al., 2022; Latif & Yong, 2021). Además, el uso del límite húmedo-seco como indicador visible resultó práctico y coherente con la variabilidad del entorno costero, sirviendo como base para detectar

tendencias de retroceso o avance de la línea de costa en función de eventos climáticos, mareas extraordinarias o intervenciones antrópicas en la zona.

En este orden de ideas, contar con imágenes satelitales de buena calidad, realizar la digitalización adecuada de las líneas de costa e incorporar la información requerida para su integración en la herramienta DSAS permitió asegurar insumos confiables para el análisis de los cambios en la línea de costa y avanzar de manera sólida hacia el siguiente objetivo del estudio.

7.2 Fase 4 - Tasas de Erosión y Acreción

Los resultados del cálculo de las tasas de erosión y acreción evidencian que la línea de costa en Playa Salguero constituye un sistema altamente dinámico, con variaciones espaciales significativas, en coherencia con lo reportado por INVEMAR (INVEMAR, 2025). Para el presente estudio se interpretaron los indicadores Movimiento Neto de Línea de Costa (NSM), Tasa de Regresión Lineal (LRR) y Máximo Desplazamiento de las Líneas de Costa (SCE), al ser métricas que permiten describir como complemento el comportamiento espacial y temporal de las líneas de costa. Según dicha institución, con corte a 2024, la tasa promedio de erosión era de $-1,5$ m/año, con valores extremos de hasta $2,1$ m/año, afectando el 60 % de la línea de costa.

De acuerdo con esta investigación, se evidencia que el comportamiento es similar al reportado por INVEMAR(2025), aunque con mayor severidad en algunos sectores. Como se muestra en la figura 4, para el indicador LRR, se identificó una proporción más alta de transectos (159) en retroceso (73,95 %) y una tasa máxima de erosión de $-2,44$ m/año y una tasa de erosión promedio de $-0,26$ m/año. El LRR calcula la pendiente de una recta ajustada a todas las posiciones de la línea de costa registradas en el tiempo para cada transecto, expresándose en metros por año(m/año). Al considerar todas las fechas este método reduce la influencia de posibles errores, siendo más estable para identificar tendencias. Además, el 33,5 % de los tramos erosivos presentan valores estadísticamente significativos, lo que sugiere una persistencia sostenida del fenómeno en el tiempo.

Por otro lado, hacia el norte del área de estudio se identificaron procesos de acumulación con tasas promedio de $1,82$ m/año, similares a las reportadas por INVEMAR ($1,6$ m/año). Estos resultados se respaldan por el Movimiento neto de la línea de costa NSM (figura 4), el cual muestra que el 36.74% de los transectos evidencian avance de la línea de costa, con un valor promedio de

16.21m, mientras que el 63.26% presenta retroceso con un promedio de -6.23 m. El NSM mide la distancia lineal entre la posición más antigua y la más reciente de la línea de costa para cada transecto, sin considerar las posiciones intermedias. Valores positivos indican acreción y negativos erosión. Es importante indicar que, aunque la erosión es más frecuente, estos valores reflejan que en los sectores donde ocurre acreción, esta puede alcanzar datos significativos, sugiriendo procesos de acumulación localizada de sedimentos en puntos específicos de la línea de costa.

La distancia máxima de desplazamiento de la línea de costa (SCE), registrada en 50,32 m en la desembocadura del río Gaira, evidencia la fuerte influencia que ejercen los aportes fluviales sobre la morfodinámica costera del área de estudio. La elevada descarga de sedimentos provenientes del río genera un desequilibrio en el sistema litoral, promoviendo tanto procesos de acreción, por acumulación de material, como de erosión, debido a la redistribución y movilización de sedimentos por acción de las corrientes y el oleaje. Este comportamiento resalta la importancia de los ríos en la configuración espacial y temporal de la línea de costa, así como la necesidad de considerar su influencia en la planificación y gestión de zonas costeras sometidas a presión antrópica y natural.

Dentro de esta discusión no se consideró el indicador End Point Rate (EPR) como métrica principal de interpretación, ya que este método se basa exclusivamente en dos fechas extremas para calcular la tasa de cambio, lo cual lo hace especialmente sensible a posibles errores o inconsistencias en alguna de las líneas de costa (De Lima et al., 2021) De esta manera, se priorizó el análisis de los resultados de regresión (LRR) que incorpora múltiples fechas y tiende a ser más estable y confiable en presencia de fluctuaciones ambientales.

Ahora bien, como se indica en la figura 4, del acápite de resultados, los sectores con erosión se concentran principalmente en la saliente de Punta Gloria, costado sur de la intervención mediante estructuras de espolones, iniciada en agosto de 2023, Aunque este análisis no aborda directamente la dinámica sedimentaria ni las condiciones hidrodinámicas locales, la coincidencia temporal entre el incremento de la erosión y la ejecución de estas obras permite plantear una posible relación, tal como se documenta en el concepto técnico CPT-GEO-001-24 del INVEMAR (INVEMAR, 2024), que reconoce incrementos en las tasas de erosión frente a ciertas estructuras, aunque subraya la necesidad de análisis específicos para atribuciones definitivas y concluyentes. De igual forma Rangel et al.. (2015 ,2018) han documentado que este tipo de intervenciones

interrumpe el transporte natural de sedimentos, intensificando la erosión en sectores cercanos y generando impactos paisajísticos y funcionales.

Además de los efectos físicos directos, diversas investigaciones en Colombia han resaltado que las infraestructuras costeras rígidas no solo intensifican la erosión, sino que también erosionan la resiliencia ecosistémica, incrementando la vulnerabilidad del territorio. Como reporta un compendio técnico sobre erosión costera en el litoral antioqueño (Gobernación de Antioquia et al., 2021), aunque las obras rígidas inicialmente contrarrestan localmente la erosión, tienden a agravar el fenómeno en zonas colindantes al modificar la dinámica litoral. Por su parte, ecosistemas como playas, humedales y manglares han demostrado su capacidad para mitigar impactos asociados a marejadas, escorrentías y pérdida de cobertura sedimentaria, razón por la cual su restauración y conservación resulta estratégica dentro de una perspectiva de gestión sobre el área. (Ricaurte Villota et al., 2018).

Los sectores que presentan avance de la línea de costa, principalmente hacia el norte, podrían estar influenciados por la disponibilidad de sedimentos provenientes de fuentes cercanas, como la desembocadura del río Gaira. Aunque esta hipótesis no fue evaluada de manera directa en esta investigación, resulta consistente con informes recientes de INVEMAR (2023, 2025) donde se describen dinámicas similares en otras playas del Caribe colombiano, asociadas tanto a la influencia fluvial como a zonas que se encuentran parcialmente protegidas del impacto directo del oleaje por vegetación costera, bahías o curvaturas en la línea de costa.

Frente a esta heterogeneidad espacial y a la complejidad de factores que intervienen en la evolución de la línea de costa, incluyendo causas físicas naturales y sociales, se hace necesario disponer de herramientas técnicas que sustenten decisiones de planificación y gestión basadas en evidencia cuantificable. En este sentido, estudios como el de Ricaurte Villota et al. (2018), destacan la utilidad de enfoques multicomponente para evaluar la amenaza y la vulnerabilidad asociadas a la erosión costera, integrando variables físicas, sociales y de resiliencia local. Estos planteamientos reafirman que la gestión en zonas costeras debe considerar las condiciones las edificaciones existentes, la cantidad de personas que pueden verse afectadas y la capacidad de adaptación de las comunidades.

Ahora bien, aportando a la evidencia cuantificable, el enfoque implementado en esta investigación permitió identificar y analizar tendencias de cambio con base en las métricas estandarizadas y replicables, como el LRR, el NSM y el SCE, que para el caso, como ya se ha

mencionado anteriormente para el LRR, el 73,95 % de los transectos (159) registró retroceso, con una tasa máxima de erosión de $-2,44$ m/año y un promedio de $-0,26$ m/año. Por su parte, el análisis del NSM reveló que el 36,74 % de los transectos mostró un avance promedio de 16,21 m, mientras que el 63,26 % presentó un retroceso promedio de $-6,23$ m. Además, el SCE cuyo valor de 50,32 m de máximo desplazamiento de las líneas de costa. Estos hallazgos contribuyen a la continua construcción de la línea base para procesos de monitoreo, gestión costera y planificación territorial.

Asimismo, refuerzan la necesidad de avanzar hacia estrategias de manejo costero integrales y de adaptación, que incluyan no solo intervenciones estructurales, sino también soluciones basadas en la naturaleza, como se ha documentado en Costa Rica, las cuales se consolidan como estrategias efectivas y sostenibles para enfrentar la erosión costera, al reducir la energía del oleaje y aumentar la resiliencia de los ecosistemas. Su implementación permite proteger la biodiversidad y los medios de vida locales, favoreciendo la adaptación al cambio climático de manera integral (Castillo chinchilla & Piedra Castro, 2024). Solo desde una lectura integral del territorio, que articule datos, escalas y aprendizajes, será posible responder de manera eficaz a los desafíos que impone este fenómeno costero.

7.3 Fase 5 - Zonas Susceptibles a Procesos de Erosión y Acreción

La definición de los sectores más afectados por la erosión y la acreción permitió identificar con mayor precisión las zonas críticas del litoral en Playa Salguero, fortaleciendo la línea base generada en este estudio. Aunque los patrones de retroceso y acumulación ya fueron detallados en el análisis de tasas de cambio, su representación en mapas temáticos aporta un insumo técnico valioso para la comprensión espacial de estos procesos y su comunicación a tomadores de decisiones.

En este sentido, entendiendo que un mapa temático funciona como herramienta que facilitan la observación de tendencias y relaciones espaciales de los procesos costeros, permite comprender mejor su distribución en el territorio (Fan et al., 2024). En este caso, las condiciones generales en playa Salguero están dominadas por los procesos erosivos en frecuencia y extensión sobre todo en la parte sur de la playa, sin embargo, los procesos acumulativos o de acreción, aunque menos extensos presenta tasas de avance más altas hacia la parte norte, en coherencia con los hallazgos

reportados por INVEMAR, en sus informes de del Estado de los Ambientes Marinos y Costeros en Colombia desde 2016 hasta 2024.

Aunque este insumo posee un carácter descriptivo, cumplió la función de identificar de manera clara los sectores críticos del litoral, que en el contexto de Playa Salguero especialmente en el sector de Punta Gloria señala un aumento significativo de la erosión en el periodo analizado, por lo que es de vital importancia hacer un llamado a priorizar la protección y conservación de los ecosistemas que allí confluyen, en especial el bosque seco tropical, que según investigaciones es considerado como uno de los ecosistemas terrestres más amenazados en el mundo por las intervenciones humanas (Banda et al., 2016). Su importancia radica en múltiples aprovechamientos de estos servicios ecosistémicos entre los que se encuentra la captura de carbono, control biológico, protección al suelo de la erosión y regulación del agua (Andrade et al., 2017; Ballesteros-Correa et al., 2019).

De esta forma, se avanza en la consolidación de herramientas prácticas y basadas en evidencia que contribuyen a enfrentar los desafíos asociados a la erosión costera en Playa Salguero, facilitando la priorización de intervenciones y constituyéndose en un soporte técnico clave para la gestión y la planificación territorial en zonas costeras, aportando al fortalecimiento de las capacidades de las administraciones locales en el monitoreo y gestión integrada del litoral.

7.4 Fase 6 - Propuestas para la Gestión Costera

Es preponderante la urgencia de aunar esfuerzos y recursos económicos para la gestión costera en Playa Salguero, esta problemática se debe considerar de forma integral tanto las dinámicas naturales como las presiones antrópicas, de manera que se reduzca la vulnerabilidad frente a procesos de erosión y eventos extremos. La identificación de zonas con retroceso significativo y áreas de acumulación, coherente con reportes previos de INVEMAR (2016-2024), evidencia la necesidad de intervenciones diferenciadas según las condiciones locales, priorizando acciones en los sectores más afectados por tasas elevadas de erosión. La presencia de espolones construidos desde 2023 ha intensificado la erosión aguas abajo, debido a la alteración del transporte litoral de sedimentos, un efecto ampliamente documentado en la literatura técnica. Este comportamiento demuestra que las soluciones de ingeniería dura, aunque buscan proteger ciertos sectores, pueden agravar los impactos en otros, si no se consideran de manera integral las dinámicas

costeras. Adicional al factor de infraestructura no se puede dejar a un lado la protección del Río Gaira, ese afluente es muy importante para el aporte de sedimentos y calidad del agua que descarga al mar. Muchas personas se están viendo afectadas por la contaminación hídrica y los residuos sólidos que desafortunadamente no se está teniendo control y están acelerando los procesos erosivos.

De esta manera, el estudio de Joe et al. (2025) coincide con los del presente estudio al resaltar el dinamismo costero y la necesidad de infraestructuras sostenibles que no interrumpen drásticamente los flujos sedimentarios. Dentro de este marco, el uso de espolones ecológicos y la restauración de ecosistemas como los manglares se perfilan como alternativas más compatibles con la conservación del entorno costero o en su defecto proteger los existentes.

Es muy posible que las técnicas de revegetación de dunas utilizadas en el estudio de (Marino et al., 2025) sean directamente relevantes y efectivas en Playa Salguero. Sin embargo, es necesario recuperar el espacio costero que actualmente está ocupado por la urbanización, se puede revegetar con especies nativas tolerantes al salitre y al viento, por ejemplo: *Ipomoea pes-caprae* y *Canavalia rosea*. Otra opción sería reconstrucción de pastos marinos. Se debería confirmar presencia histórica o potencial de *Thalassia testudinum* u otras especies locales, evitar el dragado, anclajes y vertimientos que afecten la vida marina y finalmente un monitoreo ecológico y físico constante del oleaje, corrientes y sedimentación.

En este contexto, las Soluciones Basadas en la Naturaleza (NBS, por sus siglas en inglés) que presentan Castillo chinchilla y Piedra Castro (2024), mencionan que estas soluciones no solo tienen ventajas desde una perspectiva física de protección costera, sino que también mejoran la resiliencia climática y la preservación del ecosistema, se deberá realizar un inventario de flora para determinar los porcentajes de coberturas vegetales que pueden ser aplicables al caso de playa salguero, las otras obras tipo rígidas deberán ser evaluadas por la alcaldía Distrital de Santa Marta y demás entes competentes para financiar los recursos necesarios para la viabilidad y construcción de dichas medidas. La siembra de especies como *Coccoloba uvifera* (uva de playa), ya implementada en otras regiones del Caribe colombiano, representa una medida replicable en Playa Salguero, especialmente si se combina con acciones de restauración de coberturas vegetales y conservación de ecosistemas dunares (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible MADS, 2022).

Finalmente, se reconoce que la complejidad de los procesos costeros en Playa Salguero requiere de enfoques multicomponente que consideren la interacción entre factores físicos, antrópicos y socioeconómicos, reforzando la necesidad de involucrar a las comunidades locales y autoridades en la construcción de soluciones. Este enfoque integral es esencial para avanzar hacia una gestión costera que combine intervenciones estructurales sostenibles con soluciones basadas en la naturaleza y medidas de planificación territorial, garantizando la protección de las comunidades, la infraestructura y los ecosistemas frente a la erosión costera y los efectos del cambio climático.

9 Conclusiones

- El uso de imágenes satelitales de PlanetScope y World Imagery Wayback permitió delimitar de manera precisa la línea de costa de Playa Salguero y facilitar el seguimiento multitemporal de los cambios en el litoral entre 2016 y 2025. La cuidadosa selección de imágenes con baja nubosidad y periodicidad similar por año, junto con la aplicación del criterio húmedo-seco, garantizó insumos confiables para el análisis y la obtención de tasas de cambio, permitiendo evidenciar con claridad la dinámica de retroceso y avance de la línea de costa durante el periodo analizado.
- El cálculo de las tasas de erosión y acreción mediante el uso de la herramienta DSAS permitió cuantificar con precisión los cambios en la línea de costa de Playa Salguero entre 2016 y 2025. Se evidenció un predominio de procesos erosivos, especialmente en el sector de Punta Gloria, con una tasa máxima de $-2,02$ m/año, mientras que se identificaron procesos de acreción hacia la desembocadura del río Gaira con tasas de hasta $3,69$ m/año. Estos resultados reflejan la influencia combinada de factores naturales y antrópicos en la dinámica costera del área de estudio.
- El análisis de los resultados permitió identificar las zonas más susceptibles a procesos de erosión y acreción en Playa Salguero mediante la elaboración de un mapa temático. Se identificó que el sector sur, principalmente Punta Gloria, es el área con mayor susceptibilidad a la erosión y pérdida de línea de costa, amenazando ecosistemas primordiales como el bosque seco tropical, mientras que el sector norte, cercano a la desembocadura del río Gaira, presenta mayor susceptibilidad a la acreción y acumulación de sedimentos. Estos insumos facilitan la priorización de áreas para la gestión costera en el sector.
- Con base en los hallazgos obtenidos, se reconoce la necesidad de implementar un enfoque de gestión costera integral en Playa Salguero que priorice Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN), la restauración de ecosistemas costeros y el fortalecimiento del ordenamiento territorial.
- Se puede concluir que la erosión costera en Playa Salguero responde a un entramado complejo de factores naturales y antrópicos, donde las obras rígidas han contribuido a

agravar procesos erosivos localizados. Se recomienda implementar soluciones basadas en la naturaleza, obras de tipo blandas como revegetación de acuerdo con conceptos técnicos y obras de tipo rígida como arrecifes artificiales en 3D para disminuir la cinética de las olas que es uno de los principales factores agravantes de erosión y factores antrópicos como contaminación hídrica, residuos sólidos y ocupación de playa para fines recreativos o turísticos.

10 Recomendaciones

- Se recomienda que para futuros análisis de la línea de costa en Playa Salguero se usen imágenes satelitales de mayor resolución, como las de la serie WorldView, que ofrecen detalles de hasta 30 cm, permitiendo mejorar la precisión en la delimitación de los cambios costeros y en la cuantificación de las tasas de erosión y acreción, especialmente en sectores de alta dinámica.
- Se recomienda validar mediante estudios de campo, modelaciones y ensayos piloto cualquier medida de gestión costera, ya sean Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) o intervenciones de infraestructura, asegurando que estas soluciones sean efectivas bajo las condiciones locales de oleaje, sedimentación y erosión presentes en Playa Salguero.
- Para las entidades territoriales, se sugiere adoptar en Playa Salguero un enfoque integral de gestión costera que priorice Soluciones Basadas en la Naturaleza, como la revegetación con especies nativas de bosque seco tropical y la restauración de manglares, antes de recurrir a obras duras. Estas medidas contribuyen a disminuir los impactos negativos de la erosión y promueven la resiliencia costera frente a eventos extremos y cambio climático.
- Se considera indispensable fortalecer el ordenamiento territorial y el control del crecimiento urbano en Playa Salguero, limitando nuevas construcciones en zonas de erosión activa y regulando la densidad turística. Además, se recomienda fomentar un turismo sostenible que respete los ecosistemas costeros, acompañado de procesos de educación ambiental y de participación comunitaria en la toma de decisiones sobre la gestión del litoral.
- Involucrar a las instituciones de educación superior para que adelanten investigaciones de ingeniería de detalle y aplicando tecnologías de inteligencia artificial para que faciliten la toma de decisiones y solución de la problemática.

Referencias

- Akhter, F., Hoque, M. E., & Xu, N. (2024). Geospatial analysis of shoreline and areal dynamics in the Ganges deltaic island of Bangladesh using the GIS-DSAS technique. *Regional Studies in Marine Science*, 73. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103495>
- Al-Attar, I. M. S., & Basheer, M. A. (2023). Multi-temporal shoreline analysis and future regional perspective for Kuwait coast using remote sensing and GIS techniques. *Heliyon*, 9(9), e20001. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20001>
- Alcaldía Distrital de Santa Marta. (2020). *Plan de Ordenamiento Territorial*. <https://www.santamarta.gov.co/plan-de-ordenamiento-territorial>
- Andrade, H., Segura, M., Canal, D., Huertas, A., & Mosos, C. (2017). Composición Florística y Reservas de Carbono en Bosques Ribereños en Paisajes Agropecuarios de la Zona Seca del Tolima, Colombia. *Revista Biología Tropical*, 65 (4), 1245–1260. <https://tinyurl.com/2kv9c5ce>
- Andreu, A., Carpintero, E., & Gonzáles, D. (2018). Teledetección para la agricultura. *Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible*, 1, 1–50. <https://tinyurl.com/2sdj78x8>
- Angnuureng, B. D., Adade, R., Chuku, E. O., Dzantor, S., Brempong, E. K., & Mattah, P. A. D. (2023). Effects of coastal protection structures in controlling erosion and livelihoods. *Heliyon*, 9(10), e20633. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2023.E20633>
- Angnuureng, D. B., Charuka, B., Almar, R., Dada, O. A., Asumadu, R., Agboli, N. A., & Ofosu, G. T. (2025). Challenges and lessons learned from global coastal erosion protection strategies. *IScience*, 28(4), 112055. <https://doi.org/10.1016/J.ISCI.2025.112055>
- Aouiche, I., Daoudi, L., Anthony, E. J., Sedrati, M., Ziane, E., Harti, A., & Dussouillez, P. (2016). Anthropogenic effects on shoreface and shoreline changes: Input from a multi-method analysis, Agadir Bay, Morocco. *Geomorphology*, 254, 16–31. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2015.11.013>
- Ballesteros-Correa, J., Morelo-García, L., & Pérez-Torres, J. (2019). Composición y Estructura Vegetal de Fragmentos de Bosque Seco Tropical en Paisajes de Ganadería Extensiva bajo Manejo Silvopastoril y Convencional en Córdoba, Colombia. *Caldasia*, 41(1), 224–234. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v41n1.71320>
- Banda, K., Delgado, A., Dexter, K., Linares, R., Filho, A., Prado, D., Quintana, Catalina & Pennington, T. (2016). Plant Diversity Patterns in Neotropical Dry Forests and their Conservation Implications. *Science*, 353(6306), 1383–1387. <https://www.science.org>

- Cantero, Y. C., Astaíza, C. A., Mesías, Á. M., & Quintero, P. A. (2024). Estudio de la tasa de sedimentación y erosión en el sector La Barra del canal navegable en San Andrés de Tumaco, Nariño. *Boletín Científico CIOH*, 42(1). <https://doi.org/10.26640/22159045.2023.611>
- Cardona Lopera, D. (2018). *Actualización de la migración de la línea de costa de acantilados blandos tropicales entre minuto de Dios y Puerto Rey, sur de la costa Caribe colombiana*. <https://tinyurl.com/yzrz3twc>
- Cardona Pérez, M. (2024). *Erosión costera en Colombia: estudio de caso en el municipio de Manaure, La Guajira* [Universidad de Caldas]. <https://tinyurl.com/5n942exv>
- Castillo chinchilla, M., & Piedra Castro, L. (2024). *Acciones de mitigación y adaptación ante la erosión costera de playas arenosas del Caribe Sur, Costa Rica*. 17. <https://doi.org/https://doi.org/10.14350/rig.60854>
- Centro de Ciencias Marinas Y Costeras Woods Hole. (2024). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS)*. Servicio Geológico de Los Estados Unidos. <https://www.usgs.gov/centers/whcmssc/science/digital-shoreline-analysis-system-dsas>
- Coca Domínguez, O., & Ricaurte Villota, C. (2019). Validation of the hazard and vulnerability analysis of coastal erosion in the Caribbean and pacific coast of Colombia. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(8). <https://doi.org/10.3390/jmse7080260>
- Collazos, M. (2023). *Caracterización y análisis sedimentológico de Playa Salguero, suroccidente de Santa Marta, Magdalena - Colombia* Manuela Esther De La Hoz Collazos [Universidad Industrial de Santander]. <https://n9.cl/7aky1>
- Contraloría General. (2024). *Auditoría Cooperativa Global sobre Acciones de Adaptación al Cambio Climático (CCAA)-Erosión Costera*. www.contraloria.gov.co
- Copernicus. (n.d.). Retrieved June 12, 2025, from <https://www.copernicus.eu/es>
- Cui, Y., Yan, F., He, B., Ju, C., & Su, F. (2022). Characteristics of Shoreline Changes Around the South China Sea from 1980 to 2020. *Frontiers in Marine Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1005284>
- Dal Barco, M. K., Furlan, E., Pham, H. V., Torresan, S., Zachopoulos, K., Kokkos, N., Sylaios, G., & Critto, A. (2024). Multi-scenario analysis in the Apulia shoreline: A multi-tiers analytical framework for the combined evaluation and management of coastal erosion and water quality risks. *Environmental Science and Policy*, 153(October 2022), 103665. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2023.103665>

- DANE. (2018). *Censo Nacional de Población y Vivienda 2018 y desafíos socioeconómicos para la región Caribe*.
- DANE. (2024). *Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Sistema Estadístico Nacional*. Recuperado El 17 de Febrero de 2023 de <https://tinyurl.com/336n3wrc>
- Dávila Martínez, I. M. (2020). *Análisis de cambio en la línea de costa en la zona litoral del Parque Nacional Natural Vía Isla De Salamanca para los años 2000, 2013 Y 2020 Utilizando Imágenes Landsat 7 Y 8* [Universidad Militar Nueva Granada]. <https://tinyurl.com/yyc29b3z>
- De la Cruz, J., & Muñoz, G. (2016). *Análisis multitemporal de la cobertura vegetal y cambio de uso del suelo del área de influencia del programa de reforestación de la Federación Nacional De Cafeteros en el municipio de Popayán, Cauca* [Universidad de Manizales]. <https://tinyurl.com/4zm38rbc>
- Distrito Turístico Cultural e histórico de Santa Marta. (2023). *Decreto_092_de_03_abr_2023*.
- Dong, W. S., Ismailuddin, A., Yun, L. S., Ariffin, E. H., Saengsupavanich, C., Abdul Maulud, K. N., Ramli, M. Z., Miskon, M. F., Jeofry, M. H., Mohamed, J., Mohd, F. A., Hamzah, S. B., & Yunus, K. (2024). The impact of climate change on coastal erosion in Southeast Asia and the compelling need to establish robust adaptation strategies. *Heliyon*, *10*(4), e25609. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2024.E25609>
- ESRI. (n.d.). *ArcGIS Pro*. Retrieved June 12, 2025, from <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview>
- Esri. (2024). World Imagery Wayback. ArcGIS Living Atlas. <https://livingatlas.arcgis.com/wayback/>
- Fan, A., Lei, F., Mancenido, M. V., Maciejewski, R., & MacEachren, A. M. (2024, May 11). Understanding Reader Takeaways in Thematic Maps Under Varying Text, Detail, and Spatial Autocorrelation. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*. <https://doi.org/10.1145/3613904.3642132>
- Fuentes, H., & Moncada, G. (2021). *Análisis multitemporal de la variación de la línea de costa en el Archipiélago de Jambelí desde 1985 hasta 2020 mediante el uso de sensores remotos y SIG*. [Escuela Superior Politécnica del Litoral]. <https://tinyurl.com/mr6w6dz4>
- 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*. Universidad del Norte.

- Gobernación de Antioquia, Universidad de Antioquia, Universidad Nacional, & Universidad del Norte. (2021). *Erosión costera en el litoral antioqueño Compilación de resultados*.
- Gómez, A. (2023). Using open-source methodologies in coastal research: a comparison of change detection techniques. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 96, 1–28. <https://doi.org/10.21138/bage.3318>
- Gómez Tapias, J., & Mateus Zabala, D. (2020). *The Geology of Colombia* (Vol. 4). Servicio Geológico Colombiano (SGC). <https://doi.org/10.32685/PUB.ESP.35.2019>
- Guerrero-Morales, J., Sampedro-Rosas, L., Ruz-Vargas, M. I., Silva Gómez, S. E., Fonseca, C. R., Gómez-Albores, M. Á., Guerrero-Morales, J., Sampedro-Rosas, L., Ruz-Vargas, M. I., Silva Gómez, S. E., Fonseca, C. R., & Gómez-Albores, M. Á. (2021). Análisis multicriterio para el desarrollo urbano en zonas costeras en un contexto de cambio climático: Caso en Acapulco, México. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(2), 85–104. <https://doi.org/10.15359/RCA.55-2.5>
- Gutiérrez Zambrano, H. (2021). *Estudio de susceptibilidad ante la erosión costera por medio de categorización de variables geológicas y oceanográficas utilizando sensores remotos y SIG. Caso de estudio: Puntilla de Santa Elena hasta Posorja* (Issue 1) [Escuela Superior Politécnica del Litoral]. <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/51487/1/T-76761.pdf>
- Himmelstoss, E. A., Henderson, R. E., Farris, A. S., Kratzmann, M. G., Bartlett, M. K., Ergul, A., McAndrews, J., Cibaj, R., Zichichi, J. L., & Thieler, E. R. (2024). *Digital Shoreline Analysis System version 6.0: U.S. Geological Survey software release*.
- Himmelstoss, E. A., Farris, A. S., Henderson, R. E., Kratzmann, M. G., Ergul, A., Zhang, O., Zichichi, J. L., & Thieler, E. R. (2021). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 5.1 User Guide*.
- Himmelstoss, E. A., Henderson, R. E., Kratzmann, M. G., & Farris, A. S. (2021). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 5.1 User Guide*.
- Imam, C., Chaibi, M., Ougougdal, M. A., Charif, A., Vacchi, M., & Pappalardo, M. (2024). Multitemporal analysis of cliffs evolution along an Atlantic African coast (Safi Region, Morocco). *Regional Studies in Marine Science*, 79. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103810>
- INVEMAR. (2016). *Concepto Técnico. Estudios de Erosión Costera en Playa Salguero, Rodadero, Santa Marta (Magdalena)*. www.invemar.org.co
- INVEMAR. (2021a). *Concepto Técnico. Problemática de Erosión Costera en Playa Salguero, los daños Ambientales Causados por un Espolón Construido a la altura del Edificio Playa Linda y las Posibilidades de Restauración Ambiental de la Playa*. www.invemar.org.co

- INVEMAR. (2021b). *Concepto Técnico Tipo “D” CPT-GEO-003-21*. www.invemar.org.co
- INVEMAR. (2023a). *Informe del estado de los ambientes y recursos marinos y costeros de Colombia 2023*. <https://www.researchgate.net/publication/379476979>
- INVEMAR. (2023b). *Respuesta a la solicitud del Concepto Técnico sobre efectos generados por la problemática de erosión costera en Playa Salguero – Santa Marta, en el marco de la queja presentada por la Defensoría del Pueblo No. 2023E1002083*.
- INVEMAR. (2024). *Concepto Técnico. Efecto del espolón construido en Playa Salguero en la calle 26 en la erosión de la playa del Sector*.
- INVEMAR. (2025). *Informe del Estado de los Ambientes Marinos y Costeros en Colombia, 2024*. www.invemar.org.co
- Islam, Md. K., Jahan, I., & Azad, A. (2025). Spatial Assessment of Coastal Erosion Vulnerability: Natural and Anthropogenic Factors in Chattogram, Bangladesh. *Natural Hazards Research*. <https://doi.org/10.1016/J.NHRES.2025.05.001>
- Jacobo, J., Guevara, H., & Cruz, Ó. (2024). Teledetección y Automatización En La Agricultura del Futuro. *Elementos 133*, 79–84.
- Joe, R. J. J., Pitchaimani, V. S., Mirra, T. V. N. S., & Karuppannan, S. (2025). Shoreline dynamics and anthropogenic influences on coastal erosion: A multi-temporal analysis for sustainable shoreline management along a southwest coastal district of India. *Environmental and Sustainability Indicators*, 27(May). <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100744>
- Khakhim, N., Kurniawan, A., Pranowo, W. S., Khasanah, E. U., & Halilintar, P. (2024). Shoreline morphological change prognostic model based on spatiotemporal framework imagery data on the northern coast of Java, Indonesia. *Kuwait Journal of Science*, 51(4). <https://doi.org/10.1016/j.kjs.2024.100274>
- Latif, M. M. H. A., & Yong, Gabriel. Y. V. (2021). Coastal Erosion in The Unprotected and Protected Sections At Berakas A comparative study in Brunei Darussalam. *Universiti Brunei Darussalam. Southeast Asia: A Multidisciplinary Journal.*, 21(1), 45–62.
- Londono, J., Schiek, C., & Biegert, E. (2015). Basement architecture of the Southern Caribbean Basin, Guajira Offshore, Colombia. In *American Association of Petroleum Geologists* (Vol. 108, pp. 85–102). <https://doi.org/10.1306/13531932M1083639>

- Louarn, A., Meur-Ferec, C., & Hervé-Fournereau, N. (2025). The concept of “nature-based solutions” applied to urban coastal risks: A bibliometric and content analysis review. *Ocean and Coastal Management*, 261(May 2024). <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2024.107530>
- MADS. (2018). AbE Guía de adaptación al cambio climático basada en ecosistemas en Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. In 2018.
- Marco Dos Santos, G., Meléndez Ignacio, & Navarro, J. (2022). *Aplicación de Teledetección y Gestión Integrada del Agua en Zonas Semiaridas* [Universidad Miguel Hernández de Elche]. <https://hdl.handle.net/11000/28961>
- McFall, B. C. (2019). The Relationship between Beach Grain Size and Intertidal Beach Face Slope. *Https://Doi.Org/10.2112/JCOASTRES-D-19-00004.1*, 35(5), 1080–1086. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-19-00004.1>
- Mendoza, L., & Muñoz, A. (2022). *Análisis de la Variación de la Línea Costera debido a los Procesos de Erosión y Sedimentación de Manera Natural y Antropogénica en la Bahía del Callao Empleando Imágenes de Satélite entre los años 2001 y 2020* [Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)]. <https://doi.org/10.19083/tesis/667263>
- Ministerio de Ambiente de Colombia. (2022). *Plan Maestro de Erosión Costera de Colombia (PEMEC)*. www.minambiente.gov.co
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible MADS. (2022). *Se inició la siembra de 1.5 km de uva de playa para frenar la erosión costera en Ciénaga*. <https://n9.cl/mn650>
- Moore, L. J. (2000). Shoreline Mapping Techniques. In *Source: Journal of Coastal Research* (Vol. 16, Issue 1). Winter.
- Neal, W. J., Pilkey, O. H., Cooper, J. A. G., & Longo, N. J. (2018). Why coastal regulations fail. *Ocean & Coastal Management*, 156, 21–34. <https://doi.org/10.1016/J.OCECOAMAN.2017.05.003>
- Orejarena Rondón, A. F. (2021). *Impacto del cambio global en las Costas del Caribe colombiano: análisis y riesgos del clima marítimo y nivel del mar*. <http://hdl.handle.net/10584/11305>
- Ortega, A. Y., Otero Díaz, L. J., & Cueto, J. E. (2023). Assessment and management of coastal erosion in the marine protected area of the Rosario Island archipelago (Colombian Caribbean). *Ocean & Coastal Management*, 239, 106605. <https://doi.org/10.1016/J.OCECOAMAN.2023.106605>
- Ortega Aguas, A. Y. (2022). *Análisis de la influencia del oleaje y el nivel del mar en los cambios morfológicos del Archipiélago de Islas del Rosario* [Universidad del Norte]. <https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/11474>

- Pérez, L. G., Ferrer, J. J., Bermejo, Á. I., Mejía, Y. K., & Romero, G. F. (2022). *Advances in the study of coastal processes in the continental Colombian Caribbean coast*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rsma.2022.102209>
- Planet Lab Inc. (2023). *PlanetScope Product Specifications*.
- Rangel, N., 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, N., Williams, A., & Anfuso, G. (2018). Hard protection structures as a principal coastal erosion management strategy along the Caribbean coast of Colombia. A chronicle of pitfalls. *Ocean & Coastal Management, 156*, 58–75. <https://doi.org/10.1016/J.OCECOAMAN.2017.04.006>
- Restrepo, J. J., & Toussaint, J. F. (2020). *Tectonostratigraphic terranes in Colombia: An update* (Servicio Geológico Colombiano, Ed.; Vol. 1). Publicaciones Geológicas Especiales. <https://doi.org/10.32685/PUB.ESP.35.2019.03>
- Ricaurte, C., Morales, D., Gonzales, M., Daza, M., Casadiego, J., & López, P. (2022). *Boletín Operación Estadística índice Erosión Costera de Colombia OE- IECC*. <https://tinyurl.com/e84f57vb>
- Ricaurte, C., Morales, D., Gonzales, M., Daza, M., Casadiego, J., Macías, P., & López, P. (2022). *Manual Metodológico de la Operación Estadística Índice de Erosión Costera de Colombia -OE IECC*. <https://tinyurl.com/c5p442ha>
- 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. In *Serie de Publicaciones Especiales de INVEMAR* (Vol. 13). Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives De Andrés.” <https://tinyurl.com/mpw88mzu>
- Rivera Payares, J. D. (2022). *Análisis de los cambios morfodinámicos de la línea de costa entre Santa Verónica y Galerazamba*. [Universidad del Norte]. <https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/11467/1193472564.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rodríguez-García, G., Zapata, J. P., Correa-Martínez, A. M., Ramírez, D. A., Obando, G., Rodríguez-García, G., Zapata, J. P., Correa-Martínez, A. M., Ramírez, D. A., & Obando, G. (2020). Aportes al conocimiento del plutonismo del Arco Mocoa- Santa Marta durante el Jurásico Temprano-

- Medio, en la margen noroccidental de los Andes, Colombia. *Boletín de Geología*, 42(3), 15–50. <https://doi.org/10.18273/REVBOL.V42N3-2020001>
- Rojas, Y., Orangel, Noriega, O. de J., Moreno, L. C. G., Buitrago, N. R., Gamba, C. F., Cuan, E. O., & Quiñonez, H. G. (2017). *Caracterización, Diagnóstico y Análisis de Vulnerabilidades y Amenazas en el Departamento del Magdalena* (p. 45). <https://tinyurl.com/nzj4pecw>
- Rosero Dávila, W. A., & Tamayo Erazo, M. E. (2016). *Estudio de los sensores empleados en las tecnologías de percepción remota a nivel internacional* [Universidad de las Américas (UDLA)]. <http://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/6375>
- Säenz-Reyes, J. A., Ríos-Reyes, C. A., & Castellanos-Alarcón, O. M. (2017). Itinerario geológico de la franja costera entre el Aeropuerto Internacional Simón Bolívar y la Bahía de Taganga, Provincia Geotectónica de Santa Marta. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 42, 5–24. <https://doi.org/10.15446/RBCT.N42.44920>
- Saleem, A., & Awange, J. L. (2019). Coastline shift analysis in data deficient regions: Exploiting the high spatio-temporal resolution Sentinel-2 products. *Catena*, 179, 6–19. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.03.023>
- Sánchez, C., & Arango, V. (2024). *Análisis Multitemporal de la Variación de la Línea de Costa de la Isla del Morro, Tumaco, Nariño para el Período 2013-2023 Utilizando Herramientas SIG y el Software DSAS* [Tesis, San Buenaventura]. www.usbcali.edu.co
- Sekar, L. G., Androws, X., Annaidasan, K., Kumar, A., Kannan, R., Muthusankar, G., & Balasubramani, K. (2024). Assessment of shoreline changes and associated erosion and accretion pattern in coastal watersheds of Tamil Nadu, India. *Natural Hazards Research*, 4(2), 231–238. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.09.008>
- SOLTIG, Proyectiva-Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), Instituto Meteorológico Nacional (IMN), & (MINAE), M. de A. y E. (2024). *Estudios y proyecciones de aumento en el nivel del mar y erosión costera para las dos costas de Costa Rica*. <https://n9.cl/ptenk>
- Tognin, D., D’Alpaos, A., D’Alpaos, L., Rinaldo, A., & Carniello, L. (2024). Statistical characterization of erosion and sediment transport mechanics in shallow tidal environments – Part 2: Suspended sediment dynamics. *Earth Surface Dynamics*, 12(1), 201–218. <https://doi.org/10.5194/esurf-12-201-2024>

- Toimil, A., Álvarez-Cuesta, M., & Losada, I. J. (2023). Neglecting the effect of long- and short-term erosion can lead to spurious coastal flood risk projections and maladaptation. *Coastal Engineering*, *179*, 104248. <https://doi.org/10.1016/J.COASTALENG.2022.104248>
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2019). *Erosión costera en Colombia*. <https://tinyurl.com/4ssbz9av>
- Vargas-T., V. H., Uribe-P., E., Rios-R., C. A., & Castellanos-A., O. M. (2016). Coastal landforms caused by deposition and erosion along the shoreline between Punta Brava and Punta Betin, Santa Marta, Colombian Caribbean. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, *40*(157), 664–682. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.387>
- Vieira, B., Pinho, J., Barros, J., & Antunes do Carmo, J. (2024). Optimizing coastal protection: Nature-based engineering for longitudinal drift reversal and erosion reduction. *Ocean and Coastal Management*, *256*(February). <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2024.107288>
- Villa Ealo, C. I., Conde Frías, M. A., & Álvarez Silva, O. A. (2023). *Análisis y retroceso de línea de costa frente a las salinas de Galerazamba (Bolívar)* [Universidad del Norte]. <https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/12831#page=30>
- Wang, J., Zhu, J., Sun, W., Zhang, S., Yuan, Z., Wang, X., Zhu, M., & Han, K. (2024). Study on the Impact of Coastline Changes on Tidal Range and Tidal Prism in the Southwest of Laizhou Bay. *Applied Sciences (Switzerland)*, *14*(24). <https://doi.org/10.3390/app142411955>
- Wu, Y., Liu, J., Zhu, Y., Zhang, Y., Cao, Y., Huang, K.-E., Zheng, B., Wang, Y., Li, Y., Wang, Q., Zhou, C., Liang, Y., Sun, J., Wang, M., & Rosenfeld, D. (2025). A global classification dataset of daytime and nighttime marine low-cloud mesoscale morphology based on deep-learning methods. *Earth System Science Data*, *17*(7), 3243–3258. <https://doi.org/10.5194/essd-17-3243-2025>
- Yincan et al, Y. (2017). Coastal Erosion. *Marine Geo-Hazards in China*, 269–296. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812726-1.00007-3>
- Zoysa, S., Basnayake, V., Samarasinghe, J. T., Gunathilake, M. B., Kantamaneni, K., Muttill, N., Pawar, U., & Rathnayake, U. (2023). Analysis of Multi-Temporal Shoreline Changes Due to a Harbor Using Remote Sensing Data and GIS Techniques. *Sustainability 2023, Vol. 15, Page 7651, 15*(9), 7651. <https://doi.org/10.3390/SU15097651>

Anexos

Anexo 1. Reporte_DSAS_Lopez_2025

Anexo 2. Geodatabase_Lopez_2025