RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	Ciro Andrey Martínez Ovallos
FACULTAD	Facultad de ingenierías
PLAN DE ESTUDIOS	Maestría en Construcción
DIRECTOR	Romel Jesus Gallardo Amaya
CODIRECTOR (si aplica)	Agustin Armando Magregor Torrado
TÍTULO DE LA TESIS	Análisis de alternativas para la gestión sostenible en zonas costeras mediante la integración de materiales avanzados de ingeniería: caso de estudio Salgar, Atlántico
TITULO EN INGLES	Analysis of Alternatives for Sustainable Management in Coastal Areas through the Integration of Advanced Engineering Materials: A Case Study of Salgar, Atlántico.

RESUMEN
(70 palabras)

El proyecto analiza alternativas para la gestión sostenible en zonas costeras mediante la integración de materiales avanzados de ingeniería, tomando como caso de estudio el corregimiento de Salgar, Atlántico. Se enfoca en los problemas de erosión costera y propone soluciones basadas en tecnologías innovadoras que mejoren la resiliencia y la protección ambiental de la región, contribuyendo al desarrollo sostenible de las comunidades locales.

RESUMEN EN INGLES

The project analyzes alternatives for sustainable management in coastal areas through the integration of advanced engineering materials, using the Salgar district in Atlántico as a case study. It focuses on coastal erosion issues and proposes solutions based on innovative technologies to enhance the resilience and environmental protection of the region, contributing to the sustainable development of local communities.

PALABRAS CLAVES	Gestión sostenible, Erosión costera, Materiales avanzados, Tecnologías innovadoras, Resiliencia ambiental.
PALABRAS CLAVES EN INGLES	Sustainable management, Coastal erosion, Advanced materials, Innovative technologies, Environmental resilience

CARACTERÍSTICAS

PÁGINAS: 206	PLANOS: 0	ILUSTRACIONES: 34	CD-ROM: 1

Análisis de alternativas para la gestión sostenible en zonas costeras mediante la integración de materiales avanzados de ingeniería: caso de estudio Salgar, Atlántico.

Martinez Ovallos Ciro Andrey

Facultad de Ingeniería, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña

Maestría en Construcción

Magister. Gallardo Amaya Romel Jesus

Magister. Macgregor Torrado Agustin Armando

02 de noviembre de 2024

INDICE

Pagina

1. Análisis de alternativas para la gestión sostenible en zonas costeras mediante la integración de materiales avanzados de ingeniería: Caso de estudio Salgar, Atlántico. 9

1.1. Planteamiento del Problema 9

1.2. Formulación del Problema 10

1.3. Objetivos de Investigación 11

1.3.1. Objetivo General 11

1.3.2. Objetivo Especifico 11

1.4. Justificación 12

1.5. Delimitaciones 13

1.5.1. Delimitación Geográfica 13

1.5.2. Delimitación Temporal 13

1.5.3. Delimitación Conceptual 14

1.5.4. Delimitación Operativa 15

2. Marco referencial 17

2.1. Marco Histórico 17

2.1.1. Antecedentes 18

2.1.2. Vulnerabilidad y cambio climático en Colombia 22

2.2. Marco Contextual 26

2.2.1. Factores condicionantes del Atlántico 27

2.3. Marco Conceptual 32

2.3.1. Erosión costera 32

2.3.2. Acción hidráulica 32

2.3.3. Propagación del oleaje y corrientes marinas 33

2.3.4. Transporte longitudinal de sedimentos (TLS) 34

2.3.5. Riesgo y vulnerabilidad costera 36

2.4. Marco Teórico 41

2.4.1. Impactos de las obras de ingeniería en las costas 43

2.4.2. Procesos de erosión y acreción 44

2.4.3. Estructuras de protección 46

2.5. Marco Legal 48

3. Diseño metodológico 52

3.1. Tipo de investigación 52

3.2 Seguimiento metodológico del proyecto 52

3.3 Población 54

3.4 Muestra 54

3.5 Técnicas de recolección y análisis de la información 54

3.5.1 Técnicas de recolección de información 54

3.5.2 Análisis de la información 57

4. Resultados 60

4.1. Elaborar un análisis integral de las condiciones climáticas marítimas y la dinámica costera en Salgar, Atlántico, mediante el estudio del viento, oleaje y transporte de sedimentos, con el fin de identificar patrones de erosión y sedimentación. 60

4.1.1. Alturas de ola y dirección del periodo pico 60

4.1.2. Dirección y altura predominante de olas 64

4.1.3. Número medio y máximo de tormentas 68

4.1.4. Periodos pico y probabilidades de excedencia 72

4.1.5. Alturas de ola asociadas al periodo de retorno 79

4.1.6. Propagación del oleaje 84

4.1.7. Tasas de erosión – acreción costera 90

4.1.8. Análisis de transporte de sedimentos 95

4.2. Proponer alternativas constructivas sostenibles, para mitigar los impactos negativos de la erosión costera en Salgar y promover la conservación y sostenibilidad del entorno costero. 109

4.2.1. Alternativas propuestas 110

4.2.2. Análisis de vulnerabilidad 126

4.2.3. Matriz de selección para las alternativas propuestas 137

4.3. Establecer las características y especificaciones técnicas detalladas para la implementación de las alternativas constructivas propuestas. 141

4.3.1. Alternativa 1: Revegetación y plantación en los espolones mediante geotextiles. 141

4.3.2. Alternativa 2: Estructuras modulares con materiales avanzados. 157

4.3.3. Alternativa 3: Rehabilitación de dunas con vegetación autóctona. 170

4.3.4. Alternativa 4: Creación de zonas húmedas o marismas artificiales. 181

5. Conclusiones 192

6. Recomendaciones 194

7. Referencias 195

Lista de Figuras

Pag.

Figura 1 Zona de estudio..... 19

Figura 2 Foto histórica del castillo de salgar 1941. 20

Figura 3 Alturas significantes y dirección predominante del periodo pico de olas por estaciones 61

Figura 4 Alturas significantes y dirección predominante del periodo pico de olas promedio..... 63

Figura 5 Dirección y altura predominante de olas por estaciones 65

Figura 6 Dirección y altura predominante de olas promedio anual 68

Figura 7 Dirección y altura predominante de olas promedio mensual 69

Figura 8 Dirección y altura predominante de olas promedio anual 71

Figura 9 Alturas representativas de ola Vs periodos pico..... 74

Figura 10 Probabilidad de excedencia para los periodos pico 75

Figura 11 Probabilidad de excedencia para altura de significancia de olas..... 76

Figura 12 Dirección del periodo de ola y energía normalizada en periodos de tormenta 78

Figura 13 Dirección del periodo de ola y energía normalizada en periodos de tormenta 80

Figura 14 Altura significante de ola para un periodo de retorno de 100 años..... 82

Figura 15 Velocidad del viento para un periodo de retorno de 100 años 83

Figura 16 Malla de modelación 85

Figura 17 Altura de olas para el entorno de modelación 86

Figura 18 Inspección visual de estructuras a lo largo de la playa de Salgar 87

Figura 19 Inspección visual de estructuras del sector turístico de la zona 89

Figura 20 Inspección visual de estructuras de vivienda comunidad aledaña a la playa 89

Figura 21 Tasa de erosión LRR para la época seca en el área de estudio 91

Figura 22 Tasa de erosión LRR para la época húmeda en el área de estudio 93

Figura 23 Análisis del punto con mayor tasa de erosión en los últimos 30 años 95

Figura 24 Ubicación de los puntos de análisis. 96

Figura 25 Análisis granulométrico para la playa 1 97

Figura 26 Análisis granulométrico para la playa 2 99

Figura 27 Análisis granulométrico para la playa 3 100

Figura 28 Análisis granulométrico para la playa 4 102

Figura 29 Análisis granulométrico para la playa 5 103

Figura 30 Presencia de arbustos y gramíneas en la zona de estudio 112

Figura 31 Dunas estabilizadas con vegetación autóctona de la zona 118

Figura 32 Spartina alterniflora 144

Figura 33 Ipomoea pes-caprae 145

Figura 34 Mimosa pigra 146

Lista de Tablas

Pag.

Tabla 1 Modelo Metodológico..... 53

Tabla 2 Resultado del análisis de avance de orilla en el área de estudio para la época seca. 92

Tabla 3 Resultado del análisis de avance de orilla en el área de estudio para la época húmeda. . 93

Tabla 4 Valores de d50 para las muestras de sedimentos del área de estudio 105

Tabla 5 Valores de la componente oceanográfica del área de estudio 106

Tabla 6 Resultados del cálculo de Transporte Longitudinal de Sedimentos 107

Tabla 7 Valoración del índice de amenaza de erosión costera 129

Tabla 8 Valoración del índice de vulnerabilidad social..... 130

Tabla 9 Valoración del índice vulnerabilidad económica..... 131

Tabla 10 Valoración del índice de vulnerabilidad de conservación 132

Tabla 11 Escala de valoración de los índices de vulnerabilidad y amenaza..... 135

Tabla 12 Escala de valoración de los índices de vulnerabilidad y amenaza..... 135

Tabla 13 Análisis de vulnerabilidad para las cinco playas analizadas..... 136

Tabla 14 Evaluación de alternativas 139

1. Análisis de alternativas para la gestión sostenible en zonas costeras mediante la integración de materiales avanzados de ingeniería: Caso de estudio Salgar, Atlántico.

1.1. Planteamiento del Problema

El corregimiento de Salgar, ubicado en el municipio de Puerto Colombia, Atlántico, evidencia una acelerada afectación de sus playas y de su zona costera, la cual se ha visto acentuada por la erosión natural y la intervención humana. Las estructuras artificiales (espolones, diques, etc.) que se pensaron como una protección de la costa, han alterado los patrones naturales de sedimentación y erosión del litoral, esto generó un problema adicional que comprometió la infraestructura urbana (Garzón et al., 2022) esta alteración ha incrementado la vulnerabilidad de viviendas, comercios y redes de servicios públicos, debido a los procesos erosivos y eventos climáticos extremos en las costas, lo que pone en riesgo no solo a la seguridad de la población, sino también la funcionalidad de la infraestructura necesaria, con costes económicos y sociales importantes (Connell & Beattie, 2003).

Frente a esta situación es necesario no solo una compresión de los procesos de erosión costera, sino una identificación y proposición de soluciones que sean sostenibles y en coherencia con el desarrollo urbano responsable (Zainuddin et al., 2024). El análisis debe estar acoplado con la adopción de soluciones que mitiguen la erosión costera y que garanticen una gestión respetuosa de la naturaleza (Uribe-Castañeda et al., 2020); a partir de la comprensión de factores como el clima marítimo, la propagación del oleaje y el transporte de sedimentos con los cuales es

posible platear soluciones que cedan protagonismo a la restauración natural del litoral; de intervenciones que incluyan infraestructuras verdes, en el sentido de restauración de dunas, de manglares como barreras costeras frente a la erosión; o bien de infraestructuras de ingeniería avanzada en su construcción como son el uso de concretos permeables, de geotextiles, de compuestos de alta resistencia e incluso de bioingeniería costera, que sean capaces de resistir la acción que pueda tener el cambio climático y las fuerzas de la naturaleza sobre este litoral.

El trabajo de investigación planteado propone desarrollar un conjunto de alternativas que no solo tenga en cuenta la protección de las infraestructuras existentes en el lugar sino que también permita, al mismo tiempo, una sostenibilidad del medio natural y una resiliencia del desarrollo urbano de Salgar. Esto comprende, entre otras cosas, la aplicación de tecnologías innovadoras y la promoción de alternativas como la infraestructura híbrida que integra la ingeniería tradicional con la ingeniería verde. De esta manera, la aplicación de estas soluciones no solo pretende atajar los efectos negativos de la erosión, sino que también se dirige a promover la restauración de los ecosistemas costeros, a proteger el desarrollo urbano en la costa y a asegurar la existencia de la comunidad humana frente a las amenazas medioambientales presentes y futuras.

1.2.Formulación del Problema

¿Qué alternativas de construcción sostenible podrían brindar protección a las edificaciones y estructuras urbanas en Salgar, Atlántico, considerando la dinámica costera y la integración de estructuras verdes?

1.3.Objetivos de Investigación

1.3.1. Objetivo General

Proponer alternativas de construcción sostenible para mitigar la erosión costera en Salgar, Atlántico, mediante el análisis de la dinámica costera y la integración de estructuras verdes, para proteger la infraestructura existente y garantizar la seguridad estructural y el desarrollo sostenible en la región.

1.3.2. Objetivo Especifico

- Elaborar un análisis integral de las condiciones climáticas marítimas y la dinámica costera en Salgar, Atlántico, mediante el estudio del viento, oleaje y transporte de sedimentos, con el fin de identificar patrones costeros de erosión y sedimentación.
- Plantear alternativas constructivas sostenibles, que permitan mitigar los impactos de la erosión costera en Salgar y promover la conservación y sostenibilidad del entorno costero.

- Establecer las características y especificaciones técnicas detalladas de las obras propuestas para la mitigación de la erosión y demás problemas identificados con la línea base del proyecto.

1.4.Justificación

Los procesos de erosión costera sobre las playas de Salgar, ha causado un deterioro considerable en la infraestructura existente. La vulnerabilidad de estas estructuras frente a los procesos erosivos y eventos extremos como tormentas y cambios en los niveles del mar requiere una evaluación detallada para identificar las áreas más críticas y proponer soluciones adecuadas (Barbaro et al., 2014; “Coastal Erosion and Protection Measures Including Case Studies,” 2019; Cooper & Dolan, 2012).

En este contexto, se plantea la necesidad de realizar una evaluación integral del impacto de la erosión en las edificaciones. Es esencial comprender cómo la erosión afecta estos elementos para desarrollar estrategias efectivas de gestión costera. La investigación se enfoca en emplear alternativas constructivas sostenibles, como la revegetación de costas, la construcción de barreras verdes, humedales artificiales y barreras de coral, con el objetivo de mitigar los efectos negativos de la erosión y promover una gestión costera que sea respetuosa con el medio ambiente y beneficiosa para las comunidades locales.

La integración de estructuras verdes en la construcción y el desarrollo de prácticas de construcción sostenible son cruciales para enfrentar los desafíos actuales. Estos enfoques no solo

ayudarán a proteger y preservar las infraestructuras y servicios públicos existentes, sino que también contribuirán al desarrollo sostenible de la región, garantizando su resiliencia y capacidad de adaptación frente a futuros eventos climáticos y ambientales.

Esta investigación busca preservar la integridad de la región costera de Puerto Salgar, abordando las afectaciones en edificaciones y servicios públicos, e impulsando el uso de estructuras verdes y prácticas sostenibles. La investigación proporcionará una base sólida para la formulación de estrategias que aseguren la protección del entorno costero y el desarrollo armonioso de la comunidad, garantizando su sostenibilidad a largo plazo.

1.5.Delimitaciones

1.5.1. Delimitación Geográfica

El estudio se focaliza en la región costera de la Playa Salgar, ubicada en el corregimiento de Salgar, municipio de Puerto Colombia, en el departamento del Atlántico, Colombia. Se incluye la franja costera que abarca desde el borde de la playa hasta una distancia aproximada de 500 metros tierra adentro, con una longitud total aproximada de 4390 m. Adicionalmente las cinco playas de interés tienen una extensión promedio de 370 m.

1.5.2. Delimitación Temporal

El estudio se enmarca en una perspectiva temporal de 30 años, lo que permite una evaluación exhaustiva de la evolución de la línea de costa y los efectos de la erosión en la Playa Salgar. La delimitación temporal se organiza en función de diferentes periodos clave para la recopilación y análisis de datos. El periodo de 30 años permite como lo han mencionado autores como (El-Asmar & White, 2002; García-Ruiz et al., 2024; Kantardgi et al., 2019), identificar periodos pico o de clima extremo permitiendo bajo los cuales es necesario realizar el diseño de las estructuras de abrigo o protección.

1.5.3. Delimitación Conceptual

• Erosión Costera: hace referencia a un proceso natural o acelerado de desgaste y de desplazamiento de los sedimentos de la línea de costa, que es ocasionado por la influencia de las oleadas, las marejadas, los vientos y otros factores ambientales. El enfoque del estudio gira en torno al alcance que tiene la erosión costera sobre la línea de costa y respecto de la infraestructura costera (Duc & Hieu, 2017).

• Dinámica Costera: hace referencia a la interacción de procesos naturales con procesos humanos que afectan la forma y el comportamiento de la línea de costa. Considera la sedimentación, el desplazamiento de los sedimentos, y la influencia de los fenómenos meteorológicos y climáticos (Fan et al., 2019).

• Construcción Sostenible: hace referencia a un enfoque de la construcción que busca producir el menor impacto medioambiental, la mayor eficiencia de los recursos y una mayor capacidad de resiliencia a largo plazo. Este enfoque contempla los materiales avanzados y las técnicas que reduzcan los efectos de la erosión costera y promuevan adaptarse a las condiciones de la costa (Chang & Mori, 2021; Duc et al., 2017).

• Gestión Sostenible de Costas: hace referencia a aquellas estrategias y prácticas para gestionar los recursos de la costa de manera efectiva y equilibrada, que permiten asegurar la conservación y la adaptabilidad de los mismos ante la erosión costera y otros desafíos medioambientales.

1.5.4. Delimitación Operativa

A nivel operativo se consideran los siguientes aspectos:

• Dinámica Costera: Se evaluará la dinámica costera de Playa Salgar, contemplando la erosión, sedimentación y la influencia de fenómenos meteorológicos. Esto incluirá tanto el análisis histórico como la evaluación actual de la línea de costa (Blair et al., 2022).

• Impacto en Infraestructura: Se recabará información exhaustiva de la infraestructura existente en la zona, incluyéndose edificaciones residenciales y comerciales, así como los servicios públicos que resultan afectados por la erosión (Yuhi, 2008).

• Uso de Nuevos Materiales: Se indagará en la nueva tecnología y materiales de la ingeniería para la construcción sostenible que sean aplicables a la zona costera, los cuales ayuden a reducir los efectos de la erosión costera y a promover la resiliencia costera.

2. Marco Referencial

2.1.Marco Histórico

Se ha dado interés a la erosión costera desde tiempos remotos, sobre todo en las comunidades costeras que dependían de ella para su subsistencia (Ricaurte-Villota et al., 2021b). Pero es desde el siglo XIX cuando se empieza a estudiar de forma sistemática la erosión costera, pues el avance de la geografía física y la geología como disciplinas científicas había tomado forma. Los primeros estudios especificaban las comprensiones de los procesos naturales, principalmente la acción de las olas y las mareas, y cómo afectaban la morfología costera (Moradi et al., 2022).

Con el crecimiento urbano e industrial en las zonas costeras durante el siglo XX, la erosión costera pasó de ser una curiosidad científica a un problema importante de tipo social y económico (Ricaurte-Villota et al., 2021b); en dicho periodo empiezan a generar los primeros y prematuros planes de gestión costera, protegiendo las infraestructuras y las propiedades costeras pero en todos los casos dando soluciones como muros de protección y espigones que, en lugar de ayudar, lo que hacían era agravar el problema en otras vertientes (Fleming, 1991).

En el siglo XX y tras haber llegado a tener un cierto reconocimiento el estudio de la erosión costera, los científicos comenzaron a considerar la influencia del cambio climático sobre la aceleración de la erosión de las costas. El aumento del nivel del mar, provocado por el deshielo de los glaciares y la expansión térmica de los océanos, fue considerado un factor

importante para la modificación de las líneas costeras (Fleming, 1991); así como también los eventos climáticos extremos -huracanes, ciclones- que se esperaban aumentar con frecuencia e intensidad en el tiempo, que aumentaban el riesgo para las zonas costeras.

A medida que avanzaba el siglo XXI, los estudios de erosión costera comenzaron a incorporar enfoques multidisciplinarios, integrando la geología, la oceanografía, la ingeniería civil, la ecología y las ciencias sociales. La necesidad de comprender no solo los procesos físicos, sino también los impactos socioeconómicos y culturales, llevó al desarrollo de metodologías más complejas para evaluar el riesgo y la vulnerabilidad costera. Estas metodologías comenzaron a utilizar sistemas de información geográfica (SIG) y modelos computacionales avanzados para analizar escenarios futuros y planificar estrategias de mitigación (Fleming, 1991).

2.1.1. Antecedentes

Esta investigación se sitúa en la región costera de Puerto Colombia, en el departamento del Atlántico, Colombia, con un enfoque particular en la Playa Salgar (Figura 1). Esta playa, que se ha convertido en un destino de creciente popularidad debido a su proximidad con la ciudad de Barranquilla, ha visto un aumento significativo en la afluencia turística en los últimos años. Este incremento en la actividad humana, sumado a factores ambientales y geográficos, ha generado la necesidad de comprender en mayor profundidad la dinámica marina y litoral de esta zona costera (Bolívar et al., 2019).

Figura 1

Zona de estudio



Nota. La nomenclatura de P1 a P5 corresponden a las diferentes playas analizadas dentro de la zona de estudio. Del lado izquierdo de la figura se visualiza una vista en planta de las playas.

Puerto Salgar, además de su atractivo turístico, es hogar de un importante patrimonio histórico: el Castillo de San Antonio de Salgar (Figura 2). Este castillo, construido en 1848 por los españoles con el propósito de controlar el contrabando marítimo en la región, ha evolucionado en la actualidad hacia un centro cultural que alberga eventos y actividades recreativas, añadiendo un valor cultural y turístico significativo a la zona.

Figura 2

Foto histórica del castillo de salgar 1941.



Nota. Tomado del Periódico cultural de la costa Caribe. (Panorama Cultura, 2023)

Sin embargo, la Playa Salgar enfrenta graves desafíos relacionados con la erosión costera y la conservación del entorno natural. La presión antropogénica, derivada del desarrollo urbano y la actividad turística, junto con la vulnerabilidad de la costa frente a eventos climáticos extremos como tormentas y el aumento del nivel del mar, ha puesto en riesgo tanto la infraestructura como las comunidades locales. Esta situación ha llevado al alcalde de Puerto Colombia, Wilman Vargas, a declarar la calamidad pública en la región, especialmente en las playas ubicadas entre el muelle y el parque de Vistamar. Este sector, de aproximadamente 1.500 metros, ha sido identificado como una zona crítica, y se han destinado más de 7.800 millones de pesos para la construcción de tres espolones y el relleno de playas, con el fin de estabilizar la línea costera y proteger a las familias que dependen del turismo (Bolívar et al., 2019).

Además, el área comprendida entre el Hotel Pradomar y el sector Mahalo, cerca del Castillo de San Antonio de Salgar, es otro punto vulnerable que ha sufrido los efectos de la erosión. Este castillo, un importante patrimonio cultural y turístico, también está en riesgo debido al avance del mar, lo que subraya la necesidad urgente de implementar medidas de mitigación y protección.

La erosión costera en esta región ha sido exacerbada por el cambio climático, que ha intensificado fenómenos como el ascenso del nivel del mar y los coletazos de huracanes que afectan la zona. En respuesta a esta problemática, el gobierno, liderado por el Ministerio del Medio Ambiente, junto con las Corporaciones Autónomas Regionales (CARs) y el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (Invemar), está desarrollando un Plan de Acción que incluye la construcción de barreras en el mar para reducir la energía de las olas y corrientes que erosionan las playas, así como la rehabilitación de archipiélagos e islas que históricamente servían como barreras naturales (INVEMAR, 2018).

El área de estudio se caracteriza por un clima cálido sub-húmedo a seco, con condiciones semiáridas predominantes, especialmente en Puerto Colombia. Las masas de agua, como el mar Caribe y el río Magdalena, juegan un papel crucial en la modulación del clima local. Las brisas marinas ayudan a suavizar las temperaturas, mientras que los vientos que arrastran las nubes hacia el interior del continente reducen la precipitación cerca de la costa, aumentando hacia el interior.

2.1.2. Vulnerabilidad y cambio climático en Colombia

En Colombia, la erosión costera se considera un problema creciente, en especial sobre la región Caribe y el Pacífico (Bolívar et al., 2019; Caribe et al., 2007; Coca-Domínguez et al., n.d.; Coca-Domínguez & Ricaurte-Villota, 2019). A mediados del siglo XX, el desarrollo de puertos, urbanizaciones y el incremento de la actividad turística, ocasiono que las costas colombianas experimentaran una presión antropogénica significativa. Que unido a la falta de planificación y la implementación de infraestructuras costeras sin un adecuado estudio de impacto han contribuido a la aceleración de la erosión en varias áreas críticas. A lo largo de las últimas décadas, estudios realizados por instituciones como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y universidades nacionales han empezado a documentar y evaluar el impacto de la erosión costera, aunque la integración de este conocimiento en políticas efectivas de gestión costera aún enfrenta desafíos (INVEMAR, 2018).

Por otro lado, el cambio climático ha tomado una posición central en las agendas gubernamentales y no gubernamentales en las últimas décadas, debido a sus graves implicaciones a nivel global. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), establecida en 1992, define este fenómeno como "un cambio del clima atribuible directa o indirectamente a actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera global, sumándose a la variabilidad natural del clima observada durante períodos comparables". Desde esa fecha, el reconocimiento del impacto del cambio climático ha crecido considerablemente. Según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), desde 1990 las temperaturas globales han aumentado en promedio 1.1°C, lo que ha intensificado la

frecuencia de fenómenos climáticos extremos, especialmente en regiones vulnerables como América Latina (Narváez et al., 2019).

En el contexto latinoamericano, los sectores más afectados por el cambio climático incluyen los recursos hídricos, la agricultura, los ecosistemas forestales y costeros, así como los sistemas marinos, afectando directamente la seguridad alimentaria y la biodiversidad. Según un informe del IPCC de 2014, las proyecciones indican que para 2050 la región enfrentará pérdidas del 30% en la producción agrícola debido a cambios en los patrones de precipitación y temperatura. Las zonas costeras, en particular, son muy vulnerables debido al aumento acelerado del nivel del mar, que se ha incrementado a una tasa promedio de 3.3 mm por año desde 1993, según datos del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Carmona et al., 2024; Narváez et al., 2019).

En Colombia, los efectos del cambio climático son evidentes en sus zonas costeras. El país posee una línea costera de 3.340 km que incluye los litorales del Caribe y Pacífico, además de territorios insulares como el archipiélago de San Andrés y Providencia en el Caribe y las islas Gorgona, Gorgonilla y Malpelo en el Pacífico. Las proyecciones del IDEAM indican que, para finales del siglo XXI, el nivel del mar podría aumentar hasta 1 metro en la región del Caribe colombiano. Este incremento, combinado con el cambio en los patrones de precipitación y la mayor frecuencia de tormentas, afectará a más del 22% de la línea costera del Caribe, que ya sufre un alto grado de erosión (INVEMAR, 2018; MinAmbiente, n.d.).

En términos numéricos, se estima que 569 km de la costa caribeña (22.2% del total) y 356 km de la costa pacífica (20% del total) presentan algún grado de erosión. Estos efectos, exacerbados por el ascenso del nivel del mar y las tormentas más intensas, ponen en riesgo tanto los ecosistemas costeros, como los manglares y los arrecifes de coral, que cubren amplias áreas de la plataforma continental. Según la II Comunicación Nacional ante la CMNUCC (2010), estas áreas están en riesgo de sufrir inundaciones, salinización de acuíferos, degradación de ecosistemas y desplazamientos de poblaciones costeras, afectando a aproximadamente 1.4 millones de personas que viven en estas zonas (INVEMAR, 2018; MinAmbiente, n.d.).

La vulnerabilidad de las zonas costeras de Colombia está ligada a factores geográficos, socioeconómicos y ambientales. Las proyecciones de la CMNUCC y el IPCC destacan que las islas oceánicas colombianas, como San Andrés y Providencia, son particularmente susceptibles a los impactos del calentamiento global, debido a su exposición directa a fenómenos como tormentas más intensas y el aumento del nivel del mar, que podría alcanzar entre 0.28 y 0.98 metros para el año 2100. Estas proyecciones subrayan la necesidad urgente de implementar medidas de adaptación y mitigación en las zonas costeras colombianas para minimizar los impactos en los sistemas biológicos, sociales y económicos (Narváez et al., 2019).

De acuerdo con las proyecciones del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), se estima que el nivel del mar podría aumentar entre 80 centímetros y 1 metro en los próximos cien años. En las zonas costeras de Colombia, que albergan aproximadamente 2.620.853 habitantes, el 56% de la población vive en áreas con algún grado de riesgo de inundación, mientras que el 14% se encuentra en zonas afectadas por otros impactos, y solo el

30% reside en áreas sin un impacto directo. Esto implica que alrededor de 1.482.629 personas, equivalentes al 4% de la población del país, están expuestas a algún tipo de amenaza relacionada con el cambio climático (Carmona et al., 2024; Narváez et al., 2019).

Estudios realizados por el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (Invemar) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) confirman que las zonas costeras e insulares de Colombia son las más vulnerables a los efectos del cambio climático. Por ejemplo, en la zona costera del Caribe, el 4.9% de las áreas destinadas a cultivos y pastos podrían verse afectadas por inundaciones, al igual que el 44.8% de la red vial terrestre de la región. En San Andrés, se estima que el 17% de la isla podría ser inundado, lo que afectaría las vías principales, el aeropuerto, la infraestructura hotelera y las áreas pobladas cercanas a la costa. Además, la intrusión de agua salina comprometería los acuíferos que suministran el 82% del agua potable de la isla (INVEMAR, 2018).

Para el año 2050, se espera un aumento del 15% en las precipitaciones en la zona del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, y para el 2080, este incremento llegaría al 20%, lo que afectaría negativamente el sistema de saneamiento básico de la región (Narváez et al., 2019).

Asimismo, se proyecta que para el año 2030, el cambio climático impactará al 2% de la población total de Colombia y al 2.2% del Producto Interno Bruto (PIB). Además, se prevé una reducción significativa en la cobertura de ecosistemas marinos y costeros, como los manglares,

de los cuales Colombia posee la mayor extensión en el Pacífico americano. La exposición prolongada de los arrecifes coralinos a altas temperaturas podría causar su blanqueamiento, llevar a su muerte y reducir su capacidad para proteger la costa de eventos extremos, como mares de leva y huracanes, además de afectar especies comerciales clave, como peces y crustáceos (Narváez et al., 2019).

2.2.Marco Contextual

El Caribe colombiano se sitúa en el extremo noroccidental de Suramérica, limitando al norte con Jamaica, Haití y República Dominicana; al noroeste con Nicaragua y Costa Rica; al este con Venezuela, en la región de Castilletes (N 11°50' W 71°18'); y al oeste con Panamá, en la zona de Cabo Tiburón (N 08°42' W 77°19'). Su línea de costa abarca 1.760 km, mientras que el área de su zona costera es de 35.207 km² (INVEMAR, 2002).

Políticamente, la región está compuesta por ocho departamentos: La Guajira, Magdalena, Atlántico, Bolívar, Sucre, Córdoba, Antioquia y Chocó. Estos departamentos están interconectados por vías en buen estado, excepto Chocó, que solo es accesible por vía aérea o marítima.

El paisaje de la costa Caribe está formado por depósitos cuaternarios y colinas terciarias bajas, que aparecen como lomeríos aislados de menos de 500 metros de altura en la llanura costera. En el interior de la península de La Guajira se destacan las serranías de Macuica, Jarara

y Cocinas, compuestas por rocas antiguas, al igual que la Sierra Nevada de Santa Marta, que se eleva hasta los 5.770 msnm entre los departamentos de La Guajira, Cesar y Magdalena (Andrade-Amaya et al., 2017; MinAmbiente, n.d.; Ricaurte-Villota et al., 2021b).

A lo largo de las costas altas se encuentran plataformas de abrasión, terrazas y antiguos cuerpos arrecifales, visibles en distintos niveles debido a movimientos tectónicos y fenómenos diapíricos. Los procesos morfodinámicos e hidrodinámicos moldean una línea de costa variada, con bahías tranquilas, estuarios, acantilados y salientes rocosos, así como frentes deltaicos dinámicos, lagunas costeras y pantanos de manglares, lo que resulta en una geografía costera compleja y diversa (Kokot & Chomnalez, 2011; Merlotto & Bértola, 2009; Rodriguez et al., 2022).

2.2.1. Factores condicionantes del Atlántico

El Departamento del Atlántico se ubica en el noreste de Colombia, limitando al oriente con el Departamento de Magdalena, separado por el cauce del río Magdalena (11° 6’ 3.5“N y 74° 51’ 2.3“ W), y al suroeste con el Departamento de Bolívar (10° 47’ 48.3“ N y 75° 13’ 20.9“ W). Según proyecciones del Dane para 2018, la población del departamento es de 2.545.924 habitantes. La línea costera se extiende por 65,7 km, de los cuales el 22% está altamente amenazada por erosión y el 9% presenta una alta vulnerabilidad. Entre las localidades más afectadas por la erosión costera se encuentra Puerto Colombia, con una población de 26.741 habitantes (Bolívar et al., 2019).

La línea costera del Atlántico presenta una longitud de 65,7 km, y los rasgos morfológicos predominantes, en constante cambio debido a la dinámica litoral, incluyen manglares, deltas, playas, acantilados y lagunas costeras. La influencia del material arrastrado por el río Magdalena, que desemboca al norte del departamento, contribuye al deterioro de las playas, que son de vital importancia económica para la comunidad local (INVEMAR, 2018).

Condiciones Oceanográficas y Climáticas: El departamento tiene una temperatura anual promedio de 27,5°C y recibe precipitaciones anuales de aproximadamente 1.200 mm, con picos en octubre. La amplitud mareal no supera el metro de altura (Daniel et al., 2015). El oleaje muestra un patrón bimodal: las olas más altas se producen entre diciembre y abril debido a los vientos alisios del noreste, mientras que de abril a junio se observa una notable disminución, alcanzando valores mínimos en mayo. En los meses de junio a agosto, se incrementa nuevamente la altura de las olas, seguida de una disminución entre agosto y noviembre (Bernal et al., 2014).

El régimen de precipitaciones en la costa del Atlántico también sigue un patrón bimodal, con un primer período lluvioso de septiembre a noviembre, con máximos en octubre, y un segundo período entre mayo y junio. La temporada seca más intensa ocurre de diciembre a abril, mientras que una temporada seca menos pronunciada se da entre junio y agosto.

Características Socioeconómicas: Las principales actividades económicas en la región costera incluyen la ganadería, la pesca y el turismo. El turismo de playa, a pesar de la

infraestructura insuficiente para su desarrollo óptimo, es una actividad destacada. Las playas más visitadas son Santa Verónica, Puerto Colombia, Turipaná y Puerto Velero (Bolívar et al., 2019).

Geología, Geomorfología e Hidrografía: Las unidades geomorfológicas del Atlántico incluyen acantilados altos en las costas elevadas, y playas, barras de arena, lagunas y ciénagas costeras en las zonas bajas. Las barras formadas por sedimentos como arenas y gravas han dado lugar a playas y lagunas internas. Los acantilados presentan morfologías escarpadas, con rocas resistentes a la erosión, pero susceptibles a desprendimientos por inestabilidad estructural (INVEMAR, 2018).

Las rocas expuestas en la costa son principalmente sedimentarias del Terciario y Cuaternario, parte del Cinturón Plegado de Sinú–San Jacinto, incluyendo la Formación San Cayetano (limolitas y areniscas finas), la Formación Pendales (conglomerados), la Formación Las Perdices (shales y areniscas) y la Formación La Popa (calizas arrecifales). Los depósitos cuaternarios comprenden arenas y sedimentos eólicos (INVEMAR, 2007).

El río Magdalena, que separa los departamentos del Atlántico y Magdalena, es el principal afluente del mar Caribe. Su caudal promedio es de 7.100 m^3/s, y transporta anualmente 185 millones de toneladas de sedimentos en suspensión, distribuidos a lo largo del litoral del Caribe (INVEMAR, 2007). Además, el litoral presenta lagunas costeras protegidas del oleaje por barras de arena, que pueden ser vulnerables a la erosión de estas barreras.

Amenaza: En el Departamento del Atlántico, el 55% de la línea costera está clasificada con una amenaza alta o media, afectando especialmente las zonas de costas bajas, donde predominan playas y playones. Las áreas con amenaza baja se encuentran en geoformas de acantilados y terrazas marinas, cuyas litologías son más resistentes a la acción del oleaje, aunque pueden experimentar caídas de bloques y deslizamientos debido a sus características estructurales (INVEMAR, 2018).

La principal causa de la amenaza alta ha sido la erosión costera, con tasas elevadas registradas en los últimos 20 años, especialmente en áreas cercanas a Puerto Colombia, donde la línea de costa ha retrocedido hasta 130 metros. Las intervenciones humanas, como las obras de infraestructura, han acelerado este proceso erosivo al modificar el terreno y agravar la pérdida de costa.

Procesos Costeros: En la zona norte del departamento, desde Punta Sabanilla hasta Tajamar, los procesos erosivos son claramente visibles. Estos procesos son regulados por la inestabilidad del terreno y la presencia de formaciones cuaternarias y depósitos fluviolacustres de baja resistencia, que han provocado retrocesos de hasta 2 km en los últimos 30 años. En contraste, al norte de Punta Sabanilla, donde afloran rocas cohesivas de la Formación La Popa, se observa una condición de equilibrio desde los años noventa (INVEMAR, 2008).

Las playas de Santa Verónica enfrentan una erosión avanzada que afecta el turismo en la región. Como respuesta, la comunidad ha instalado bolsacretos y empalizadas para mitigar el

avance de la erosión y proteger la infraestructura local (INVEMAR, 2015). Además, los cambios en la sedimentación aportada por el río Magdalena han llevado a la reducción de espigas y cordones litorales, por lo que es crucial implementar medidas de mitigación para evitar la transformación de los ambientes costeros y preservar la morfodinámica de la costa.

Vulnerabilidad: La vulnerabilidad de la línea costera en el Atlántico es alta en un 33%, especialmente en sectores como Astilleros y Bocatocino. La vulnerabilidad media afecta al 67% restante, localizado en áreas intermedias y cercanas a la capital, Barranquilla. Esta vulnerabilidad se relaciona directamente con la capacidad de respuesta en emergencias, la densidad poblacional y la efectividad de los planes de mitigación (INVEMAR, 2018).

La infraestructura turística, como tiendas, restaurantes y hoteles, se encuentra en zonas de bajamar, donde los procesos erosivos predominan. La línea de costa retrocede con pocos intervalos de acreción, lo que dificulta el desarrollo de actividades turísticas de calidad y genera zonas de vulnerabilidad media y alta.

Las áreas de Puerto Colombia, Salgar y Santa Verónica están experimentando una expansión en infraestructura turística, incluyendo condominios y complejos hoteleros, lo que aumenta su vulnerabilidad ante los procesos erosivos y la dinámica costera (Bolívar et al., 2019).

2.3.Marco Conceptual

2.3.1. Erosión costera

Es un proceso geomorfológico y geológico que ocasiona la pérdida o el desplazamiento de sedimentos en las zonas costeras ocasionando un retroceso de la línea de costa. Esto ocurre debido a la remoción neta de sedimentos y la degradación de la roca subyacente. La erosión costera puede llegar a tener consecuencias significativas tanto para los ecosistemas naturales como para las infraestructuras (Barbaro et al., 2014).

2.3.2. Acción hidráulica

Acción Hidráulica: La acción hidráulica se produce cuando el agua de las olas se comprime en las grietas y juntas de las rocas en la costa. A medida que el agua se retira, la presión de aire atrapado en estas grietas se libera explosivamente, lo que puede romper las rocas y fragmentarlas. Este proceso es especialmente eficaz en la erosión de rocas que ya han sido debilitadas por la meteorización y el desgaste (Yu & Chen, 2011).

Eventos Climáticos y Geológicos: Fenómenos como tormentas, tsunamis y terremotos pueden causar cambios abruptos en las líneas de costa. Estos eventos pueden causar erosión rápida, formación de nuevas características costeras y modificación de la topografía litoral.

2.3.2.1.Influencia de actividades humanas

Construcción de Infraestructura: La construcción de estructuras costeras como diques, puertos, y espigones puede alterar el flujo natural de sedimentos y las corrientes marinas, afectando la evolución de las líneas de costa. Estas estructuras pueden prevenir la erosión en algunas áreas, pero también pueden causar erosión en otras partes debido a la redistribución de sedimentos (Torres-Hugues & Córdova-López, 2010).

2.3.3. Propagación del oleaje y corrientes marinas

La propagación del oleaje y el comportamiento de las corrientes marinas son factores cruciales en la dinámica costera y en la gestión de áreas marítimas. La modelización numérica permite simular y predecir estos fenómenos para una mejor comprensión y gestión de los sistemas costeros (Delgado-González et al., 2005). El modelo numérico Delft3D, específicamente su módulo Waves, es una herramienta avanzada utilizada para simular la propagación del oleaje desde aguas profundas hasta la costa y para analizar las corrientes marinas en zonas de estudio específicas

2.3.3.1.Propagación del oleaje

La propagación del oleaje se refiere al proceso mediante el cual las ondas generadas en el mar abierto se mueven hacia la costa. Este proceso es influenciado por varios factores, entre ellos:

Generación del Oleaje: El oleaje se genera principalmente por la acción del viento sobre la superficie del océano. La velocidad del viento, la duración del viento y la extensión del área sobre la cual sopla el viento (fetch) son determinantes clave en la generación de olas.

Propagación y Transformación: A medida que las olas se desplazan desde aguas profundas hacia aguas más someras, su comportamiento cambia debido a la interacción con el fondo marino. La profundidad del agua afecta la velocidad de las olas, su altura y su longitud de onda. Este proceso se describe a través de la ecuación de dispersión y se estudia mediante la teoría de olas lineales y no lineales (Holthuijsen, n.d.).

Desglose del Oleaje: La energía del oleaje puede descomponerse en diferentes componentes espectrales, incluyendo olas primarias y secundarias, las cuales se superponen y modifican la dinámica general del oleaje en la costa (Holthuijsen, n.d.).

2.3.4. Transporte longitudinal de sedimentos (TLS)

El Transporte Longitudinal de Sedimentos (TLS) es un proceso crucial en la dinámica litoral que involucra el movimiento de sedimentos a lo largo de la costa debido a la acción de las olas y las corrientes costeras. Este fenómeno natural desempeña un papel fundamental en la configuración de la morfología costera, afectando la erosión y acumulación de sedimentos a lo largo del litoral. La comprensión del TLS es esencial para la gestión costera, la planificación territorial y la protección ambiental (Herrera, 2015).

El TLS se produce paralelamente a la línea de costa y es impulsado por dos principales mecanismos:

Acción de las Olas: Las olas que llegan a la costa generan fuerzas que mueven los sedimentos en dirección paralela a la línea de costa. La dirección y la intensidad del movimiento de sedimentos dependen de la orientación de las olas, la energía de las mismas y las características del fondo marino.

Corrientes Costeras: Las corrientes generadas por el oleaje, así como las corrientes de marea y las corrientes de deriva, contribuyen al transporte de sedimentos a lo largo de la costa. Las corrientes costeras pueden ser influenciadas por la topografía submarina, las variaciones estacionales y las interacciones con otros flujos de agua (Fernández et al., 2016).

2.3.4.1. Factores que afectan el transporte longitudinal de sedimentos

Energía del Oleaje: La altura y la frecuencia de las olas afectan la capacidad de las olas para movilizar sedimentos. Olas más grandes y con mayor energía tienden a mover sedimentos más grandes y a distancias mayores (Holthuijsen, n.d.).

Pendiente del Perfil de Playa: La inclinación de la playa influye en la rapidez con que los sedimentos son transportados. Playas con una pendiente pronunciada pueden experimentar un transporte de sedimentos más rápido en comparación con playas más suaves (Holthuijsen, n.d.).

Granulometría de los Sedimentos: El tamaño y la composición de los sedimentos determinan su capacidad de transporte. Sedimentos más finos son más fácilmente movidos por el oleaje y las corrientes que sedimentos más gruesos (Holthuijsen, n.d.).

Condiciones Meteorológicas y Oceanográficas: Factores como el viento, la intensidad de la marea y los patrones estacionales pueden afectar el transporte de sedimentos. Las tormentas y los eventos meteorológicos extremos suelen intensificar el movimiento de sedimentos (Holthuijsen, n.d.).

2.3.5. Riesgo y vulnerabilidad costera

El riesgo y la vulnerabilidad costera son temas clave en la gestión de zonas costeras, ya que combinan la exposición de infraestructuras y comunidades a fenómenos naturales, como la erosión y el aumento del nivel del mar, con la capacidad de dichas áreas para adaptarse o resistir. A continuación, se definen cada uno de estos, junto con otros conceptos necesarios para su comprensión.

2.3.5.1.Riesgo (Hazard)

El riesgo o *Hazard*, (H) se define como la probabilidad de que un fenómeno de determinada magnitud ocurra en una zona específica. El nivel de peligro está determinado por tres componentes clave: magnitud (M), frecuencia de ocurrencia (O), y susceptibilidad del terreno (S) (Leaman et al., 2021).

Magnitud (M): La magnitud se refiere al nivel de energía de los fenómenos que afectan la zona costera. A mayor energía del fenómeno, mayores serán sus efectos negativos y, por lo tanto, mayor será el peligro.

Frecuencia de Ocurrencia (O): La frecuencia de ocurrencia se clasifica en tres categorías:

- Futuro: Eventos que aún no han ocurrido, pero cuya probabilidad no se puede descartar debido a la falta de información suficiente.

- Pasado: Eventos que han ocurrido previamente en el mismo lugar o en condiciones similares.
- Presente: Eventos que son detectables o evidentes en la actualidad.

Esta variable se resuelve cualitativamente y se basa en información secundaria. Para determinar la ocurrencia, se utiliza la variación en la línea de costa y/o la presencia del fenómeno en un período de tiempo específico (Leaman et al., 2021).

Susceptibilidad del Terreno (S): La susceptibilidad se define como el grado de propensión de un segmento de la costa a desarrollar un proceso de desgaste o atrición. La susceptibilidad depende de las características geológicas y geomorfológicas del área de estudio (Ricaurte-Villota et al., 2021a). Para evaluar la susceptibilidad, se consideran siete variables clave:

1. Geomorfología: La configuración del terreno y su influencia en los procesos de erosión.
2. Características: Las propiedades físicas y estructurales del terreno costero.
3. Granulometría: Tamaño y distribución de los granos de sedimento en la playa.
4. Ancho de la Playa: La extensión horizontal de la playa, que puede influir en la capacidad de resistencia frente a fenómenos erosivos.
5. Pendiente: La inclinación de la playa, que afecta la dinámica de las olas y la estabilidad del sedimento.

6. Estado Morfodinámico de las Playas: El estado general de las playas en términos de formación y cambio.
7. Exposición a las Olas: La intensidad y frecuencia de las olas que impactan la costa.

La evaluación de la susceptibilidad proporciona una comprensión detallada de la vulnerabilidad del terreno a los fenómenos erosivos y ayuda a prever el impacto potencial de los eventos costeros.

2.3.5.2. Vulnerabilidad (Vulnerability)

La evaluación de vulnerabilidad (V) considera tres componentes clave: la exposición (E), la fragilidad (F) en diversas dimensiones, y la falta de resiliencia (R). La vulnerabilidad global se determina por la interacción de estos tres componentes (Ricaurte-Villota et al., 2021a).

Exposición (E): Este componente mide el grado en que un área está expuesta a fenómenos de erosión costera. La exposición se refiere a la cantidad y frecuencia con la que el área es impactada por los fenómenos erosivos. Factores como la ubicación geográfica, la orientación de la costa, y la proximidad a eventos naturales extremos son cruciales para esta evaluación. La exposición se clasifica en función de la intensidad y frecuencia de los fenómenos que afectan la costa (Ricaurte-Villota et al., 2021a).

Fragilidad (F): La fragilidad se evalúa en diferentes dimensiones que pueden incluir aspectos físicos, sociales, económicos, ecológicos, institucionales y culturales. Esta dimensión de la vulnerabilidad analiza cuán susceptible es un área a los daños causados por la erosión costera en cada una de estas áreas:

- Fragilidad Física: Incluye las características estructurales de las edificaciones y la infraestructura costera, como su resistencia a la erosión y el tipo de materiales de construcción.
- Fragilidad Social: Examina la capacidad de las comunidades locales para enfrentar y recuperarse de los impactos de la erosión, considerando aspectos como la cohesión social y el acceso a recursos.
- Fragilidad Económica: Evalúa cómo los impactos de la erosión costera afectan la economía local, incluyendo la pérdida de propiedades, daños a negocios y la disminución de ingresos por turismo.
- Fragilidad Ecológica: Se enfoca en la salud y la integridad de los ecosistemas costeros, como las playas, dunas y humedales, y su capacidad para recuperarse de los impactos de la erosión.
- Fragilidad Institucional: Considera la capacidad de las instituciones locales y gubernamentales para implementar medidas de gestión y respuesta a la erosión costera.
- Fragilidad Cultural: Analiza el impacto de la erosión costera en el patrimonio cultural, tanto tangible (monumentos y sitios históricos) como intangible

(tradiciones y prácticas culturales). La evaluación cultural se centra en la presencia o ausencia de patrimonio relevante.

Falta de Resiliencia (R): La falta de resiliencia se refiere a la incapacidad de una comunidad o área para responder, anticipar y enfrentar adecuadamente los impactos de la erosión costera. Esto incluye la falta de preparación para emergencias, la ausencia de planes de contingencia, y la insuficiencia en las medidas de adaptación. La resiliencia se evalúa en función de la capacidad de las comunidades para recuperarse y adaptarse a los cambios y daños causados por la erosión (Ricaurte-Villota et al., 2021a).

2.4.Marco Teórico

El transporte de sedimentos a lo largo de la costa depende de la acción combinada de las mareas, el viento, las olas y las corrientes paralelas a la orilla que estos factores generan (Seymour, 2005). Por lo tanto, los cambios en las condiciones del oleaje, como la altura y la dirección, influyen en la energía que llega a lo largo de la línea costera, afectando consecuentemente el flujo de energía a lo largo de la costa, las corrientes y el transporte de sedimentos (Appendini, Carrillo-Rodríguez y Meza-Padilla, 2019; Splinter et al., 2012). Dado que el transporte de sedimentos a lo largo de la costa desempeña un papel crucial en los procesos de erosión y acreción costera, es fundamental predecir sus cambios ante escenarios futuros del clima y el oleaje.

En los sistemas costeros morfodinámicos, la forma de las superficies sólidas (como costas, humedales, estuarios, plataformas continentales, entre otros) y los procesos que moldean las morfologías en constante cambio están interconectados de manera mutua y evolucionan conjuntamente a lo largo del tiempo (Zêzere, 2023). Estos sistemas abarcan una serie de procesos hidrodinámicos, biológicos y antropogénicos que interactúan con los paisajes costeros y del fondo marino, incluidos los cimientos sobre los cuales se asientan la mayoría de las comunidades costeras. Las secuencias temporales de cambio involucran a todo el sistema, y las morfologías costeras junto con los regímenes de procesos que las controlan, como la infraestructura artificial, co-evolucionan tanto en períodos cortos como prolongados (Zêzere, 2023).

Se comprende que el cambio climático está induciendo alteraciones en los procesos y morfologías costeras, superponiéndose a las transformaciones previamente causadas por procesos naturales y actividades humanas (García-Ruiz et al., 2024). Debido a la retroalimentación constante entre los múltiples componentes del sistema, cualquier cambio en las condiciones ambientales repercute en todas las facetas del sistema. Los regímenes de procesos físicos y biológicos, así como los patrones morfológicos, co-evolucionan a lo largo del tiempo, con retroalimentaciones que pueden ser positivas (auto-reforzantes) o negativas (auto-reguladoras). No todos los cambios secuenciales son graduales o progresivos; en ocasiones, ocurren cambios abruptos hacia diferentes estados cuando se cruzan ciertos umbrales de equilibrio, o puntos de inflexión (García-Ruiz et al., 2024).

Para anticipar de manera efectiva y planificar los cambios en las morfologías costeras derivados de los nuevos patrones de erosión y deposición causados por el cambio climático, es

necesario comprender los sistemas morfodinámicos actuales y heredados. Las proyecciones de condiciones futuras implican el análisis de tendencias observadas, el uso de modelos numéricos y teóricos avanzados, así como la síntesis de literatura científica existente. Las evaluaciones más recientes sobre los impactos del cambio climático se actualizan periódicamente a través del Programa de Investigación del Cambio Global de los Estados Unidos mediante los Informes Nacionales de Evaluación del Clima (NCA). El último informe, el NCA5, publicado en 2023, resalta el aumento de los riesgos costeros debido a la subida del nivel del mar, el incremento en la frecuencia de tormentas y las olas y marejadas generadas por estas tormentas. El aumento de las temperaturas superficiales del océano es la principal fuente de estos procesos destructivos, lo cual también es apoyado por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) en su sexto informe publicado en 2022.

Predecir los impactos futuros de los cambios inducidos por el clima en los procesos costeros y las morfologías requiere modelos de sistemas complejos que consideren una jerarquía de interconexiones y retroalimentaciones no lineales (Narváez et al., 2019). Para validar estos modelos y proporcionar información sobre las condiciones locales y regionales, son necesarias series temporales prolongadas de observaciones. Aunque se ha avanzado en esta área, se requiere un mayor desarrollo en la comprensión de la interconexión entre los sistemas morfodinámicos y los sistemas socio ecológicos, incluidos playas y costas arenosas, humedales, costas deltaicas, costas fangosas, costas árticas, plataformas continentales, arrecifes de coral e infraestructuras construidas.

2.4.1. Impactos de las obras de ingeniería en las costas

Los cambios físicos, ambientales, socioeconómicos y provocados por la ingeniería en las zonas costeras interactúan de formas a menudo imprevistas, generando retroalimentaciones positivas que pueden llevar a puntos de inflexión críticos. En estos puntos, un pequeño cambio adicional puede desencadenar una desestabilización significativa del sistema, alterando su equilibrio y empujándolo hacia un nuevo estado del que es improbable que regrese a sus condiciones anteriores (Torres-Hugues & Córdova-López, 2010).

2.4.2. Procesos de erosión y acreción

Los cambios morfológicos costeros suelen implicar procesos simultáneos de erosión en algunas zonas y de acreción en otras. Tradicionalmente, se ha reconocido que, durante tormentas o eventos de alta energía, las olas trasladan grandes volúmenes de arena de la playa y la zona de rompiente hacia áreas más profundas, en ocasiones a profundidades de hasta 20 metros. Luego, cuando las condiciones se calman, las arenas lentamente vuelven a la playa gracias a la acción de las olas de menor energía y largo periodo. Este ciclo de erosión y recuperación es un proceso natural que, por lo general, no conlleva una pérdida permanente de tierra, salvo que la costa esté privada de sedimentos por razones naturales o inducidas por el ser humano (Coca & Ricaurte-Villota, 2023; López, 2020).

Sin embargo, el cambio climático está alterando estos patrones, provocando recesiones costeras irreversibles en muchas regiones. Esto es particularmente evidente en costas fangosas y

deltaicas, donde comunidades enteras han sido desplazadas debido a la combinación de aumento del nivel del mar y la intensificación de tormentas. Además, el aumento de la severidad de las tormentas y de las marejadas, como en el caso del Huracán Ian en Florida, puede causar traslaciones tierra adentro de la zona de rompiente, afectando a comunidades costeras (Edeso, 2008).

A medida que las tormentas se vuelven más intensas y el nivel del mar sigue subiendo, los sedimentos erosionados son transportados a profundidades mayores, fuera del alcance de las olas normales, lo que dificulta o ralentiza su regreso a la playa. Estudios históricos y geológicos han demostrado que la recesión del litoral puede abarcar grandes extensiones de costa. Un ejemplo bien documentado es la costa del Mar del Norte en Dinamarca, donde la tasa de recesión de la línea de costa estuvo asociada a un aumento del nivel del mar de 8.6 mm/año (Kantardgi et al., 2019). Cuando la disponibilidad de sedimentos es alta, incluso con tasas decrecientes de aumento del nivel del mar, la costa puede experimentar progradación, pero en muchas otras áreas, una tasa tan baja como 2 mm/año puede marcar la diferencia entre la transgresión y regresión costera.

La intervención humana, especialmente mediante la construcción de infraestructuras costeras como diques, espigones o puertos, puede agravar los problemas de erosión. Estas estructuras a menudo interrumpen el flujo natural de sedimentos, lo que exacerba la erosión en áreas adyacentes. En muchos casos, la construcción de presas y otras barreras en los ríos ha reducido drásticamente el suministro de sedimentos a las costas, lo que contribuye a la aceleración de la recesión de la línea de costa. Un estudio reciente sobre las costas del Reino

Unido e Irlanda reveló que gran parte de la costa está erosionándose debido a la combinación de aumento del nivel del mar, reducción del suministro de sedimentos y la intervención humana (Ratnayake et al., 2019).

Incluso costas rocosas, que históricamente se consideraban más estables, están siendo afectadas por el aumento del nivel del mar. Las olas de tormenta están alcanzando los acantilados con mayor frecuencia, acelerando los procesos de erosión en estas áreas. La intervención humana sin una planificación e ingeniería responsable puede llevar a consecuencias imprevistas, como la aceleración de la erosión y la pérdida de hábitats costeros esenciales (Ratnayake et al., 2019).

2.4.3. Estructuras de protección

A medida que las ciudades costeras crecen y la amenaza de mares en ascenso, tormentas e inundaciones se intensifica, las soluciones de infraestructura para la protección costera se han vuelto cada vez más antropogénicas. Durante décadas, la respuesta tradicional ha sido la construcción de infraestructuras duras como diques, muros de contención y rompeolas. Sin embargo, un referente global en la defensa contra el mar es Países Bajos, que ha implementado avanzados sistemas de ingeniería desde hace siglos para proteger sus ciudades. Después del devastador paso del huracán Katrina, el Cuerpo de Ingenieros concluyó un ambicioso proyecto de $14.5 mil millones para proteger Nueva Orleans mediante un sistema de diques, barreras contra marejadas y bombas de alto volumen diseñadas para resistir inundaciones de un evento con periodo de retorno de 100 años. Sin embargo, mientras la ciudad está protegida, gran parte

del estado de Luisiana sigue perdiendo humedales y tierras a un ritmo alarmante, impulsando la implementación de complejos programas de restauración costera (Barreto et al., 2021).

Frente a los retos crecientes, muchas agencias de protección costera están girando hacia soluciones basadas en la naturaleza, abandonando la infraestructura de concreto tradicional que en muchos casos agrava los problemas de erosión costera en lugar de mitigarlos. Las alternativas basadas en la naturaleza incluyen la restauración de humedales, la reforestación de manglares, la desviación de canales fluviales ricos en sedimentos y el fomento de arrecifes de coral. Estos enfoques no solo ofrecen protección física contra el oleaje y las marejadas, sino que también aportan beneficios ecológicos y recreativos, mejorando la biodiversidad y proporcionando servicios ecosistémicos claves. Un enfoque intermedio que ha ganado popularidad es el de las líneas de costa vivas, donde se combina la infraestructura mínima con elementos naturales como humedales o manglares, creando una barrera resiliente que se adapta al entorno (Bio et al., 2015).

Orin Pilkey, destacado geólogo costero y defensor ambiental, ha abogado durante décadas por la estrategia de retirada controlada como la mejor alternativa para mitigar los impactos negativos de las infraestructuras duras. Según su visión, en lugar de intentar frenar la erosión mediante obras de ingeniería, lo más efectivo sería permitir que los ciclos naturales de erosión y acreción sigan su curso, sin obstáculos y sin construcción en zonas vulnerables. No obstante, esta opción es poco factible en áreas densamente pobladas donde la reubicación de comunidades enteras es inviable por razones sociales, económicas y políticas.

2.5.Marco Legal

A nivel nacional, leyes y regulaciones específicas establecen directrices para la protección y manejo de las zonas costeras, mientras que normativas internacionales complementan y refuerzan estos esfuerzos, promoviendo la cooperación global en la conservación de los océanos y costas. Este marco legal no solo asegura el cumplimiento de las normativas vigentes, sino que también facilita la integración de medidas de prevención, mitigación y restauración, promoviendo una gobernanza efectiva y la participación activa de las comunidades locales en la protección de su entorno costero. En este sentido, a continuación, se indican las diferentes leyes y regulaciones:

Ley 99 de 1993: Establece el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y regula la protección del medio ambiente en Colombia. Define principios para la protección de los recursos naturales y establece responsabilidades para las entidades gubernamentales en la gestión ambiental.

Ley 155 de 1994: Regula el uso y la protección de las zonas costeras en Colombia. Establece normas para la planificación y gestión del litoral, incluyendo la prevención de la erosión costera y la protección de las áreas sensibles.

Ley 388 de 1997: Regula la planificación del desarrollo territorial y urbano, incluyendo directrices para la integración de la gestión costera en los planes de ordenamiento territorial.

Resolución 1608 de 2010: Regula la exploración y explotación de recursos marinos y costeros, estableciendo procedimientos para la evaluación de impactos ambientales y la autorización de actividades en zonas costeras.

Plan Maestro de Erosión Costera en Colombia: El plan Maestro de Erosión Costera en Colombia desarrolla una visión y una estrategia nacional a largo plazo, integral y sostenible. Este plan está respaldado técnica, financiera e institucionalmente, con el objetivo de prevenir, mitigar y controlar la erosión y sus consecuencias en las costas de Colombia. El Plan proporciona herramientas a las instituciones gubernamentales y a los actores involucrados en temas marino-costeros para abordar los problemas ocasionados por la erosión costera.

El Plan pretende ofrecer una visión holística sobre los problemas de erosión costera, promoviendo la participación de agentes institucionales a nivel local, regional y nacional. Busca definir claramente la responsabilidad de cada uno en la prevención, mitigación y control de la erosión costera, en el marco de una adecuada gobernanza.

El Plan se desarrolló bajo el Convenio de Cooperación Internacional N° 466 de 2014, entre el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente) y la Embajada del Reino de los Países Bajos en Colombia. La coordinación del Plan se realizó mediante un Comité Directivo, constituido por MinAmbiente, Rijkswaterstaat (RWS), la Agencia Empresarial de los Países Bajos (RVO) y la Embajada del Reino de los Países Bajos en Colombia. Además, un

Comité Técnico, conformado por MinAmbiente, el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Víves de Andréis” (INVEMAR), la Dirección General Marítima (DIMAR) y el Servicio Geológico Colombiano, brindó apoyo consultivo.

Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de 2015: Incluye el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 14, que se enfoca en la conservación y el uso sostenible de los océanos, mares y recursos marinos. Establece metas para la gestión integrada de las zonas costeras y la reducción de la contaminación marina.

Ley 1523 de 2012: mediante la cual se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD), el cual organiza y regula la gestión del riesgo en el país con el propósito de proteger a la población, el ambiente, los bienes, y la infraestructura frente a la amenaza de desastres naturales y de origen antropogénico. Esta ley busca integrar la gestión del riesgo en todos los niveles del Estado, así como en las políticas de desarrollo económico, social y ambiental del país.

Algunos aspectos relevantes de esta norma consisten en:

La creación del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD), este sistema establece una estructura administrativa y operativa que coordina las acciones de diferentes entidades públicas y privadas, tanto a nivel nacional como territorial, para prevenir, mitigar y responder a los riesgos de desastres.

Asi mismo esta ley promueve una gestión integral del riesgo que incluye la prevención, mitigación, preparación, respuesta y recuperación. Este enfoque reconoce que los desastres no solo deben ser enfrentados cuando ocurren, sino que deben ser previstos y mitigados mediante acciones a largo plazo. Adicionalmente La ley establece que las autoridades territoriales (departamentales, municipales y distritales) son responsables de implementar planes de gestión del riesgo en sus respectivas jurisdicciones, articulados con las políticas nacionales.

La normativa también exige que los planes de ordenamiento territorial (POT) incluyan estudios de riesgo y medidas de prevención contra el desarrollo en zonas vulnerables. Además, se promueve la educación y sensibilización de la población en materia de prevención de riesgos y desastres, con el fin de que se tomen medidas responsables y se fomente una cultura de prevención a nivel comunitario.

3. Diseño metodológico

3.1.Tipo de investigación

Este proyecto se desarrolló con una metodología cuantitativa, enfocada en el análisis de la dinámica costera en la región de Salgar, Atlántico, para establecer alternativas de construcción sostenible que permitan la protección costera frente a procesos de erosión y acreción. La metodología se estructurará en varias etapas que incluirán el análisis de clima marítimo, la propagación de oleaje y corrientes, la digitalización de líneas de costa, el uso del sistema DSAS y el análisis del transporte longitudinal de sedimentos (TLS). A partir de estos análisis, se estableció la línea base del proyecto, lo que permitió identificar las problemáticas en la zona y desarrollar estrategias de infraestructura verde para su protección.

Estas alternativas se plantean a partir de la revisión de la literatura, y una identificación en sitio de las condiciones particulares de la zona, con el fin de anticipar y abordar posibles limitaciones para la implementación de cada estrategia propuesta.

3.2 Seguimiento metodológico del proyecto

En la tabla 1 se indica el conjunto de indicadores y actividades por objetivos que permiten realizar un seguimiento metodológico al proyecto.

Tabla 1

Modelo Metodológico

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	ACTIVIDADES POR OBJETIVO	INDICADOR POR ACTIVIDAD
Obj 1. Elaborar un análisis integral de las condiciones climáticas marítimas y la dinámica costera en Salgar, Atlántico, mediante el estudio del viento, oleaje y transporte de sedimentos, con el fin de identificar patrones costeros de erosión y sedimentación.	Act. 1. Caracterizar las condiciones predominantes de viento y oleaje mediante un análisis estadístico estacional para evaluar su variabilidad temporal.	Ind 1. Número de perfiles de propagación del oleaje generados. Ind 2. Cambio promedio en la altura del oleaje desde el mar abierto hasta la costa
	Act. 2. Evaluar el potencial erosivo de la zona costera de Salgar, considerando la energía del oleaje y la composición de los materiales costeros.	Ind 3. Porcentaje de cambio en la línea de costa Ind 4. Índice de potencial erosivo determinado.
Obj 2. Plantear alternativas constructivas sostenibles, que permitan mitigar los impactos de la erosión costera en Salgar y promover la conservación y sostenibilidad del entorno costero.	Act 3. Proponer alternativas para la gestión y mitigación de los impactos negativos en la costa, basadas en los resultados del estudio y orientadas hacia la conservación y sostenibilidad del entorno costero.	Ind 5. Número de alternativas constructivas sostenibles propuestas.
	Act 4. Evaluar las alternativas propuestas mediante un análisis de vulnerabilidad y una matriz de selección.	Ind 6. Matriz de vulnerabilidad Ind 7. Matriz de selección
Obj 3. Establecer las características y especificaciones técnicas detalladas de las obras propuestas para la mitigación de la erosión y demás problemas identificados con la línea base del proyecto.	Act 5. Realiza una descripción detallada y especificaciones técnicas de las alternativas propuestas	Ind 6. Especificaciones técnicas
	Act 6. Elaborar los detalles y planos de las alternativas propuestas	Ind 7. Planos y detalles constructivos

3.3 Población

La población de estudio se centrará en las 13 estructuras rígidas de protección costera, conocidas como espolones, ubicadas en la zona costera de Salgar, corregimiento de Puerto Colombia, Atlántico. En particular, se analizarán las playas existentes entre Punta Roca y el Castillo de Salgar que suman una extensión aproximada de 4390 m.

3.4 Muestra

La muestra estará compuesta por cinco playas en la zona costera de Salgar que por su accesibilidad son las de mayor afluencia turística alrededor de los espolones en la zona y cuentan con una extensión promedio de 370 metros de línea de costa cada una.

3.5 Técnicas de recolección y análisis de la información

3.5.1 Técnicas de recolección de información

Para la recolección de información en esta investigación se utilizarán las siguientes técnicas e instrumentos:

1. Datos meteorológicos y oceanográficos (Clima marítimo):

- Instrumento: La plataforma AppMar, la cual proporciona información detallada sobre parámetros climáticos como el viento, el oleaje y la temperatura del agua en la región de Salgar.
- Frecuencia: Se recopilarán datos de manera continua, asegurando la disponibilidad de información actualizada y validando su variabilidad temporal y estacional.
- Instrumentos adicionales: Se utilizarán estaciones meteorológicas cercanas y datos satelitales para corroborar la precisión de la información obtenida por AppMar.

2. Simulación numérica de propagación de oleaje y corrientes marinas:

- Instrumento: El software Delft3D con su módulo Waves permitirá la simulación de variables como la dirección, intensidad y altura de las olas, así como el comportamiento de las corrientes marinas.
- Datos complementarios: Se utilizará información histórica y actual de oleaje y corrientes marinas para calibrar y validar el modelo numérico, obteniendo simulaciones precisas.

3. Digitalización de líneas de costa:

- Instrumento: Las imágenes satelitales Landsat (6, 7, 8), proporcionadas por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), serán procesadas para identificar las líneas de costa históricas.
- Herramienta: El software DSAS (Digital Shoreline Analysis System), una extensión de ArcGIS, permitirá generar y analizar estas líneas, facilitando la evaluación de su evolución en el tiempo.

4. Mediciones in situ de sedimentos:

- Instrumento: Se utilizarán equipos de caracterización de sedimentos para realizar muestreos directos de los sedimentos en la costa, con el fin de analizar su granulometría.
- Procedimiento: Se emplearán herramientas específicas para la recolección de muestras, como tubos de muestreo o barrenas, además de instrumentos de laboratorio para el análisis granulométrico en laboratorio.

5. Análisis de alternativas

- Instrumento: Revisión exhaustiva de la literatura especializada, manuales técnicos y documentos normativos relevantes.
- Procedimiento**:** Se investigarán diversas alternativas de construcción sostenible y de protección costera, considerando experiencias previas en contextos similares.

Esto incluirá el análisis de tecnologías y materiales avanzados en infraestructura verde que han demostrado efectividad en mitigación de erosión costera. Las alternativas se evaluarán en función de su viabilidad técnica, costos y beneficios ambientales, para seleccionar las soluciones más adecuadas para Salgar.

6. Análisis de vulnerabilidad

- Instrumento: Revisión de literatura, visitas de campo, y estudios de caso de zonas costeras similares.
- Procedimiento: Se investigarán los factores de vulnerabilidad específicos de la región de Salgar, incluyendo la exposición de infraestructura y servicios públicos a la erosión y eventos climáticos extremos. Las visitas de campo permitirán observar las condiciones locales y documentar la interacción de las infraestructuras existentes con la dinámica costera.

3.5.2 Análisis de la información

Datos meteorológicos y oceanográficos (Clima marítimo): Los datos obtenidos de la plataforma AppMar y las estaciones meteorológicas serán analizados para identificar patrones temporales y estacionales. Se aplicarán herramientas estadísticas para evaluar la variabilidad del clima marítimo y su relación con fenómenos de erosión costera.

Simulación numérica de propagación de oleaje y corrientes marinas: Los resultados de las simulaciones realizadas con Delft3D serán comparados con datos históricos y mediciones in situ para validar el modelo. Se analizarán las trayectorias y la energía de las olas y su interacción con las corrientes marinas.

Digitalización de líneas de costa: Utilizando el software DSAS, se analizará la evolución histórica de la línea de costa, con un enfoque en la tasa de erosión o acreción en diferentes intervalos de tiempo.

Análisis de alternativas: A partir de los resultados obtenidos en el análisis de datos climáticos y oceanográficos, la simulación numérica de propagación de oleaje, la digitalización de líneas de costa y las mediciones de sedimentos, se seleccionarán las alternativas de mayor pertinencia para la protección costera en Salgar. Las consultas bibliográficas y visitas de campo aportarán un contexto adicional, permitiendo identificar prácticas exitosas en condiciones similares. Las alternativas se evaluarán considerando factores como la capacidad de reducir la erosión, la facilidad de implementación, los costos y el impacto ambiental. Las opciones incluirán el uso de infraestructuras verdes, como arrecifes artificiales o dunas estabilizadoras, y construcciones híbridas que combinen materiales avanzados para una intervención sostenible.

Análisis de vulnerabilidad: El análisis de vulnerabilidad se centrará en identificar las áreas más expuestas a la erosión y a eventos climáticos extremos en la región de Salgar. Las

consultas bibliográficas y visitas de campo permitirán evaluar directamente las condiciones actuales y verificar las áreas de mayor riesgo.

4. Resultados

4.1. Elaborar un análisis integral de las condiciones climáticas marítimas y la dinámica costera en Salgar, Atlántico, mediante el estudio del viento, oleaje y transporte de sedimentos, con el fin de identificar patrones de erosión y sedimentación.

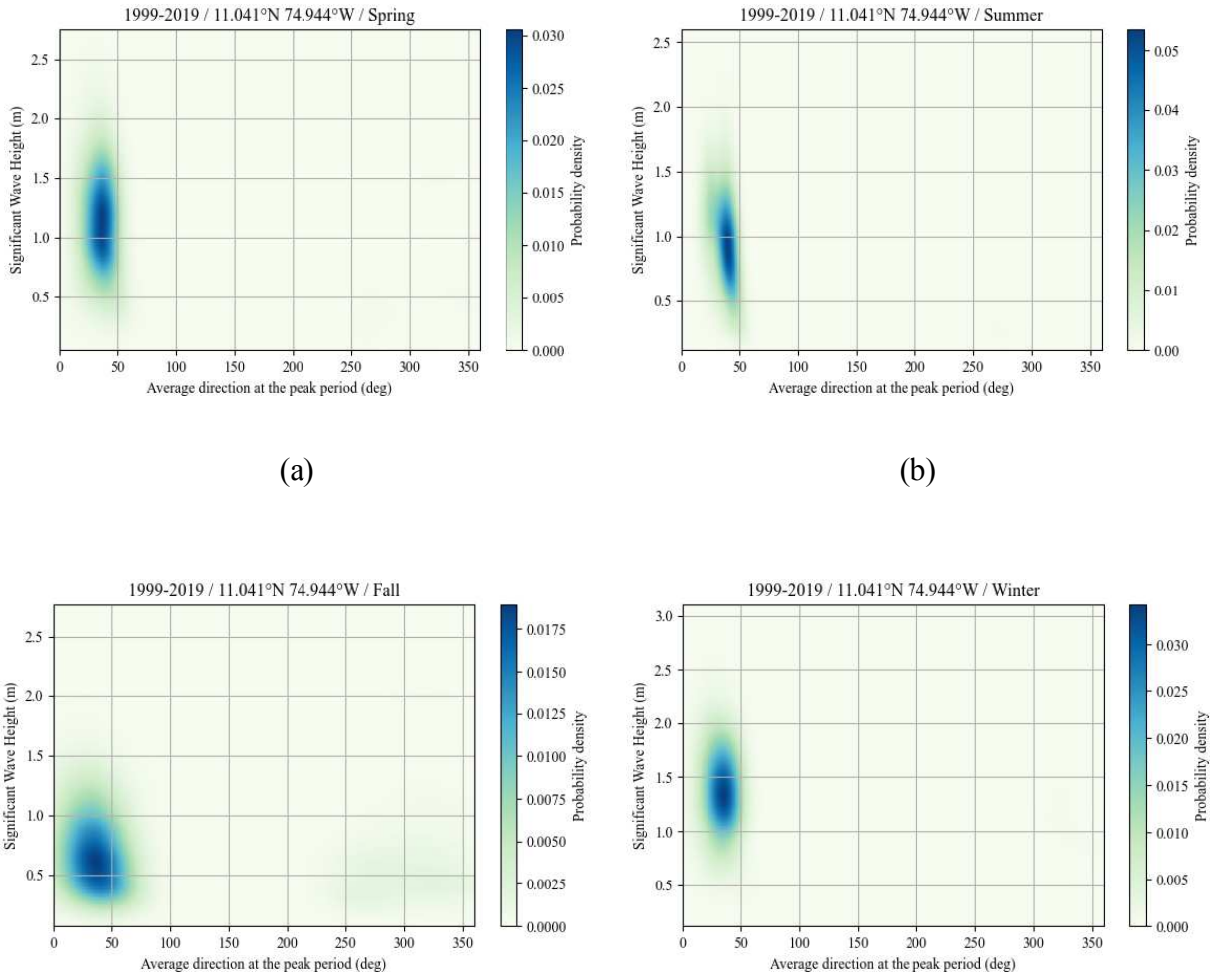
Para determinar los estados representativos del mar en el área de estudio, se utilizó la aplicación APPMAR 1.0. Esta herramienta, que incluye un módulo para análisis estadísticos de datos de olas, obtiene información del modelo WAVEWATCH III® (WW3) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA). Este modelo ofrece una resolución temporal de 3 horas y una resolución espacial de 0.16° × 0.16°. Se descargaron datos de altura significativa de ola (Hs), período y dirección desde 1979 hasta 2019 de una boya virtual ubicada en las coordenadas 11.041°N, -74.944°W.

4.1.1. Alturas de ola y dirección del periodo pico

El análisis del clima marítimo se realizó utilizando datos de reanálisis del periodo comprendido entre 1979 y 2019, abarcando las cuatro estaciones del año. Este análisis permitió identificar patrones en la altura significativa de las olas (Hs) y la dirección predominante del periodo pico, los cuales son fundamentales para entender la dinámica costera y su interacción con las estructuras existentes en la playa de Salgar. En la figura 3 se aprecia este análisis para cada una de las estaciones.

Figura 3

Alturas significantes y dirección predominante del periodo pico de olas por estaciones



Nota. (a) Primavera, (b) Verano, (c) Otoño y (d) Invierno

Durante la primavera, como se aprecia en la figura 3-a, las alturas significativas de ola más comunes oscilan entre 0.9 y 1.4 metros, con una dirección promedio del periodo pico que varía entre 30 y 50 grados. El máximo registrado en esta estación alcanzó una altura de 1.8 metros, lo que indica condiciones de oleaje moderado, con olas que podrían influir en los procesos de sedimentación y erosión en la costa. En cambio, en verano, como se aprecia en la figura 3-b, las alturas significativas de ola son ligeramente menores, variando entre 0.7 y 1.2 metros. La dirección promedio del oleaje es similar a la primavera, oscilando entre 35 y 48 grados. Estas condiciones indican un periodo con menor energía de oleaje, lo cual puede resultar en menos erosión costera, favoreciendo la acumulación de sedimentos.

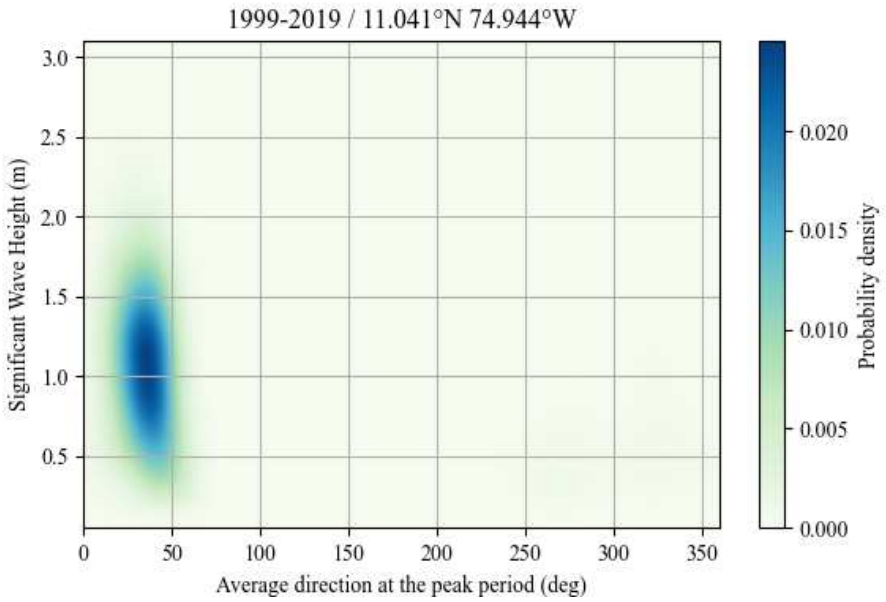
Durante el otoño (Figura 3-c), se registraron las menores alturas significativas de ola, con valores entre 0.3 y 0.8 metros. La dirección promedio del periodo pico varió entre 20 y 50 grados. Estas características sugieren que el otoño es una estación de menor intensidad de oleaje, lo que puede generar mayor estabilidad en la línea de costa y favorecer la acreción. Posteriormente, en invierno como se indica en la figura 3-d, se observaron las mayores alturas significativas de ola, que oscilan entre 1.2 y 1.6 metros, con una dirección promedio del periodo pico entre 30 y 50 grados. Estas condiciones reflejan una temporada con mayor energía del oleaje, lo que aumenta el riesgo de erosión en las zonas más expuestas de la costa.

Adicionalmente, como parte del análisis desarrollado, se incorporó una gráfica que representa los valores promedios de las alturas significativas de ola (Hs) para las diferentes estaciones del año, como se indica en la figura 4. Esta gráfica mostró que las alturas más

comunes oscilan entre 0.8 y 1.4 metros, con una dirección promedio del periodo pico entre 30 y 45 grados. El análisis también reveló que, en algunas ocasiones, las alturas de ola alcanzaron un máximo de 2.1 metros. Estos resultados subrayan la variabilidad del clima marítimo en la zona, destacando cómo las estaciones con mayores alturas de ola tienen el potencial de generar un impacto significativo en la dinámica costera y en la erosión de la playa.

Figura 4

Alturas significantes y dirección predominante del periodo pico de olas promedio



Finalmente, las diferentes estaciones del año influyen en la dinámica costera en Salgar, estos permiten comprender la vulnerabilidad de la playa y las estructuras adyacentes. El invierno y la primavera se destacan como los periodos con mayores alturas de ola, lo que aumenta

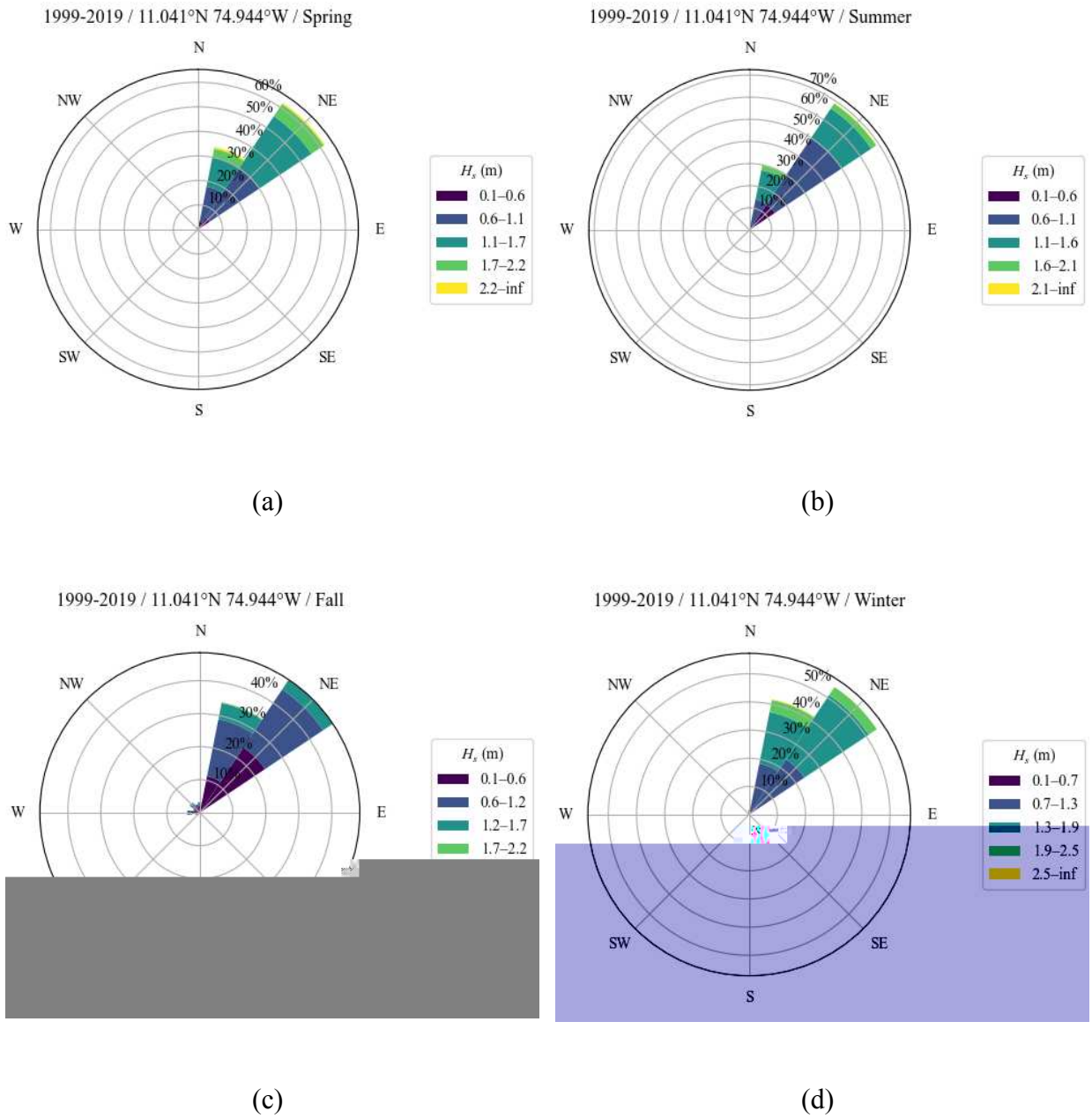
significativamente el impacto de la erosión en la costa y las construcciones cercanas. En contraste, el otoño y el verano presentan condiciones más favorables para la acumulación de sedimentos, lo que podría mitigar temporalmente los efectos erosivos en estas estaciones.

4.1.2. Dirección y altura predominante de olas

Adicionalmente, se realizó un análisis exhaustivo de la dirección y altura de las olas que impactan la costa de Salgar a lo largo de las distintas estaciones del año, como se aprecia en la figura 5. Este estudio es fundamental para comprender la dinámica costera y evaluar los factores que influyen en la erosión y sedimentación, así como en la vulnerabilidad de las estructuras costeras y la playa.

Figura 5

Dirección y altura predominante de olas por estaciones



Nota. (a) Primavera, (b) Verano, (c) Otoño y (d) Invierno

En la temporada de primavera, se determinó que aproximadamente el 60% de las olas provienen del noreste (NE), con alturas significativas que oscilan entre 1.1 y 1.7 metros. Estas olas, caracterizadas por una dirección y altura consistentes, tienen un impacto considerable en la erosión costera, especialmente en combinación con los vientos y corrientes marinas que predominan durante este periodo.

Durante el verano, el análisis reveló que el 70% de las olas continúan llegando desde el NE, aunque con una disminución en las alturas, que varían entre 0.6 y 1.1 metros. Este periodo presenta condiciones más favorables para la acumulación de sedimentos, ya que las olas de menor altura tienden a ser menos erosivas, lo que contribuye a la estabilidad temporal de la costa.

En la estación de otoño, el 40% de las olas también tienen su origen en el NE, pero con alturas que fluctúan entre 0.6 y 1.2 metros. Estas olas generan una dinámica costera más moderada, lo que sugiere una posible estabilización de la línea de costa durante este periodo, permitiendo cierta recuperación del perfil de la playa.

Finalmente, en el invierno, se observó que el 50% de las olas provienen del NE, con alturas que alcanzan entre 1.3 y 1.9 metros, siendo este el periodo con las olas más altas después

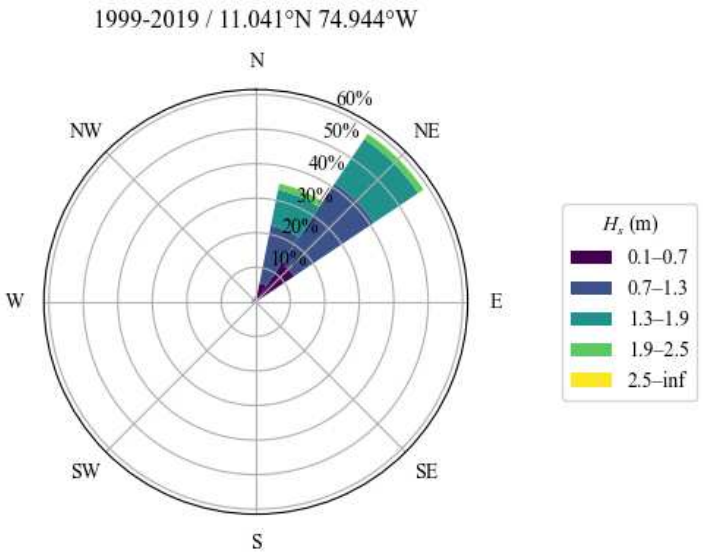
de la primavera. Esto implica un mayor impacto sobre la costa, favoreciendo los procesos de erosión que pueden afectar tanto la estabilidad de la playa como las estructuras costeras cercanas.

Los periodos de primavera e invierno, con olas de mayor altura y fuerza, representan las épocas de mayor vulnerabilidad para la costa de Salgar, donde la acción del oleaje contribuye significativamente a la erosión costera. Por otro lado, los periodos de verano y otoño, con olas de menor altura, son más propicios para la acumulación de sedimentos, lo que sugiere que podrían ser aprovechados para la implementación de medidas de mitigación y adaptación frente a la erosión costera.

Asimismo, se realizó un análisis consolidado de las condiciones del oleaje a lo largo de todo el año (Figura 6), proporcionando una visión integral de la dinámica marítima en la zona de estudio. Este análisis mostró que, en promedio, el 60% de las olas que llegan a la costa provienen de la dirección noreste (NE). Las alturas promedio de estas olas se encuentran en un rango que oscila entre 0.7 y 1.9 metros.

Figura 6

Dirección y altura predominante de olas promedio anual



Nota. Promedio Anual.

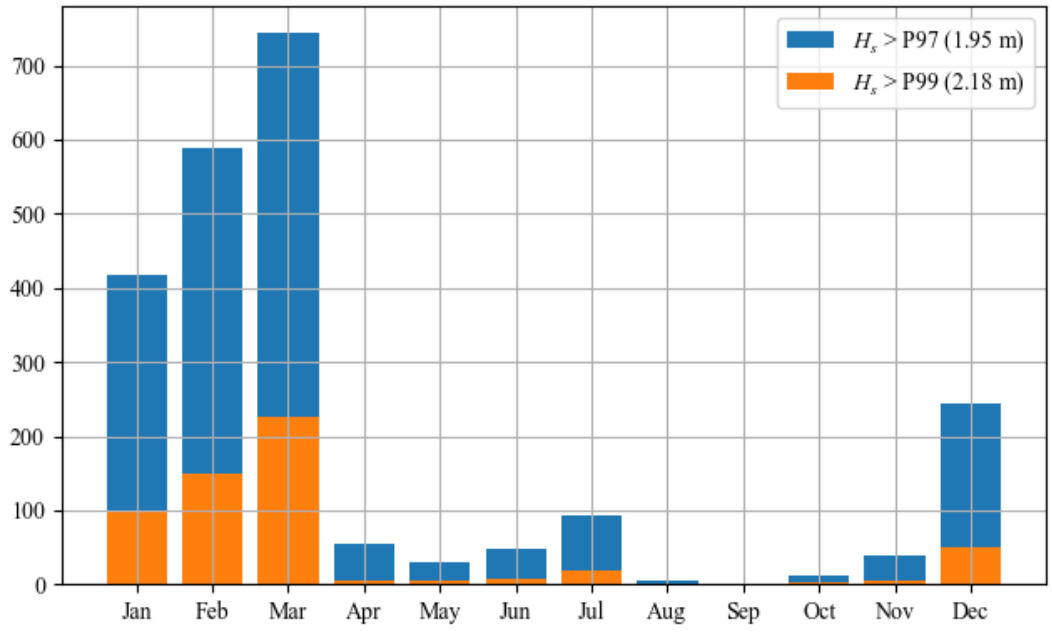
Esta predominancia del oleaje proveniente del NE y sus características en términos de altura son factores determinantes en la configuración costera y en los procesos de erosión que afectan a la playa de Salgar. La continuidad de estas condiciones a lo largo del año sugiere que las estructuras costeras y la línea de costa están expuestas a un desgaste constante, lo que refuerza la importancia de implementar medidas de protección y mitigación de la erosión.

4.1.3. Número medio y máximo de tormentas

El análisis del número medio y máximo mensual de tormentas, basadas en eventos con alturas significativas de ola (Hs) superiores al percentil 97 (1.95 m) y al percentil 99 (2.18 m), muestra una variabilidad significativa a lo largo del año, con una marcada concentración de eventos en los primeros meses, como se aprecia en la figura 7.

Figura 7

Dirección y altura predominante de olas promedio mensual



En el mes de enero, se registran 320 eventos con Hs superiores a 1.95 m y 100 eventos con Hs superiores a 2.18 m, indicando un alto nivel de actividad marítima. En febrero, se observa un aumento con 430 eventos para Hs > 1.95 m y 150 eventos para Hs > 2.18 m, lo que sugiere que este mes presenta condiciones más severas en comparación con enero.

Para el mes de marzo, se alcanzó el mayor número de eventos en el año, con 530 eventos para Hs > 1.95 m y 220 eventos para Hs > 2.18 m, consolidándose como el mes con la mayor cantidad de tormentas intensas. Sin embargo, a partir de abril se experimenta una significativa reducción, con solo 45 eventos para Hs > 1.95 m y 5 eventos para Hs > 2.18 m.

Los meses de mayo, junio y julio presentan una actividad mínima, con valores que oscilan entre 15 y 85 eventos para Hs > 1.95 m y de 5 a 10 eventos para Hs > 2.18 m, lo que sugiere una estabilización de las condiciones del oleaje en este período. En agosto, solo hubo 5 eventos para Hs > 1.95 m, mientras que en septiembre no se registraron eventos para ninguna de las categorías.

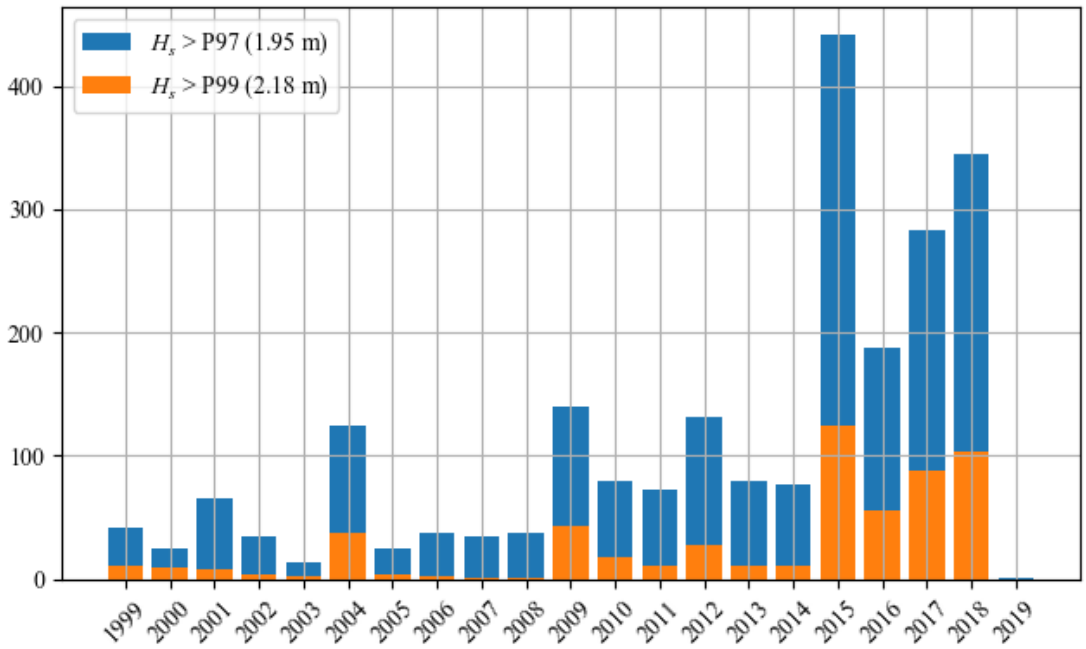
Durante los meses de octubre y noviembre, se observa una ligera recuperación de la actividad con 8 eventos para Hs > 1.95 m y 2 eventos para Hs > 2.18 m en octubre, y 20 eventos para Hs > 1.95 m y 5 eventos para Hs > 2.18 m en noviembre. Finalmente, en diciembre, se registraron 200 eventos con Hs > 1.95 m y 50 eventos con Hs > 2.18 m, lo que marca una notable reactivación de la actividad de tormentas en comparación con los meses anteriores.

Este patrón sugiere una mayor exposición a eventos extremos durante el primer trimestre del año, particularmente en los meses de enero, febrero y marzo, lo que coincide con los periodos de mayor vulnerabilidad para la costa y las estructuras cercanas.

De igual forma, como se aprecia en la figura 8 se realizó el análisis del número medio y máximo anual de tormentas, el cual revela que el año 2015 fue el más activo en cuanto a eventos de tormenta, con más de 450 eventos, destacándose como el año con mayor incidencia de condiciones adversas. Este número es considerablemente superior en comparación con otros años dentro del periodo de estudio.

Figura 8

Dirección y altura predominante de olas promedio anual



El segundo año con más actividad fue 2018, que registró más de 320 eventos, seguido de 2017 con más de 270 eventos, lo que indica que estos tres años forman un periodo de alta actividad tormentosa, probablemente debido a patrones climáticos desfavorables o condiciones oceanográficas particulares.

En el cuarto lugar se encuentra 2016, con más de 180 eventos, mostrando una disminución en la frecuencia de tormentas en comparación con los tres años anteriores, pero aún por encima del promedio de otros periodos. A continuación, se encuentra el año 2009, con más de 120 eventos, lo que indica una actividad moderada en cuanto a tormentas.

Finalmente, los años 2004 y 2012 también presentan una cantidad significativa de tormentas, con más de 110 eventos cada uno. Estos valores reflejan una tendencia variable en la ocurrencia de tormentas, donde ciertos años, como 2015 y 2018, muestran picos considerables en la frecuencia de eventos extremos, mientras que otros años muestran una menor incidencia, proporcionando información crucial para la gestión del riesgo costero y la planificación de medidas de adaptación.

4.1.4. Periodos pico y probabilidades de excedencia

Con los datos recolectados entre 1999 y 2019, se realizó un análisis de las alturas representativas de ola frente a los períodos pico, como se aprecia en la figura 9. Este análisis,

utilizando un enfoque de clustering, permitió identificar tres grupos principales de alturas promedio de ola, que corresponden a diferentes condiciones marítimas típicas en la zona de estudio.

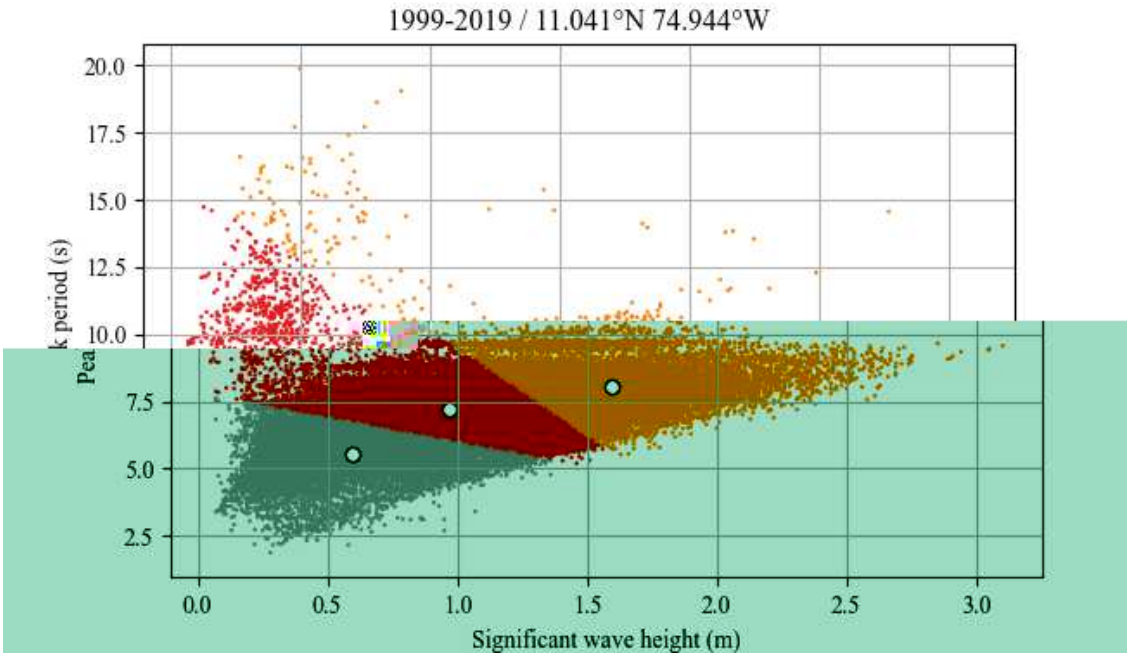
Los resultados del análisis muestran que existen tres alturas promedio representativas:

- 0.6 m para un período pico de 5.5 segundos.
- 0.95 m para un período pico de 7.4 segundos.
- 1.6 m para un período pico de 6 segundos.

Estas agrupaciones indican patrones recurrentes en las características de las olas a lo largo de los años, permitiendo identificar no solo las condiciones marítimas más frecuentes, sino también la relación entre las alturas de ola y los períodos pico asociados.

Figura 9

Alturas representativas de ola Vs periodos pico

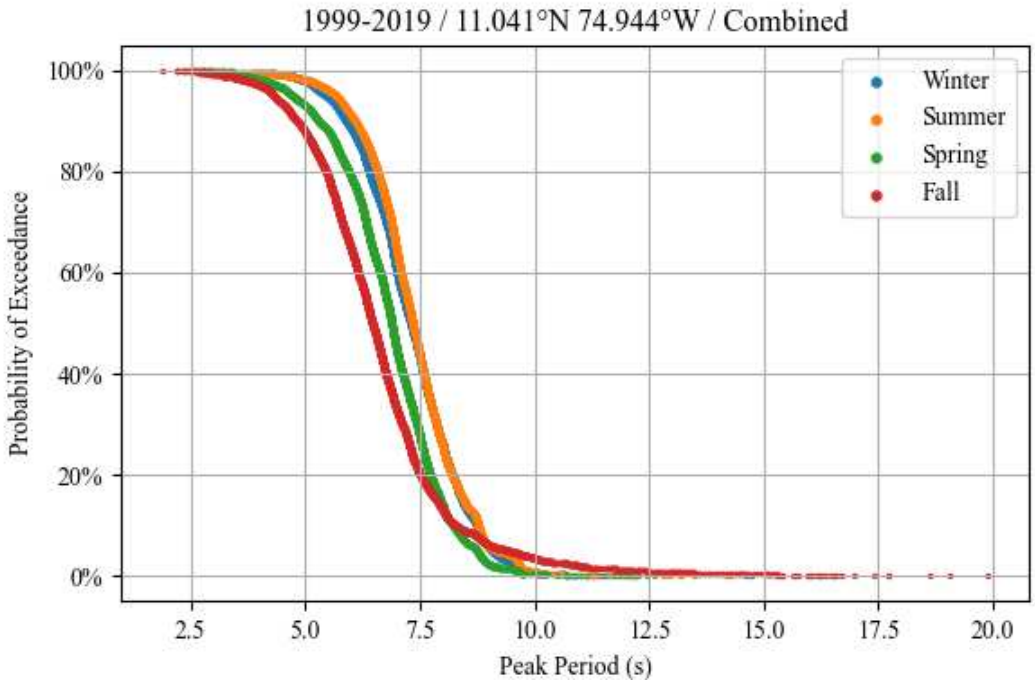


Nota. Periodos pico de oleaje.

En las figuras 10 y 11 se presentan las curvas de probabilidad de excedencia para los periodos pico y las alturas de ola correspondientes a las diferentes estaciones del año, lo que permite analizar las condiciones del oleaje en cada temporada. Durante la primavera, se observa que la probabilidad de exceder un periodo pico de 7.5 segundos es del 20%, lo que significa que, en un 20% del tiempo, las olas presentan un periodo mayor a este valor. De manera similar, la probabilidad de exceder una altura de ola de 1.5 metros es también del 20%, lo que indica que esta altura se supera con la misma frecuencia en esta estación.

Figura 10

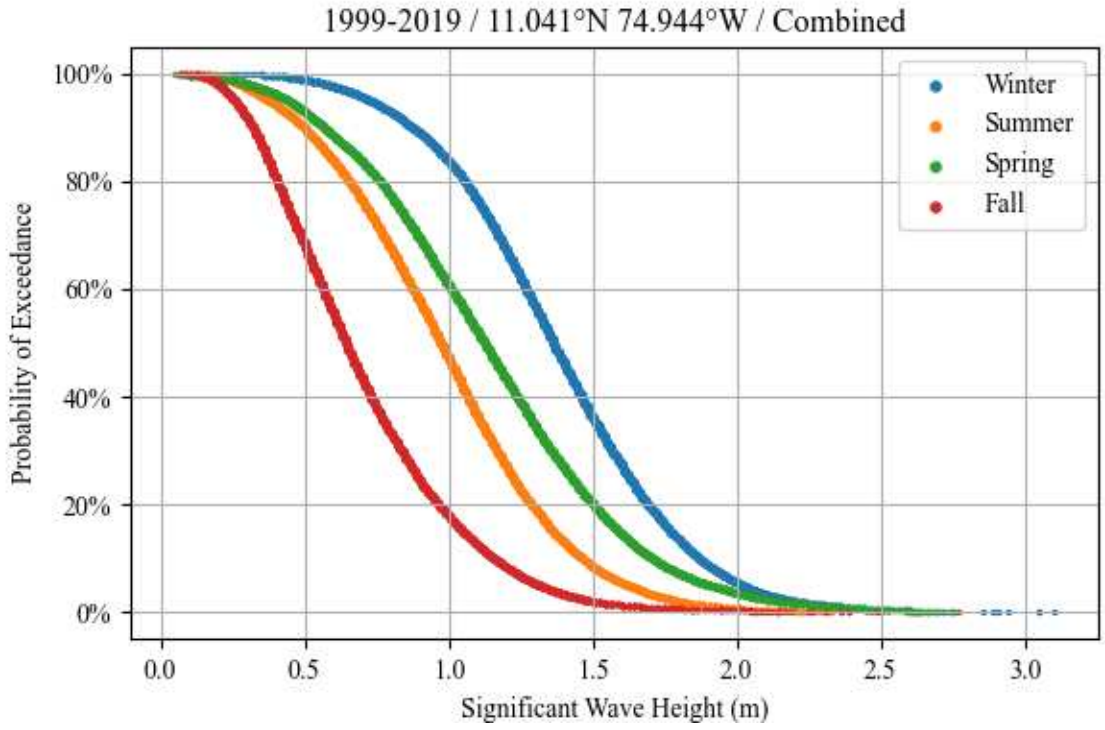
Probabilidad de excedencia para los periodos pico



Nota. La leyenda representa las estaciones del año.

Figura 11

Probabilidad de excedencia para altura de significancia de olas



Nota. La leyenda representa las estaciones del año.

En verano, la probabilidad de exceder un periodo pico de 7.5 segundos aumenta al 40%, lo que refleja una tendencia hacia olas con periodos más largos. No obstante, la probabilidad de que las olas superen una altura de 1.5 metros disminuye al 10%, lo que sugiere que, a pesar de los periodos más largos, las alturas de ola tienden a ser más moderadas durante el verano.

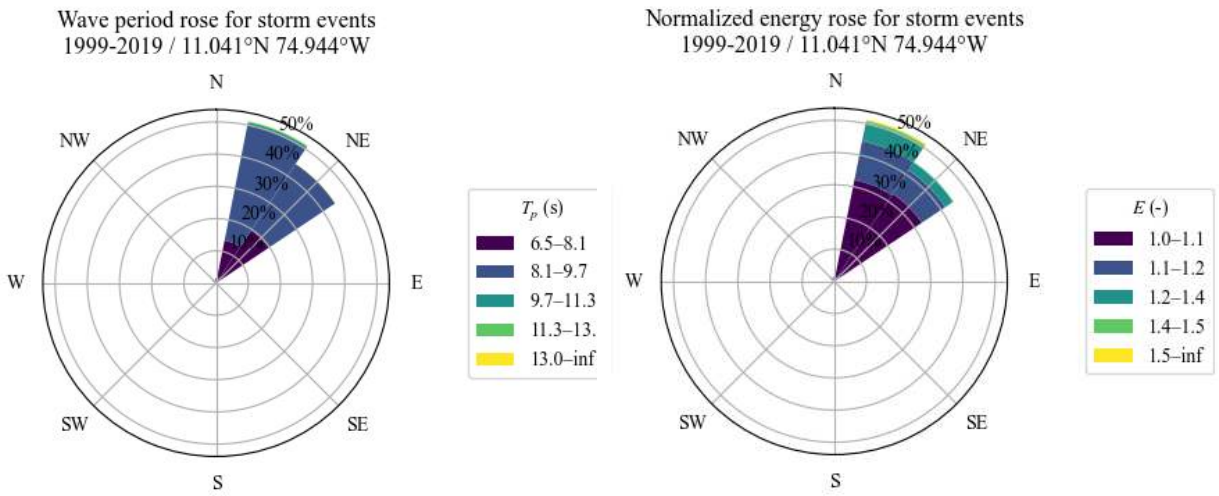
Para el otoño, se mantiene una probabilidad de excedencia del 20% para un periodo pico de 7.5 segundos, lo que refleja una similitud con los patrones observados en primavera. Sin embargo, la probabilidad de que las olas superen una altura de 1 metro es también del 20%, lo que indica que las alturas de ola en esta estación son generalmente menores en comparación con las otras estaciones analizadas.

Finalmente, en invierno, se alcanzan las condiciones más extremas. La probabilidad de exceder un periodo pico de 7.5 segundos es del 40%, lo que evidencia que durante esta estación las olas con periodos largos son mucho más frecuentes. Además, la probabilidad de que las olas superen una altura de 1.5 metros es también del 40%, lo que demuestra que tanto los periodos como las alturas de ola son más significativos en invierno, lo que podría implicar un mayor riesgo y un impacto más considerable en la costa.

Como se indica en la figura 12-a, también se desarrolló el análisis para identificar la dirección de las olas asociados al periodo en eventos de tormenta. Este gráfico revela que el 50% de las olas provienen de la dirección 30° NE, con periodos típicos de entre 8.1 y 9.7 segundos. Este dato es relevante, ya que indica que la mayoría de las olas durante eventos de tormenta tienden a dirigirse desde el noreste con una frecuencia de periodos relativamente largos, lo que podría influir en el comportamiento del oleaje y su impacto en la costa.

Figura 12

Dirección del periodo de ola y energía normalizada en periodos de tormenta



(a) (b)

Nota. (a) Rosa de Periodo de olas, (b) Rosa de energía normalizada

Por otro lado, en la figura 12-b se presenta la rosa de energía normalizada para eventos de tormenta. En este caso, también se observa que el 50% de las olas provienen de la dirección 30° NE, pero con una energía normalizada que oscila entre 1 y 1.2 E(-). Esto sugiere que las olas que se dirigen desde el noreste no solo tienen una alta frecuencia, sino que también transportan una cantidad significativa de energía, lo que refuerza la importancia de esta dirección en la dinámica

costera durante las tormentas. La energía de estas olas tiene un gran potencial para afectar las estructuras costeras y generar procesos erosivos.

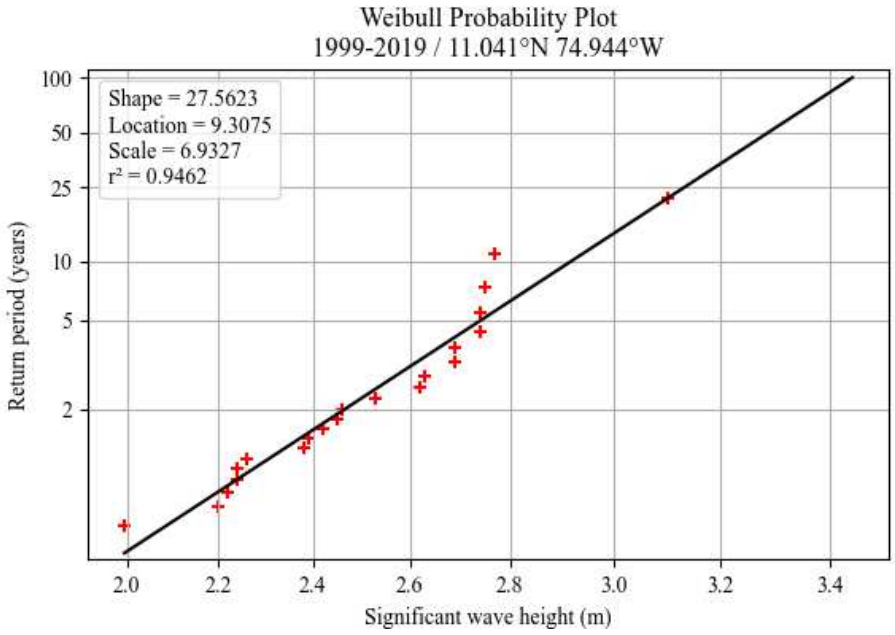
Ambos análisis, tanto de los periodos como de la energía de las olas, destacan la preponderancia de las olas provenientes del noreste en situaciones de tormenta, lo que ofrece una perspectiva clara sobre los patrones predominantes que deben tenerse en cuenta para la planificación y protección de la línea de costa.

4.1.5. Alturas de ola asociadas al periodo de retorno

Se realizó un gráfico de probabilidad de Weibull, como se indica en la figura 13, en el cual el período de retorno (en años) se encuentra en el eje Y, y la altura significativa de ola (Hs) en el eje X. Los parámetros obtenidos para el ajuste de Weibull son: Forma = 27.5623, Ubicación = 9.3075, Escala = 6.9327, con un $R^2 = 0.9462$, lo que indica un ajuste fuerte del modelo.

Figura 13

Dirección del periodo de ola y energía normalizada en periodos de tormenta



Nota. El grafico fue desarrollado con el software Appmar 1.0 Versión de prueba

El análisis reveló que la altura significativa máxima de ola (Hs = 3.1 m) en el área de estudio está asociada con un período de retorno de 25 años, lo que significa que se espera que una ola de esta magnitud ocurra en promedio una vez cada 25 años. Además, la probabilidad de ocurrencia de una ola de esta altura es del 95%, lo que indica una alta probabilidad de que este evento ocurra dentro de ese período de tiempo.

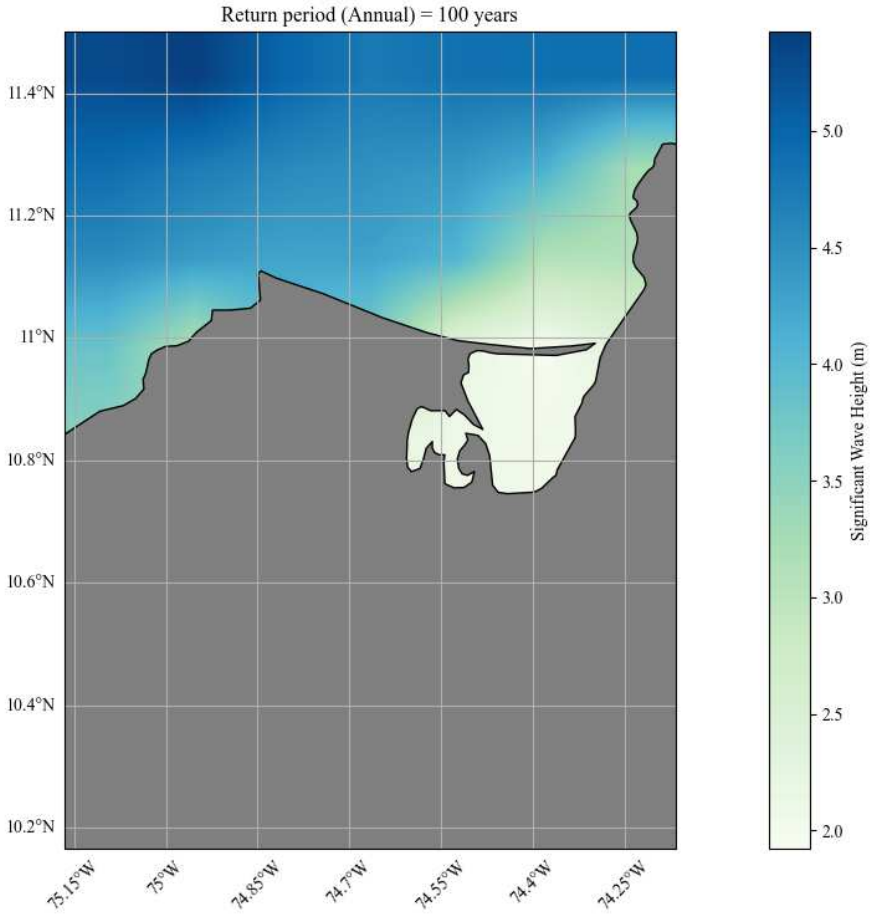
Finalmente, como se muestra en las figuras 14 y 15, se elaboraron mapas para identificar las alturas significativas de las olas y la velocidad del viento asociadas a un período de retorno de

100 años. Estos mapas permiten visualizar y comprender mejor las condiciones extremas que podrían afectar la zona de estudio a lo largo de un siglo.

En los mapas, se observa que en la zona de estudio las alturas de ola alcanzan valores de 3.5 m y 4 m. Estos niveles son significativos, ya que indican la posible magnitud de las olas que se podrían experimentar en situaciones extremas. Además, la velocidad del viento registrada oscila entre 16 m/s y 18 m/s, lo que sugiere condiciones de viento fuerte que podrían contribuir a la formación de olas de gran altura.

Figura 14

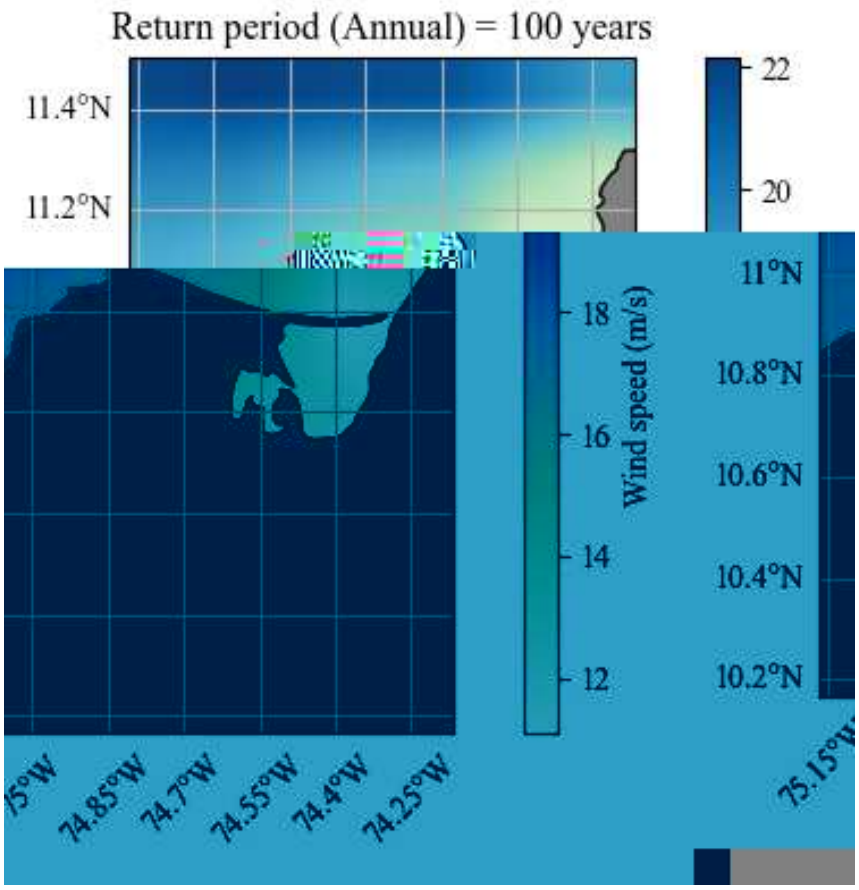
Altura significante de ola para un periodo de retorno de 100 años



Nota. La altura de la ola oscila entre 2 y 5 metros

Figura 15

Velocidad del viento para un periodo de retorno de 100 años



Nota. La velocidad del viento oscila entre 12 y 22 m/s

Este análisis es crucial para la planificación y gestión de riesgos en áreas costeras, ya que proporciona información valiosa sobre los potenciales impactos de fenómenos meteorológicos severos. Comprender las alturas significativas de las olas y la velocidad del viento asociadas a un período de retorno prolongado es esencial para la infraestructura costera, la navegación y la seguridad de las comunidades que habitan en estas zonas vulnerables. La identificación de estas

variables permite a las autoridades y planificadores implementar estrategias de mitigación y adaptación ante los efectos adversos del cambio climático y otros eventos extremos.

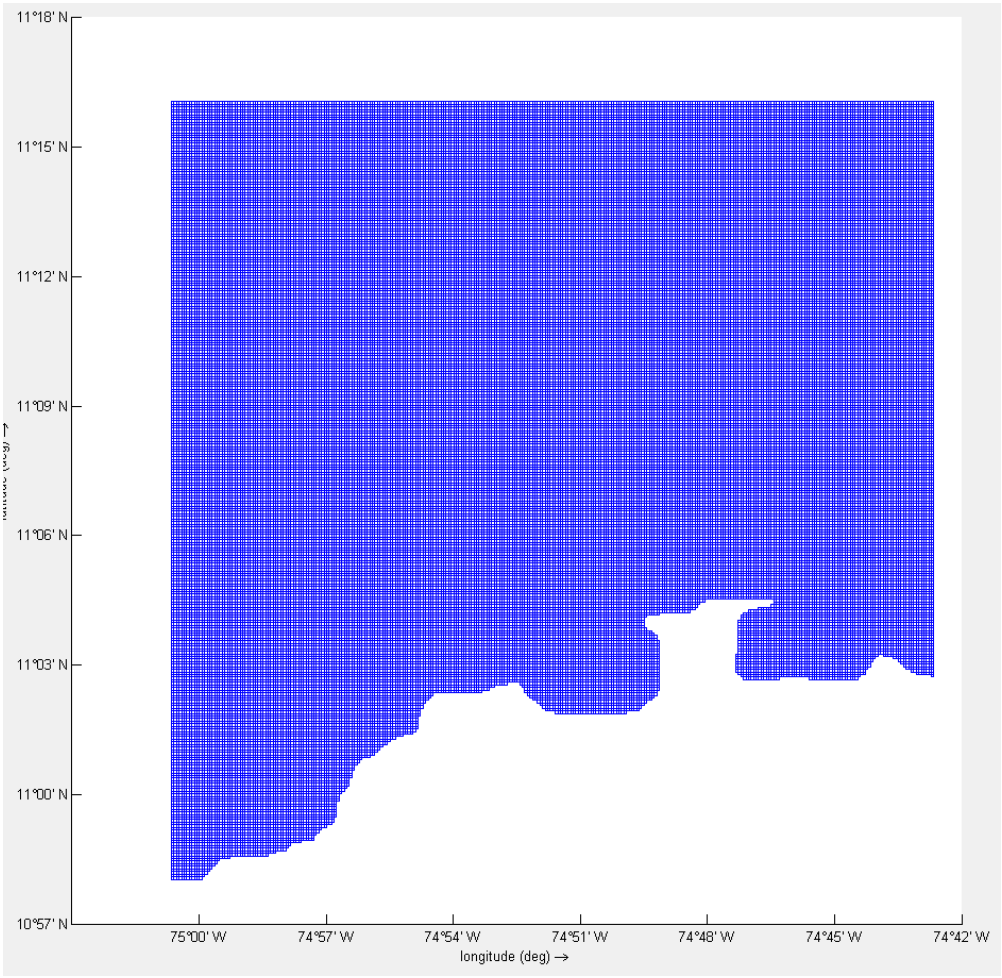
4.1.6. Propagación del oleaje

El estudio de propagación del oleaje y corrientes marinas en la playa de Salgar se llevó a cabo utilizando el modelo numérico Delft3D, específicamente con el módulo Waves. Este modelo permitió simular con precisión la propagación del oleaje desde aguas profundas hasta la costa y el comportamiento de las corrientes marinas en la zona de estudio.

Se desarrolló una malla de modelación de 30 km para cubrir adecuadamente la zona de estudio, como se aprecia en la figura 16. Los resultados obtenidos fueron significativos, proporcionando información crucial sobre la dinámica marina en Salgar.

Figura 16

Malla de modelación

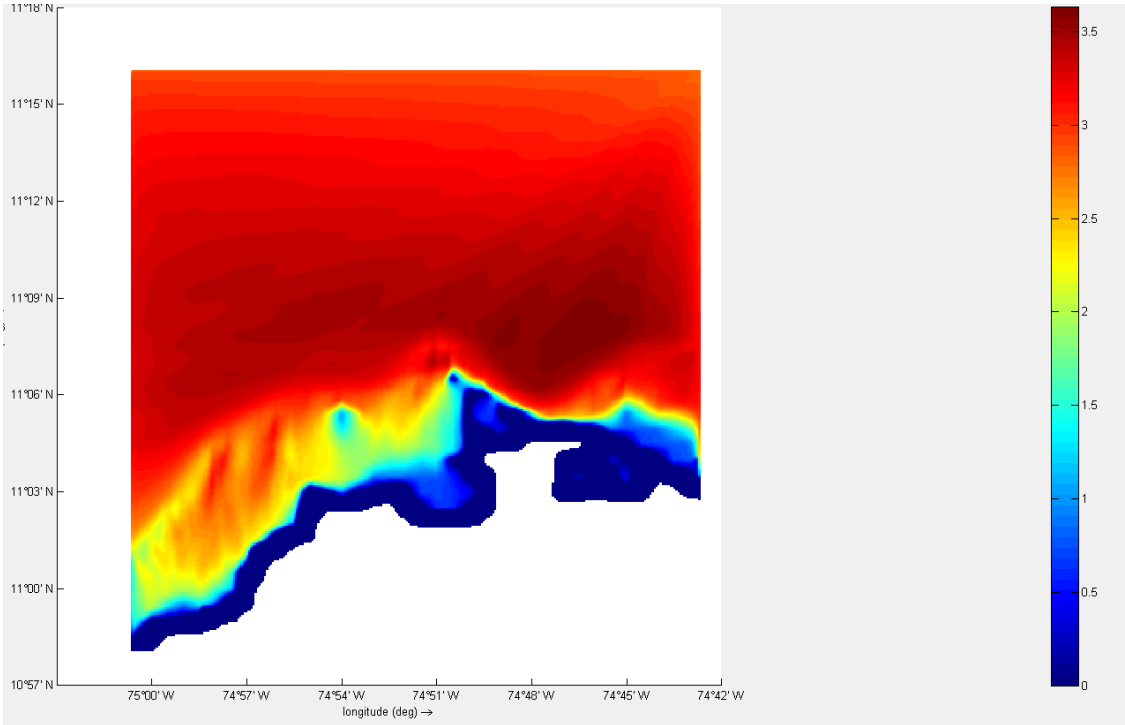


Nota. Tabla obtenida de modelo numérico Delft3D

Las simulaciones indicaron que las alturas de las olas en la zona de estudio varían entre 1.3 y 2.5 metros, como se indica en la figura 17. Esta variabilidad en la altura de las olas es fundamental para entender el impacto del oleaje en la erosión y acreción de la costa.

Figura 17

Altura de olas para el entorno de modelación



Nota. Tabla obtenida de modelo numérico Delft3D

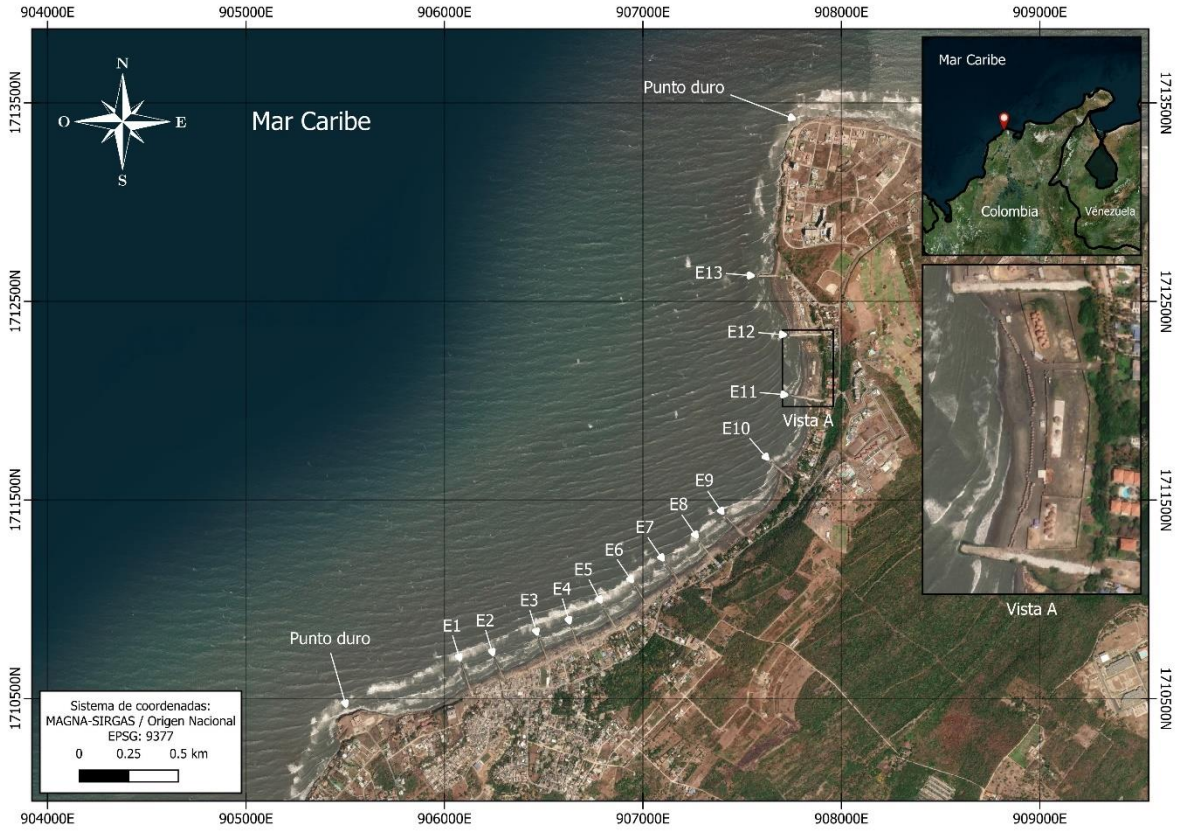
4.1.6.1.Inventario de la zona costera

La inspección visual realizada a lo largo de la playa de Salgar reveló la presencia de diversos elementos estructurales que influyen en la dinámica litoral de la zona. Este análisis se centró en la identificación de espolones y otras infraestructuras costeras que podrían afectar los patrones de erosión y sedimentación.

Se identificaron un total de 13 espolones a lo largo de la línea de costa de la playa de Salgar. Estos espolones comenzaron a ser construidos en el año 2004 en la parte sur del área de estudio y, progresivamente, se fueron extendiendo a lo largo de toda la costa hasta mediados de 2015. La distribución de los espolones sugiere un esfuerzo continuado por parte de las autoridades locales para mitigar la erosión costera y proteger la infraestructura adyacente como se aprecia en la figura 18.

Figura 18

Inspección visual de estructuras a lo largo de la playa de Salgar



Nota. Imagen obtenida de mapas de Google Earth

Los espolones actúan como barreras que interrumpen el flujo natural de sedimentos a lo largo de la costa. Esta intervención tiene el objetivo de reducir la erosión en áreas específicas y acumular sedimentos en las zonas protegidas por los espolones. Sin embargo, aunque los espolones pueden ser efectivos localmente para reducir la erosión, su presencia puede generar efectos colaterales como la erosión en las áreas no protegidas adyacentes y cambios en la dinámica sedimentaria (Rangel Buitrago, Anfuso, & Correa, 2012).

Entre los espolones se identificaron diversas estructuras con fines turísticos, incluyendo cabañas, restaurantes y pequeños hoteles, como se puede observar en la vista A de la Figura 18. Estas infraestructuras se encuentran directamente en la línea de costa y su ubicación puede influir en la dinámica litoral, en las figuras 19 y 20 se aprecian algunas de las fotografías tomadas en las visitas de campo.

Figura 19

Inspección visual de estructuras del sector turístico de la zona



Nota. Imagen tomada por autor, 2024.

Figura 20

Inspección visual de estructuras de vivienda comunidad aledaña a la playa



Nota. Imagen tomada por autor, 2024.

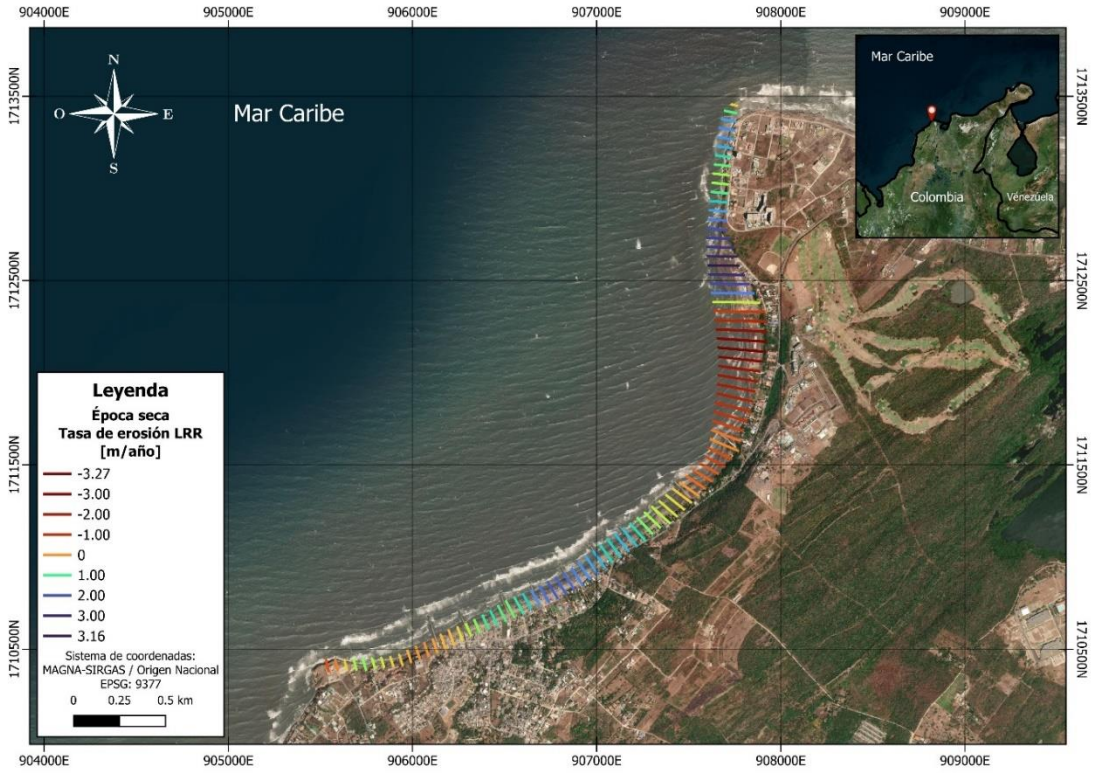
La inspección no identificó la presencia de otros elementos que pudieran afectar la dinámica litoral, como diques, puertos o desembocaduras de ríos. La ausencia de estos elementos sugiere que los principales factores antrópicos que influyen en la dinámica litoral de la playa de Salgar son los espolones y las estructuras turísticas.

4.1.7. Tasas de erosión – acreción costera

En la Figura 21 se muestra la evolución de la línea de costa en la playa de Salgar para el periodo de 1994 a 2023 en la época seca. La mayor tasa de erosión se evidenció en el sector de los últimos 3 espolones (E11, E12 y E13 en la Figura 18), esto se debe a que fue el último sector en ser intervenido por la construcción de espolones en el 2015, en este punto, se presentó un avance de hasta 149.28 m de la línea de costa y una tasa máxima de erosión de 3.27 m/año. La mayor tasa de acreción se presentó justo después del espolón E13, punto en donde los sedimentos que viajan de norte a sur sobre la línea de costa sé quedan retenidos, en este sector, el movimiento neto de la línea de costa alcanza el valor de 43.45 m y una tasa de acreción máxima de 3.16 m/año. En el resto del área de estudio se evidencia una predominancia de los procesos de acreción como respuesta a la instalación de los espolones desde el 2004. En promedio, la tasa de acreción en la zona analizada es de 1.17 m/año.

Figura 21

Tasa de erosión LRR para la época seca en el área de estudio



Nota. Imagen obtenida de mapas de Google Earth

En la Tabla 2 se muestra un resumen de los resultados de la estimación del movimiento neto de la orilla y la tasa de erosión/acreción para la época seca.

Tabla 2

Resultado del análisis de avance de orilla en el área de estudio para la época seca.

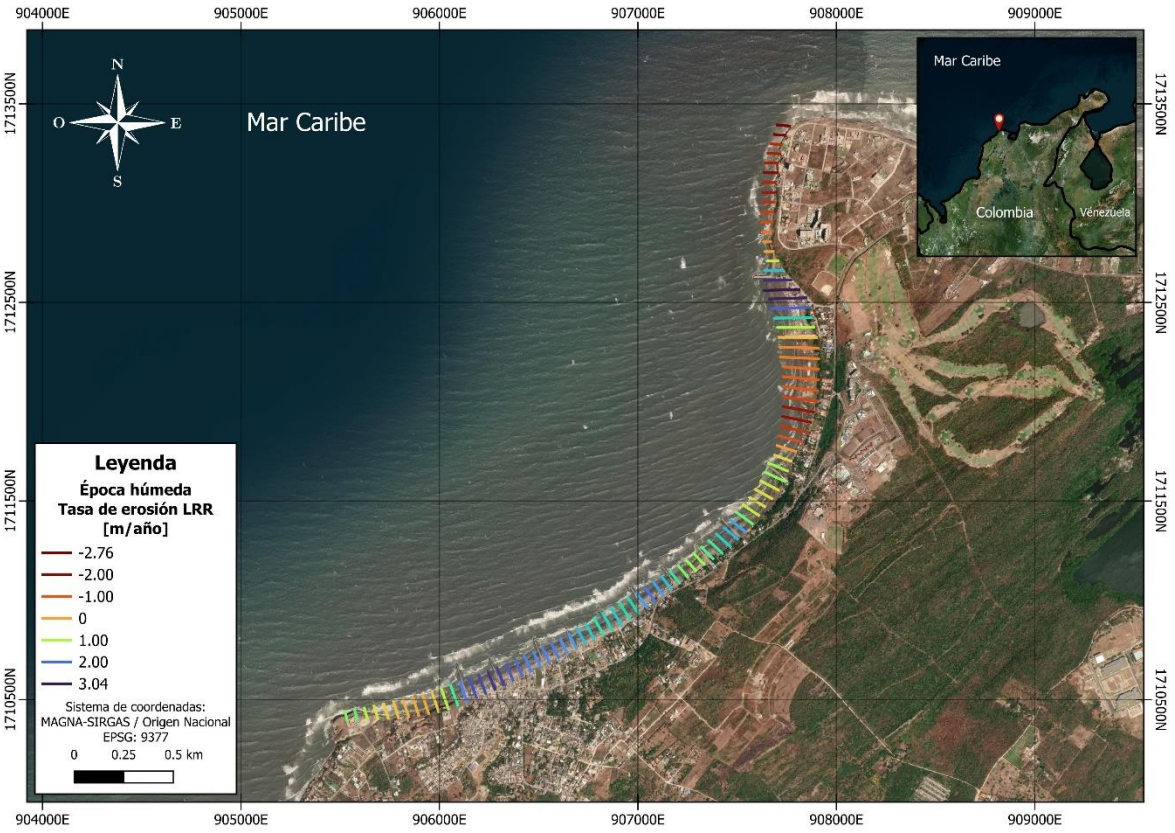
Parámetro	Época seca
Movimiento neto de la orilla (NSM)	
Valor promedio [m]	-27.64
Valor max. Negativo [m]	-149.28
Valor max. Positivo [m]	43.45
Tasa lineal de regresión (LRR)	
Tasa promedio [m/año]	0.52
Valor máx. Erosión [m/año]	-3.27
Tasa de erosión promedio [m/año]	-1.33
Valor máx. Acreción [m/año]	3.16
Tasa de acreción promedio [m/año]	1.17

Nota. La unidad de medida se encuentra en la columna de parámetro.

En la Figura 22 y Tabla 3, se presenta el análisis de la evolución de línea de costa en la época húmeda. Al igual que en la época seca, la mayor tasa de erosión se encuentra en el sector de los últimos 3 espolones construidos. En este punto, se presentó un avance de hasta 42.54 m de la línea de costa y una tasa máxima de erosión de 2.76 m/año. En el mayor punto de acreción, ubicado inmediatamente después del último espolón, el movimiento neto de la línea de costa alcanzó un valor máximo de 86.18 m y una tasa de acreción de 3.04 m/año. A lo largo del litoral, la tasa de erosión promedio es de 1.31 m/año mientras que la tasa de acreción promedio es de 1.47 m/año, siendo predominante los procesos de acreción en las primeras zonas intervenidas por la construcción de espolones.

Figura 22

Tasa de erosión LRR para la época húmeda en el área de estudio



Nota. Imagen obtenida de mapas de Google Earth

Tabla 3

Resultado del análisis de avance de orilla en el área de estudio para la época húmeda.

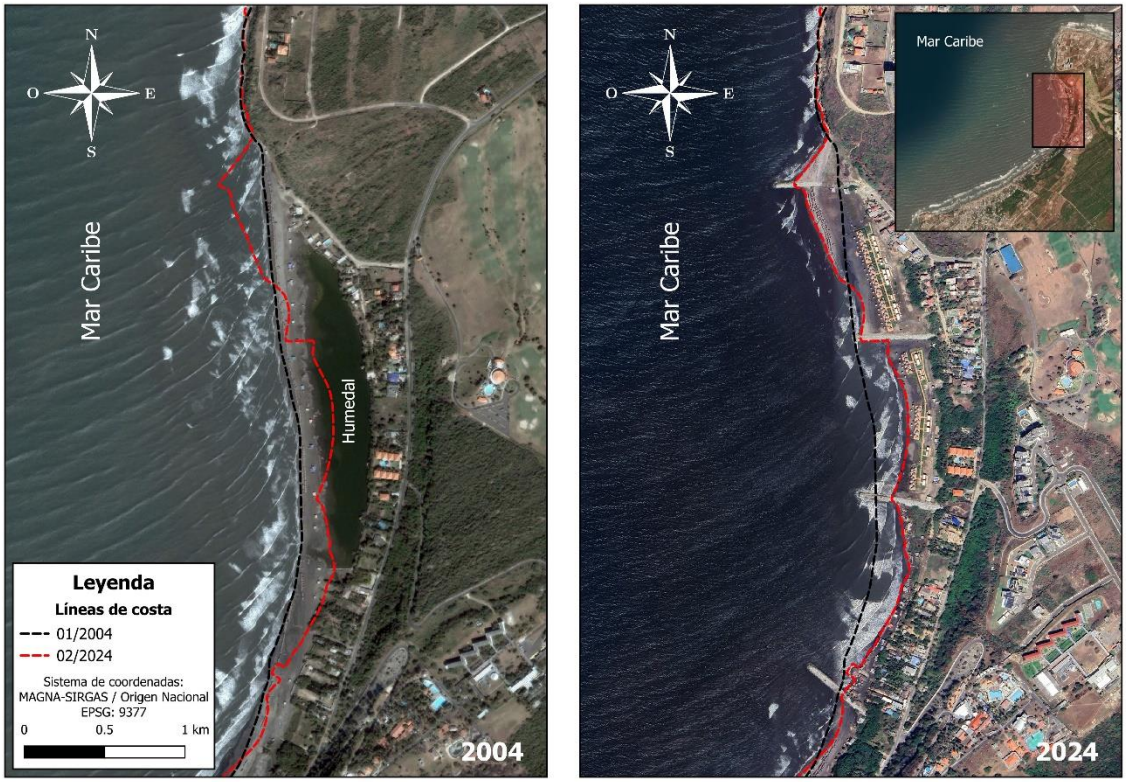
Parámetro	Época seca
Movimiento neto de la orilla (NSM)	
Valor promedio [m]	24.5
Valor max. Negativo [m]	-42.54
Valor max. Positivo [m]	86.18
Tasa lineal de regresión (LRR)	
Tasa promedio [m/año]	0.67
Valor máx. Erosión [m/año]	-2.76
Tasa de erosión promedio [m/año]	-1.31
Valor máx. Acreción [m/año]	3.04
Tasa de acreción promedio [m/año]	1.47

Nota. La unidad de medida se encuentra en la columna de parámetro.

Un análisis más detallado del punto con mayor tasa de erosión en los últimos 30 años (ver Figura 12), permite identificar una alta dinámica en la morfología de la línea de costa en el área de estudio. En esta zona, se encontraba un humedal costero que se puede observar desde la primera imagen satelital disponible en el año 1969, sin embargo, este termina siendo eliminado por completo debido al aumento de la erosión costera a finales del año 2010. En este año se presentó el mayor movimiento neto de la línea de costa en los últimos 30 años, y debido a este evento crítico, a mediados del 2015 son instalados 4 espolones en este sector, momento en el cual empieza una recuperación paulatina de la línea de costa hasta alcanzar el estado actual del litoral, a cambio de finalizar con la intervención antropogénica total de las playas del corregimiento de Salgar.

Figura 23

Análisis del punto con mayor tasa de erosión en los últimos 30 años



Nota. Imagen obtenida de mapas de Google Earth

4.1.8. Análisis de transporte de sedimentos

Como parte del estudio, se llevó a cabo un Análisis de Transporte de Sedimentos enfocado en cinco playas situadas en Salgar. Para ello, se tomaron muestras sedimentarias de cada una de estas playas y se les realizó un análisis granulométrico detallado. Utilizando el

aplicativo Sandy, se llevó a cabo el análisis granulométrico de las muestras, permitiendo obtener los porcentajes correspondientes a los diferentes tamaños de partículas presentes. Este proceso nos permitió identificar la distribución granulométrica de los sedimentos, proporcionando datos esenciales para comprender los patrones de transporte sedimentario y la dinámica costera en la región de Salgar. En la Figura 24 se aprecia la ubicación de las cinco playas analizadas.

Figura 24

Ubicación de los puntos de análisis.

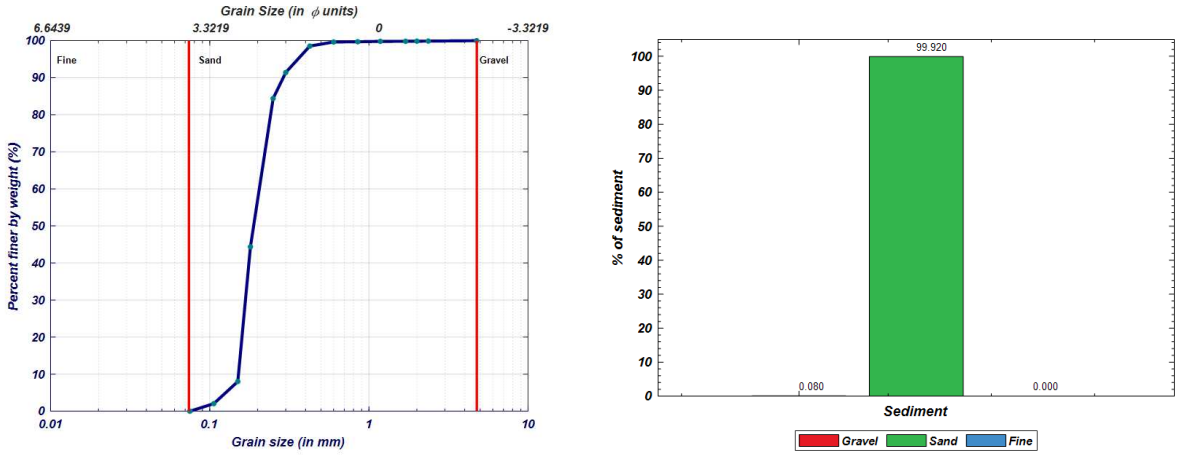


Nota. Imagen obtenida de mapas de Google Earth

En la figura 25 se aprecia el análisis granulométrico de las muestras de sedimento de la Playa 1, este revela una composición dominada por arena fina, con un 99.92% del material total. La presencia de grava es mínima, representando solo el 0.08% del material. La clasificación de partículas según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) identifica el sedimento como SP, lo que significa arena mal graduada. Esto sugiere que la playa no tiene una buena distribución de diferentes tamaños de arena, lo que puede afectar la capacidad de compactación y estabilidad de la playa. Según la clasificación ASTM, el sedimento es categorizado como arena fina, lo que concuerda con los resultados de la clasificación de Wentworth, que también clasifica el sedimento como arena fina.

Figura 25

Análisis granulométrico para la playa 1



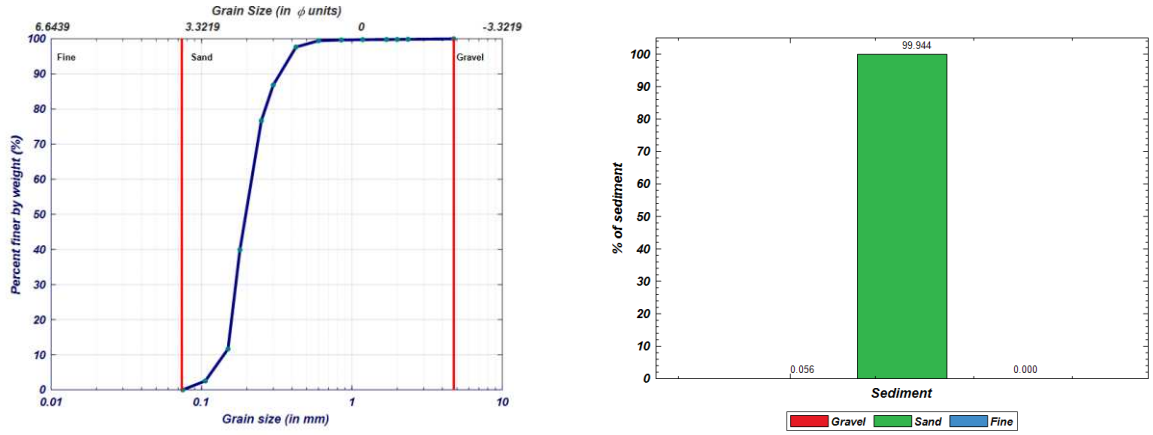
Nota. El porcentaje de sedimento se clasifica como arena.

La distribución granulométrica muestra que la mayoría del sedimento se encuentra en el rango de 0.180 mm a 0.300 mm, con un 55.62% del material pasando por el tamiz de 0.180 mm y un 8.59% pasando por el tamiz de 0.300 mm. La proporción significativa de partículas finas indica un alto grado de homogeneidad en los tamaños de sedimento, lo que puede influir en la erosión y deposición en la playa. La alta proporción de arena fina y la clasificación como SP (arena mal graduada) tienen importantes implicaciones para el transporte sedimentario. La arena fina es más susceptible a ser transportada por el viento y las olas, lo que puede resultar en una mayor movilidad del sedimento y cambios en la morfología de la playa. La falta de partículas más grandes y bien distribuidas puede reducir la resistencia del sedimento a la erosión, aumentando la vulnerabilidad de la playa a la pérdida de material durante eventos de alta energía, como tormentas.

El análisis revela que la Playa 2 (Figura 26) está compuesta principalmente por arena fina, representando el 99.944% del material total, con una presencia insignificante de grava (0.056%). Esta alta concentración de arena fina indica un entorno sedimentario bastante uniforme en términos de tamaño de partícula. La arena de Playa 2 se clasifica como SP (arena mal graduada) según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), lo que implica una falta de diversidad en los tamaños de las partículas de arena. Esta característica puede afectar la capacidad de compactación y la estabilidad estructural de la playa. La clasificación ASTM y la clasificación de Wentworth coinciden en identificar el sedimento como arena fina.

Figura 26

Análisis granulométrico para la playa 2



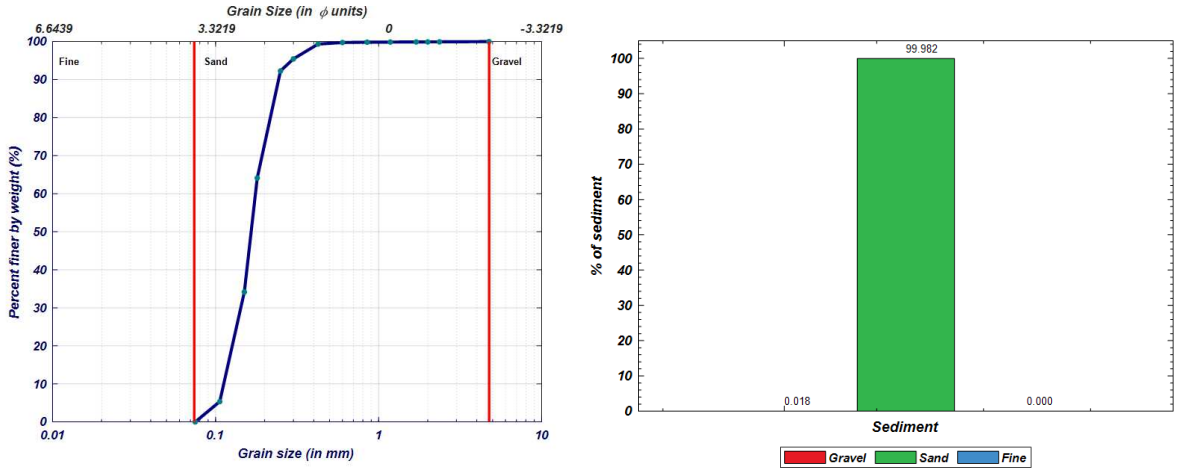
Nota. El porcentaje de sedimento se clasifica como arena.

La mayor parte del sedimento se encuentra en el rango de 0.180 mm a 0.300 mm, con el 60.0891% del material pasando por el tamiz de 0.180 mm y el 13.1486% pasando por el tamiz de 0.300 mm. La preponderancia de partículas finas refleja una alta uniformidad en el tamaño de los sedimentos, lo que tiene implicaciones importantes para la erosión y deposición de la playa. La composición mayoritaria de arena fina y su clasificación como SP (arena mal graduada) sugieren que los sedimentos de Playa 2 son altamente móviles y susceptibles a la erosión por viento y olas. La ausencia de partículas más grandes reduce la resistencia del sedimento a la erosión, haciendo a la playa más vulnerable durante eventos de alta energía, como tormentas.

El análisis muestra que Playa 3 está compuesta casi exclusivamente por arena fina, que constituye el 99.982% del material total, con una cantidad mínima de grava (0.018%). Esta alta proporción de arena fina sugiere un entorno sedimentario homogéneo en términos de tamaño de partícula. La arena en Playa 3 se clasifica como SP (arena mal graduada) según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Esta clasificación indica que las partículas de arena tienen una distribución uniforme en tamaño, lo que puede influir en la estabilidad y la compactación de la playa. Tanto la clasificación ASTM como la de Wentworth confirman que el sedimento es arena fina.

Figura 27

Análisis granulométrico para la playa 3



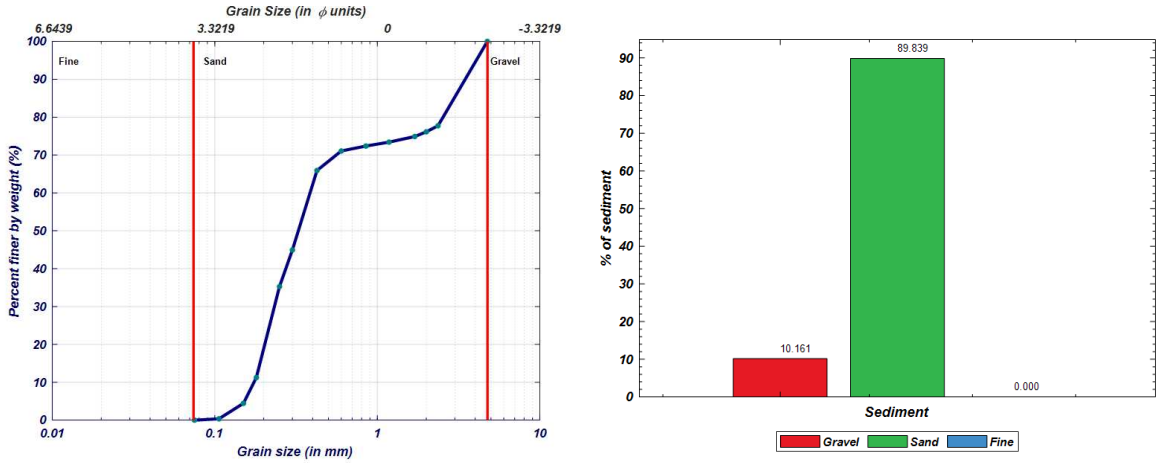
Nota. El porcentaje de sedimento se clasifica como arena.

La mayor parte del sedimento se encuentra en el rango de 0.150 mm a 0.300 mm, con el 65.8376% del material pasando por el tamiz de 0.150 mm y el 4.5453% pasando por el tamiz de 0.300 mm. La predominancia de partículas finas indica una alta uniformidad en el tamaño de los sedimentos, lo cual es crucial para entender las dinámicas de erosión y deposición de la playa. La casi total composición de arena fina y su clasificación como SP (arena mal graduada) sugieren que los sedimentos de Playa 3 son altamente móviles y susceptibles a la erosión por acción del viento y las olas. La ausencia de partículas más grandes implica una menor resistencia a la erosión, lo que podría hacer que la playa sea más vulnerable a eventos de alta energía, como tormentas.

Playa 4 presenta una composición significativa de grava, con un 10.161% del material total, y una predominancia de arena (89.839%). Este equilibrio entre grava y arena indica una mezcla de sedimentos relativamente más gruesos en comparación con otras playas analizadas. Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), los sedimentos de Playa 4 se clasifican como SP (arena mal graduada), lo que indica una variedad en el tamaño de partículas dentro de la categoría de arena. La clasificación ASTM la define como arena media, mientras que la clasificación de Wentworth la describe como arena gruesa. Estas clasificaciones reflejan la heterogeneidad del tamaño de las partículas presentes en la playa.

Figura 28

Análisis granulométrico para la playa 4



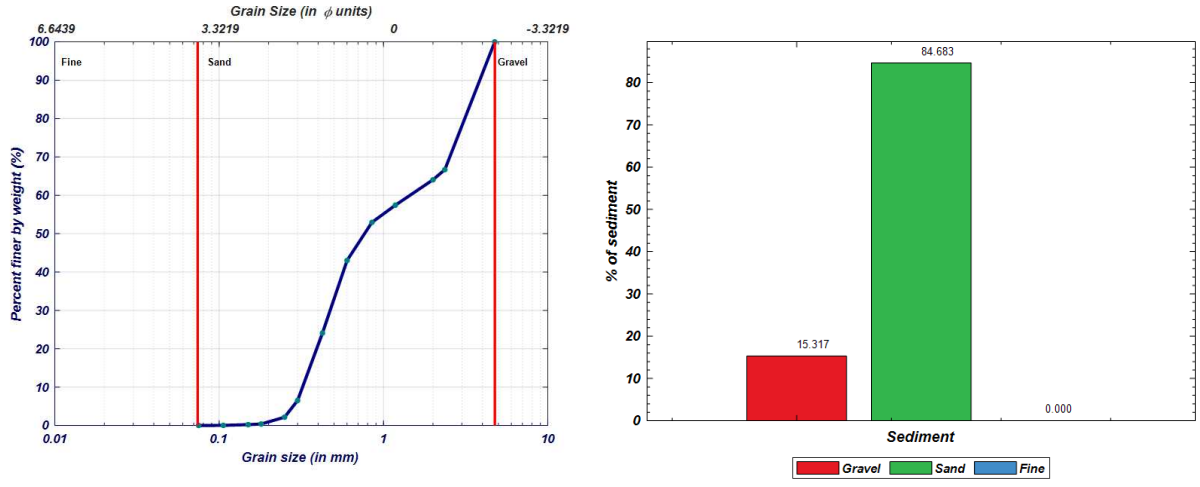
Nota. El porcentaje de sedimento se clasifica como arena.

La distribución granulométrica muestra una notable cantidad de partículas en el rango de 0.300 mm a 0.425 mm, con el 55.0745% del material pasando por el tamiz de 0.300 mm y el 34.0849% pasando por el tamiz de 0.425 mm. Además, hay una cantidad considerable de partículas más grandes, evidenciada por el 10.161% que queda retenido en el tamiz de 4.750 mm. La presencia de una cantidad significativa de grava junto con arena media y gruesa sugiere que los sedimentos de Playa 4 son menos móviles que los de las otras playas estudiadas. La mezcla de tamaños de partículas puede afectar la estabilidad de la playa y su susceptibilidad a la erosión, ya que las partículas más grandes son menos propensas a ser transportadas por el viento y las olas.

Playa 5 presenta una notable cantidad de grava, con un 15.317% del material total, mientras que la arena constituye el 84.683%. La ausencia de arena muy fina y la predominancia de partículas más grandes sugiere una playa con sedimentos menos susceptibles al transporte por viento y olas. Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), los sedimentos de Playa 5 se clasifican como SP (arena mal graduada), lo que indica una falta de uniformidad en el tamaño de las partículas dentro de la categoría de arena. La clasificación ASTM la define como arena media, mientras que la clasificación de Wentworth la describe como arena muy gruesa. Estas clasificaciones reflejan la presencia de partículas más grandes y la heterogeneidad del sedimento.

Figura 29

Análisis granulométrico para la playa 5



Nota. El porcentaje de sedimento se clasifica como arena.

La distribución granulométrica muestra una notable cantidad de partículas en el rango de 0.300 mm a 0.425 mm, con el 93.4844% del material pasando por el tamiz de 0.300 mm y el 75.9028% pasando por el tamiz de 0.425 mm. Además, hay una cantidad considerable de partículas más grandes, evidenciada por el 15.3167% que queda retenido en el tamiz de 4.750 mm.

La presencia de una cantidad significativa de grava junto con arena media y muy gruesa sugiere que los sedimentos de Playa 5 son menos móviles que los de las otras playas estudiadas. La mezcla de tamaños de partículas puede afectar la estabilidad de la playa y su susceptibilidad a la erosión, ya que las partículas más grandes son menos propensas a ser transportadas por el viento y las olas.

4.1.8.1.Transporte longitudinal de sedimentos (TLS)

La ecuación de Kamphuis para el cálculo del transporte longitudinal de sedimentos en el contexto de la dinámica costera es una formulación empírica que considera el flujo de sedimentos debido a las olas y las corrientes. La ecuación se expresa como:

$$Q = c * {H_s}^{2.5} * {T_p}^{0.5} * Sin(\propto_b)$$

Donde:

Q = Transporte de sedimentos (volumen por unidad de tiempo, por ejemplo, m³/año).

C = Constante que depende del tipo de sedimento y las condiciones locales. Típicamente se obtiene a través de calibración.

Hs = Altura significativa de ola (en metros).

$T\mathrm{p}$ = Periodo de ola (en segundos).

$\propto_b$ = Ángulo de incidencia de las olas respecto a la costa.

El análisis del Transporte Longitudinal de Sedimentos (TLS) se llevó a cabo utilizando datos granulométricos y componentes oceanográficas obtenidas para el área de estudio. Los valores de d50, que representan el diámetro medio de las partículas de sedimento, fueron determinados para cada una de las muestras recolectadas en cinco playas diferentes. Estos valores se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4

Valores de d50 para las muestras de sedimentos del área de estudio

Muestra	d50	Ambiente Sedimentario
S1	0.186 mm	marino somero agitado
S2	0.194 mm	marino somero agitado
S3	0.165 mm	marino somero agitado
S4	0.323 mm	marino somero agitado
S5	0.747 mm	marino somero agitado

A partir del análisis del clima marítimo con la herramienta APPMAR 1.0, se estimaron las variables de la componente oceanográfica para la ecuación de TLS. Los valores para el caso dominante y el caso extremo son los siguientes:

Tabla 5

Valores de la componente oceanográfica del área de estudio

Componente oceanográfica	Caso dominante	Caso extremo
α_b	45°	45°
H_s	1.95 m	2.18 m
T_p	5.20 s	7.25 s

Finalmente, se estimó a partir de mediciones en campo que la pendiente de la playa a lo largo de los puntos de extracción es aproximadamente 4.37%. Los resultados del cálculo de la tasa de Transporte Longitudinal de Sedimentos se muestran a continuación en la Tabla 5:

Tabla 6

Resultados del cálculo de Transporte Longitudinal de Sedimentos

Muestra	Caso dominante	Caso extremo
S1	1634192 m³/año	2886652 m³/año
S2	1587390 m³/año	2803982 m³/año
S3	1775019 m³/año	3135411 m³/año
S4	1116650 m³/año	1972462 m³/año
S5	626146 m³/año	1106031 m³/año

Las muestras S1, S2 y S3 presentan valores de d50 relativamente bajos, lo que sugiere partículas más finas. En consecuencia, tienen tasas de TLS más altas tanto en el caso dominante como en el extremo. La muestra S3 tiene la tasa más alta de TLS, lo que indica una mayor susceptibilidad al transporte sedimentario longitudinal debido a sus partículas más finas.

En el caso de la muestra S4 con un valor de d50 de 0.323 mm, muestra tasas de TLS intermedias. Esto se debe a que sus partículas son más grandes en comparación con S1, S2 y S3, pero aún susceptibles a transporte sedimentario significativo. Y finalmente la muestra S5 tiene el valor de d50 más alto (0.747 mm), lo que indica partículas más gruesas. En consecuencia, las tasas de TLS para S5 son las más bajas, tanto en el caso dominante como en el extremo. Esto

sugiere que las partículas más gruesas son menos susceptibles a ser transportadas por las olas y corrientes predominantes.

Los resultados del cálculo de Transporte Longitudinal de Sedimentos muestran diferencias significativas en la cantidad de sedimentos transportados entre los diferentes casos considerados (dominante y extremo) y las diferentes muestras de sedimentos (S1 a S5).

En primer lugar, se observa que la cantidad de sedimentos transportados es mayor en el caso extremo en comparación con el caso dominante para todas las muestras. Esto sugiere que, bajo condiciones extremas, como tormentas o eventos climáticos severos, se produce un aumento significativo en el transporte de sedimentos a lo largo de la costa.

Además, se puede notar que hay variaciones en la cantidad de sedimentos transportados entre las diferentes muestras. Por ejemplo, la muestra S3 muestra los valores más altos tanto en el caso dominante como en el extremo, lo que indica que esta zona específica de la playa tiene una mayor capacidad de transporte de sedimentos en comparación con las otras muestras. Por otro lado, la muestra S5 muestra los valores más bajos de transporte de sedimentos, lo que sugiere que esta zona podría ser menos dinámica en términos de movimiento de sedimentos a lo largo de la costa.

Estas diferencias en los resultados pueden atribuirse a una variedad de factores, como la topografía costera, la energía de las olas y las corrientes, la pendiente de la playa y la disponibilidad de sedimentos. En general, estos resultados son importantes para comprender la dinámica costera y la gestión adecuada de las playas, especialmente en términos de erosión y sedimentación.

4.2. Plantear alternativas constructivas sostenibles, que permitan mitigar los impactos de la erosión costera en Salgar y promover la conservación y sostenibilidad del entorno costero.

En los últimos años, los avances en la ingeniería han permitido el desarrollo de nuevas tecnologías aplicadas a la construcción, que pueden ofrecer soluciones más duraderas y eficientes frente a las amenazas costeras. Estas soluciones buscan reducir la vulnerabilidad de las infraestructuras, mejorar la resiliencia de los ecosistemas y adaptarse a las condiciones cambiantes que imponen fenómenos como el cambio climático y la subida del nivel del mar. Entre las alternativas que se destacan se encuentran el uso de geotextiles, estructuras modulares con materiales avanzados, rehabilitación de dunas costeras, rompeolas de materiales híbridos y sistemas de defensas costeras flotantes. Cada una de estas soluciones combina sostenibilidad con tecnología de punta, proporcionando una respuesta integral a los problemas de erosión.

La incorporación de materiales avanzados de ingeniería, como polímeros reciclados y concreto de alta durabilidad, es clave para asegurar la longevidad y eficiencia de las infraestructuras frente a las fuerzas naturales. Asimismo, la integración de conceptos de infraestructura verde, como la restauración de dunas con vegetación nativa, permite una adaptación más natural y sostenible a las dinámicas costeras.

El análisis y la selección de estas alternativas se basa en un enfoque que prioriza no solo la efectividad en la mitigación de la erosión, sino también la sostenibilidad de los materiales, la adaptabilidad al cambio climático, el impacto ambiental, y los costos y la facilidad de mantenimiento a largo plazo. De esta manera, las soluciones propuestas no solo buscan proteger la infraestructura existente, sino también promover la conservación de los ecosistemas costeros y asegurar la viabilidad futura de las zonas afectadas.

4.2.1. Alternativas propuestas

Para mitigar los impactos negativos de la erosión costera en Salgar y promover la sostenibilidad del entorno, se plantean cuatro alternativas constructivas sostenibles que incorporan nuevos materiales de ingeniería y enfoques ecológicos. Estas soluciones buscan no solo frenar la erosión, sino también fomentar la conservación del entorno natural y la adaptación de las infraestructuras a las condiciones cambiantes del litoral. Las alternativas propuestas son:

4.2.1.1. Revegetación y plantación en los espolones mediante geotextiles.

Inicialmente la revegetación y plantación en los espolones mediante geotextiles es una estrategia sostenible para controlar la erosión costera mediante la integración de elementos naturales y tecnológicos (Li et al., 2016; Zamith & Scarano, 2010). Esta alternativa combina el uso de vegetación costera con soluciones de ingeniería como geotextiles y muros verdes, con el fin de estabilizar los suelos y proteger las zonas vulnerables a la erosión.

El primer componente es la plantación de vegetación nativa tolerante a la sal en y alrededor de los espolones (estructuras de piedra o concreto construidas perpendicularmente a la línea de costa para evitar la erosión). Plantas como gramíneas, arbustos, y otras especies costeras nativas (Figura 30), se colocan estratégicamente para fortalecer el suelo y frenar el avance de la erosión. La vegetación actúa como un sistema natural de retención de sedimentos y estabilización del suelo, ayudando a reducir la pérdida de arena y tierra provocada por la acción de las olas y el viento (Zamith & Scarano, 2010).

Figura 30

Presencia de arbustos y gramíneas en la zona de estudio



Nota. Imagen tomada por autor, 2024.

En caso de que sea necesario son materiales sintéticos permeables que se colocan sobre el suelo o debajo de la vegetación para mejorar la estabilidad del terreno. Estos permiten la infiltración de agua mientras previenen la erosión del suelo, ayudando a mantener su estructura y a retener los sedimentos.

Al colocarse sobre los espolones y otras áreas expuestas, los geotextiles actúan como una capa protectora que refuerza la vegetación y garantiza que el sustrato no se desplace con facilidad, proporcionando una base estable para el crecimiento de plantas.

Dentro de los beneficios de la revegetación en espolones se encuentra, el control de la erosión, con lo cual la vegetación actúa como una barrera natural, disminuyendo la velocidad del viento y las olas, reduciendo así el impacto erosivo sobre la costa (Li et al., 2016). Asi mismo, se mejora la biodiversidad con la introducción de especies nativas se fomenta un ecosistema más rico y estable. Estas plantas proporcionan hábitats para la fauna local, ayudando a restaurar la biodiversidad de la región. Adicionalmente, las plantas costeras seleccionadas están adaptadas a las condiciones locales (salinidad, humedad, vientos fuertes), lo que les permite sobrevivir y prosperar en entornos hostiles, ofreciendo una solución a largo plazo.

La revegetación de los espolones puede mejora el atractivo visual de las zonas costeras, lo que puede tener un impacto positivo en la percepción turística y recreativa de las áreas. y al ser una solución basada en la naturaleza, esta alternativa mejora la capacidad del ecosistema costero para absorber el impacto del cambio climático, como el aumento del nivel del mar y las tormentas más intensas.

4.2.1.2. Estructuras modulares con materiales avanzados.

La alternativa de estructuras modulares con materiales avanzados representa una solución sostenible e innovadora para mitigar la erosión costera y adaptarse a las condiciones cambiantes del litoral. Esta opción combina tecnologías constructivas modulares con materiales de ingeniería

avanzados, ofreciendo una intervención eficiente y adaptable, con un impacto ambiental reducido (Hanrahan, 2014; Panaitescu et al., 2018).

Las estructuras modulares son sistemas constructivos que se ensamblan a partir de componentes prefabricados. Estos módulos pueden tener distintas formas y tamaños y se instalan en la zona costera afectada para cumplir con diversas funciones, como la protección contra la erosión, el desvío de corrientes y la estabilización del terreno (Stauble & Tabar, 2003).

A diferencia de las soluciones tradicionales, como los espolones de roca o muros de concreto, las estructuras modulares son flexibles, fáciles de ensamblar y adaptables a distintas condiciones geográficas y climáticas. Además, permiten intervenciones más rápidas y económicas. Uno de los aspectos clave de esta alternativa es el uso de materiales avanzados de ingeniería, que presentan propiedades superiores a los materiales convencionales. Entre los materiales más destacados se encuentran (Srineash & Murali, 2019a):

- Polímeros reciclados: Los compuestos de polímeros reciclados son una opción sostenible, ya que reutilizan residuos plásticos y ofrecen resistencia a la corrosión, lo que es crucial en ambientes marinos. Estos polímeros son duraderos, ligeros y de bajo mantenimiento.

- Compuestos de fibra de vidrio: Estos materiales son altamente resistentes a la intemperie y al desgaste por agua salada, lo que los convierte en una opción ideal para las estructuras modulares que estarán en contacto constante con el mar.
- Nanomateriales: Incorporar nanomateriales en el diseño de las estructuras modulares permite mejorar sus propiedades, como la resistencia mecánica y la durabilidad. Además, los nanomateriales pueden incluir propiedades autolimpiantes y de bajo impacto ambiental.
- Concreto ecológico: En algunos casos, se utilizan variantes de concreto con aditivos que mejoran su durabilidad en ambientes marinos, reduciendo la cantidad de cemento y, por ende, las emisiones de CO_2 durante su fabricación.

Las estructuras modulares pueden ser diseñadas para cumplir varias funciones simultáneamente. Por ejemplo, pueden actuar como rompeolas, reduciendo la energía de las olas antes de que impacten la costa, o como barreras de sedimentación, promoviendo la acumulación de arena en áreas estratégicas para regenerar playas. Además, estas estructuras son adaptables a las condiciones cambiantes del entorno costero. A medida que la línea de costa evoluciona, las estructuras pueden ser reubicadas, reemplazadas o ampliadas según las necesidades de protección (Srineash & Murali, 2019a).

Dentro de los beneficios de estas estructuras una de las mayores ventajas de las estructuras modulares es que se pueden diseñar para ser fácilmente modificadas o ampliadas, lo que permite adaptarse a las cambiantes condiciones del litoral, como el aumento del nivel del

mar o la variación en las corrientes marinas. Asi mismo, el uso de materiales avanzados como polímeros reciclados reduce la dependencia de los recursos no renovables y limita la huella de carbono del proceso constructivo. Además, al ser prefabricadas, las estructuras modulares generan menos residuos y reducen la necesidad de transporte y manipulación de materiales en el sitio de construcción.

Los materiales avanzados son altamente resistentes a la corrosión, la salinidad y otros factores de deterioro que afectan a las estructuras costeras. Esto asegura una mayor vida útil de la infraestructura, disminuyendo la frecuencia de mantenimiento y la necesidad de reemplazos. Asi mismo, gracias a su diseño modular, estas estructuras pueden ser instaladas con rapidez, lo que resulta beneficioso en proyectos que requieren respuestas inmediatas a problemas de erosión. Al mismo tiempo, la prefabricación permite un control de calidad más riguroso (Srineash & Murali, 2019a).

Las estructuras modulares no solo ofrecen protección contra la erosión, sino que también pueden integrarse al paisaje de manera armoniosa, minimizando su impacto visual. Además, algunas de estas estructuras pueden diseñarse para crear hábitats para especies marinas, fomentando la biodiversidad y mejorando la salud del ecosistema costero. Algunos ejemplos de aplicación son:

- Barreras modulares rompeolas: Estas estructuras se colocan paralelas a la costa y funcionan reduciendo la energía de las olas antes de que lleguen a la playa, lo que mitiga la erosión y permite la regeneración natural de la arena.
- Estructuras de estabilización de dunas: En áreas donde las dunas están deterioradas, los módulos de materiales avanzados pueden ser utilizados para reforzar y estabilizar las dunas existentes, en combinación con la plantación de vegetación autóctona.

4.2.1.3. Rehabilitación de dunas con vegetación autóctona.

La rehabilitación de dunas con vegetación autóctona es una estrategia efectiva y sostenible para mitigar la erosión costera, proteger la línea de costa, y restaurar ecosistemas naturales degradados. Las dunas costeras son formaciones de arena que actúan como barreras naturales frente al oleaje y las tormentas, absorbiendo y dispersando la energía del agua y protegiendo las áreas interiores de inundaciones. Sin embargo, las dunas están constantemente amenazadas por la erosión debido a la acción del viento, las olas y la actividad humana. Rehabilitarlas mediante la plantación de vegetación nativa ayuda a estabilizar el terreno y a preservar su función protectora (Van de Graaff & Koster, 1990; Woods et al., 2023).

La rehabilitación de dunas con vegetación autóctona implica restaurar o fortalecer las dunas costeras degradadas mediante la reintroducción de plantas nativas que desempeñan un

papel clave en la estabilización de estas formaciones (Figura 31). Estas plantas, adaptadas a las condiciones locales, contribuyen a (Hanley et al., 2014):

- Estabilizar el suelo: Las raíces de las plantas autóctonas forman una malla natural que ayuda a fijar la arena, previniendo la erosión causada por el viento y las olas.
- Aumentar la resistencia de las dunas: Las plantas ralentizan el movimiento del viento sobre la superficie de la duna, disminuyendo la cantidad de arena arrastrada y promoviendo la acumulación de más arena en las dunas.
- Mejorar el hábitat: La vegetación autóctona favorece la biodiversidad, creando un entorno adecuado para la fauna local, incluidos insectos, aves y pequeños mamíferos.

Figura 31

Dunas estabilizadas con vegetación autóctona de la zona



Nota. Imagen tomada por autor, 2024.

El proceso comienza con un análisis detallado de las dunas costeras existentes, identificando las áreas más erosionadas y los factores que están contribuyendo a la degradación. Esto incluye el estudio de la dinámica del viento, el oleaje, y las actividades humanas (construcciones, turismo, entre otros). Para asegurar el éxito de la rehabilitación, es crucial elegir especies de plantas nativas que estén adaptadas a las condiciones locales, como la salinidad, el clima, y la exposición al viento. Ejemplos de estas especies en dunas costeras suelen incluir gramíneas, arbustos resistentes a la sal, y plantas de bajo crecimiento que soporten la exposición constante a la brisa marina (Hanley et al., 2014).

En algunas situaciones, es necesario realizar ajustes en el terreno, como la nivelación parcial o el uso de geotextiles o biomallas para estabilizar temporalmente la arena antes de plantar. Estos materiales biodegradables ayudan a mantener la estructura de la duna mientras las plantas echan raíces.

La plantación de vegetación se realiza siguiendo patrones específicos, teniendo en cuenta la inclinación de la duna, la proximidad al mar y la capacidad de las plantas para propagarse. En ocasiones, las plantas se siembran directamente, y en otros casos se usan esquejes o plántulas desarrolladas en viveros. Una vez completada la plantación, es fundamental monitorear el crecimiento de la vegetación y la estabilidad de las dunas, especialmente durante las primeras

etapas. El riego inicial puede ser necesario para asegurar la supervivencia de las plantas en climas secos, y se deben aplicar medidas de protección contra el pisoteo humano o el acceso de vehículos.

Las dunas estabilizadas con vegetación nativa actúan como barreras naturales, reduciendo significativamente la cantidad de arena que se pierde debido al viento o las mareas. Las raíces de las plantas proporcionan anclaje al suelo y evitan el movimiento de la arena. Las dunas con vegetación actúan como amortiguadores naturales durante las tormentas, disipando la energía de las olas y protegiendo la infraestructura costera y los asentamientos humanos que se encuentran tierra adentro. Las dunas rehabilitadas pueden reducir el riesgo de inundaciones y daños a propiedades cercanas (Van de Graaff & Koster, 1990).

El uso de plantas autóctonas favorece la creación de un hábitat adecuado para la fauna local, fomentando la biodiversidad y promoviendo la conservación del ecosistema costero. Las dunas rehabilitadas se convierten en zonas claves para la reproducción de especies animales y para la migración de aves costeras. A medida que el cambio climático aumenta el nivel del mar y genera tormentas más frecuentes e intensas, la rehabilitación de dunas con vegetación nativa proporciona una solución adaptativa y resiliente frente a estos desafíos. Al reforzar las dunas, se protege la costa de manera más efectiva a largo plazo.

Comparado con las soluciones estructurales como muros de contención o espolones, la rehabilitación de dunas con plantas autóctonas es una solución relativamente económica. Una vez que las plantas han crecido y estabilizado las dunas, requieren poco mantenimiento en comparación con las infraestructuras construidas. Además, al ser una opción natural, su integración en el paisaje es estéticamente agradable y compatible con la conservación ambiental.

Aunque la rehabilitación de dunas con vegetación autóctona es una solución efectiva y sostenible, presenta algunos desafíos que deben ser gestionados (Hanley et al., 2014):

- Acceso limitado y presión humana: Las dunas son a menudo vulnerables al tráfico peatonal y vehicular, lo que puede destruir la vegetación y acelerar la erosión. Por ello, es esencial implementar medidas como la delimitación de áreas protegidas y la educación ambiental para garantizar que las personas respeten estos espacios.
- Condiciones climáticas adversas: En algunas regiones, las condiciones climáticas extremas como sequías prolongadas o tormentas intensas pueden dificultar el crecimiento de la vegetación. En estos casos, se requieren técnicas de manejo adaptativas y una mayor inversión en mantenimiento inicial.
- Invasión de especies exóticas: En ocasiones, plantas no autóctonas pueden invadir las áreas rehabilitadas y competir con las especies nativas, lo que afecta la efectividad de la restauración. Por lo tanto, es importante realizar un monitoreo constante para controlar estas especies invasoras.

4.2.1.4. Creación de zonas húmedas o marismas artificiales.

La creación de zonas húmedas o marismas artificiales es una alternativa constructiva sostenible que se utiliza para mitigar los efectos negativos de la erosión costera, mejorar la calidad del agua, y restaurar la biodiversidad en áreas costeras degradadas. Las marismas artificiales, también conocidas como humedales construidos, imitan las funciones ecológicas de los humedales naturales, sirviendo como barreras protectoras frente a la erosión y como sistemas de filtración naturales que absorben sedimentos y contaminantes. Este enfoque es especialmente relevante en zonas costeras, donde la erosión, las inundaciones y la pérdida de hábitats amenazan tanto a las comunidades locales como a los ecosistemas costeros (Chen et al., 2024; Dumax & Rozan, 2021).

La creación de zonas húmedas o marismas artificiales implica la construcción o rehabilitación de áreas bajas costeras con el objetivo de que funcionen como ecosistemas similares a las marismas o humedales naturales. Estos sistemas están diseñados para desempeñar varias funciones importantes:

- Protección costera: Las marismas artificiales actúan como amortiguadores naturales, absorbiendo la energía de las olas y reduciendo la velocidad del agua, lo que minimiza el impacto de la erosión y las inundaciones en las áreas costeras.

- Filtración de agua: Estas zonas también funcionan como filtros naturales, ya que capturan y retienen sedimentos, nutrientes y contaminantes que llegan desde el mar o el interior, mejorando la calidad del agua en el entorno costero.
- Conservación de la biodiversidad: Los humedales artificiales son hábitats importantes para una amplia gama de especies, incluidas aves migratorias, peces y otras formas de vida acuática, lo que contribuye a la restauración de la biodiversidad en áreas degradadas.
- Las marismas capturan y almacenan dióxido de carbono, actuando como sumideros de carbono y contribuyendo a la mitigación del cambio climático.

El proceso para crear marismas artificiales o zonas húmedas se divide en varias fases clave:

1. Selección del sitio: Se eligen áreas costeras vulnerables a la erosión o degradadas por la intervención humana, que sean adecuadas para la creación de marismas artificiales. El terreno debe ser lo suficientemente bajo y propenso a inundarse periódicamente con agua de mareas o de escorrentía.
2. Diseño del ecosistema: Se lleva a cabo un diseño cuidadoso del sistema, imitando los patrones y procesos de los humedales naturales. Esto incluye la creación de canales, lagunas y otras formaciones que permitan la entrada y salida de agua, fomentando el intercambio de agua salada y dulce, y promoviendo la sedimentación natural.

3. Selección de vegetación: Se eligen especies vegetales específicas para las marismas, que incluyan plantas tolerantes al agua salada y capaces de prosperar en condiciones de inundación periódica. Estas plantas, como juncos, espartinas y manglares, ayudan a estabilizar el suelo, captar sedimentos, y proporcionar hábitat a la fauna local.
4. Construcción y modelado del terreno: El terreno se modifica para replicar las características físicas de los humedales naturales. Esto incluye la excavación de canales y la creación de áreas inundables que pueden captar y retener agua durante las mareas altas o lluvias intensas. Además, se pueden utilizar geotextiles y otras estructuras de ingeniería para estabilizar el terreno durante las primeras etapas.
5. Monitoreo y mantenimiento: Una vez creada la marisma artificial, se lleva a cabo un monitoreo continuo para asegurar que el sistema funcione de manera efectiva. Se evalúa la calidad del agua, el crecimiento de la vegetación y la estabilidad de los suelos, haciendo ajustes si es necesario para optimizar su funcionamiento.

Las marismas artificiales absorben la energía de las olas, reduciendo el impacto sobre la línea de costa y minimizando la erosión. Esto es especialmente importante en áreas costeras vulnerables, donde las tormentas y el aumento del nivel del mar han incrementado la pérdida de suelo y la degradación de los hábitats naturales. Adicionalmente, durante tormentas o marejadas ciclónicas, las marismas actúan como una barrera natural que ayuda a reducir la fuerza del agua que llega a la costa. Estas zonas húmedas pueden retener grandes volúmenes de agua, disminuyendo la probabilidad de inundaciones en áreas urbanas cercanas (Chen et al., 2024).

Las plantas que habitan en las marismas ayudan a capturar sedimentos y contaminantes, mejorando la calidad del agua al reducir la carga de sedimentos que puede afectar los arrecifes de coral y otros ecosistemas marinos. Además, estas zonas actúan como sistemas de filtración natural, eliminando contaminantes como metales pesados y nutrientes excesivos que pueden provocar eutrofización. Asi mismo, los humedales artificiales proporcionan un hábitat crucial para muchas especies, incluidas aves migratorias, peces y anfibios. Estos ecosistemas restaurados son esenciales para la conservación de la vida silvestre y fomentan la diversidad biológica en las áreas costeras.

Al igual que los humedales naturales, las marismas artificiales pueden actuar como sumideros de carbono, capturando dióxido de carbono de la atmósfera y ayudando a mitigar el cambio climático. Esta capacidad de secuestro de carbono convierte a los humedales en una solución de adaptación climática y protección costera. Si bien las marismas artificiales ofrecen numerosos beneficios, también presentan desafíos que deben ser abordados:

- Adaptación a condiciones locales: El éxito de una marisma artificial depende de su adaptación a las condiciones locales, como las mareas, la salinidad, y las características del suelo. Un diseño que no tenga en cuenta estas variables puede resultar en un sistema ineficaz.
- Mantenimiento: Aunque los humedales naturales requieren poco mantenimiento, las marismas artificiales pueden necesitar intervenciones periódicas, como la

replantación de vegetación o la corrección de problemas de erosión que puedan surgir en los primeros años.

- Compatibilidad con las infraestructuras existentes: La implementación de marismas artificiales en áreas urbanizadas puede ser compleja debido a la presencia de infraestructuras costeras que pueden interferir con la dinámica del sistema natural. En estos casos, es necesario un diseño cuidadoso para integrar las marismas sin afectar negativamente a las infraestructuras existentes.
- Costos iniciales: La construcción de marismas artificiales puede implicar costos iniciales significativos, especialmente en términos de preparación del terreno y plantación de vegetación. Sin embargo, a largo plazo, los beneficios superan estos costos al reducir la necesidad de infraestructuras costosas de protección costera y mejorar la resiliencia del ecosistema.

4.2.2. Análisis de vulnerabilidad

La evaluación de la vulnerabilidad costera ha sido un tema ampliamente discutido en la geología ambiental, con un creciente enfoque en la capacidad de los sistemas costeros para responder a diversas amenazas naturales, como la erosión costera y el aumento del nivel del mar. A lo largo del tiempo, se han desarrollado numerosas metodologías para analizar esta vulnerabilidad, desde enfoques tradicionales, como la Regla de Bruun (Bruun et al., 1962), hasta métodos más sofisticados que consideran tanto factores físicos como no físicos, teniendo en cuenta las incertidumbres inherentes en estos procesos.

En el análisis de la vulnerabilidad costera para el caso de estudio en Salgar, Atlántico, se aplicaron dos enfoques complementarios: un enfoque semi-cuantitativo, basado en la evaluación subjetiva de indicadores geomorfológicos y ambientales, y un enfoque cuantitativo, que pondera la relevancia de factores tanto físicos como sociales. Los índices de vulnerabilidad y riesgo propuestos en investigaciones anteriores (Málvarez et al., 2000; McLaughlin et al., 2002) fueron adaptados para clasificar las áreas costeras según su capacidad de respuesta ante amenazas como la erosión, que afectan tanto las infraestructuras turísticas como los ecosistemas costeros.

El análisis incluyó la identificación de las amenazas vinculadas a los procesos de erosión costera y el incremento del nivel del mar, evaluando la vulnerabilidad de la zona en función de la probabilidad de eventos extremos y el impacto proyectado sobre la infraestructura y el entorno natural. El riesgo se definió como la combinación entre la amenaza y la vulnerabilidad, lo que permitió identificar áreas de mayor criticidad. Sobre esta base, se propusieron acciones de mitigación y adaptación, enfocadas en proteger tanto los activos socioeconómicos como los ecosistemas costeros, abordando la necesidad de medidas de gestión integral para enfrentar los impactos del cambio climático en la costa.

Este enfoque integral proporciona una base sólida para la planificación de medidas preventivas y correctivas en las zonas costeras, promoviendo soluciones que favorezcan tanto la resiliencia de las infraestructuras como la conservación de los ecosistemas marinos y terrestres.

4.2.2.1. Desarrollo y cálculo de índices

Los índices que combinan y clasifican diversas variables en una sola medida son un método comúnmente utilizado para evaluar la amenaza, vulnerabilidad y riesgo, como lo señalan Del Río y García (2009) y Santos et al. (2013).

Para la metodología de evaluación de vulnerabilidad costera en las playas de Salgar, se elaboraron las siguientes tablas que detallan los distintos índices de amenaza, vulnerabilidad social, económica y de conservación. Estas tablas sirven como una herramienta integral para clasificar la vulnerabilidad de las zonas costeras, basándose en diversos factores geomorfológicos, sociales, económicos y ecológicos. A continuación, se presenta el desglose de cada índice con sus correspondientes variables, rangos y factores asociados.

Índice de Amenaza: Este índice evalúa la amenaza por erosión costera de la zona costera en función de variables críticas como la geomorfología, los cambios en la línea de costa y el aumento del nivel del mar. Los valores se categorizan desde muy bajo (1) hasta muy alto (5), y se aplica un factor de ponderación para cada variable.

Tabla 7

Valoración del índice de amenaza de erosión costera

		Ranking					
N	**Variable**	**Muy bajo (1)**	**Bajo (2)**	**Moderado (3)**	**Alto (4)**	**Muy alto (5)**	**Factor**
1	Geomorfología	Playa amplia con alta estabilidad	Playa moderadamente estable	Playa con erosión moderada	Playa con erosión significativa	Playa altamente erosionada	1
2	Cambios en la línea de costa	Sin cambios o cambios mínimos (<0.5 m/año)	Cambios menores (0.5 - 1 m/año)	Cambios moderados (1 - 2 m/año)	Cambios significativos (2 - 3 m/año)	Cambios muy altos (>3 m/año)	1
3	Aumento del nivel del mar	Incremento insignificante (<1 mm/año)	Aumento bajo (1-2 mm/año)	Aumento moderado (2-3 mm/año)	Aumento significativo (3-4 mm/año)	Aumento extremo (>4 mm/año)	0.8

Nota. Valores de referencia tomados de Del Río y García (2009) y Santos et al. (2013).

Índice de Vulnerabilidad Social: Este índice considera la vulnerabilidad de la población y el uso del suelo en la zona costera. Factores como los usos del suelo y la densidad poblacional juegan un papel fundamental en la evaluación.

Tabla 8

Valoración del índice de vulnerabilidad social

		Ranking					
N	**Variable**	**Muy bajo (1)**	**Bajo (2)**	**Moderado (3)**	**Alto (4)**	**Muy alto (5)**	**Factor**
4	Usos de suelo	Arbusto y Matorrales	Mosaico Pastos Pastos Arbolados Pastos Enmalezados Pastos Limpios	Bosque de Mangle Marismas Costeras Lagunas - Lagos Zonas Pantanosas Bosque de Galería	Estanques Agricultura Mosaico Cultivos Pastos Cultivos	Instalaciones Recreativas Aeropuertos Zonas Industriales - Comerciales Tejido Urbano Zonas de Extracción Minera	1
5	Índice K – Estructuras (relación entre línea de costa construida y línea de costa natural)	No estructuras (K=0)	Mínimo (k= 0.0001-0.1)	Promedio (K= 0.11-0.5)	Máximo (K=0.51-1)	Extremo (K mayor de 1)	1
6	Porcentaje de área desarrollada	Desarrollo menor del 20%	Desarrollo entre 20-40%	Desarrollo entre 40-60%	Desarrollo entre 60-80%	Desarrollo mayor al 80%	1
7	Infraestructura de Servicios	Desarrollo menor del 20%	Desarrollo entre 20-40%	Desarrollo entre 40-60%	Desarrollo entre 60-80%	Desarrollo mayor al 80%	1

Nota. Valores de referencia tomados de Del Río y García (2009) y Santos et al. (2013).

Índice de Vulnerabilidad Económica: Este índice se enfoca en la densidad poblacional de la zona costera y su relación con los impactos económicos potenciales.

Tabla 9

Valoración del índice vulnerabilidad económica

		Ranking					
N	**Variable**	**Muy bajo (1)**	**Bajo (2)**	**Moderado (3)**	**Alto (4)**	**Muy alto (5)**	**Factor**
8	Población	Densidad poblacional menor de 20 hab/km2	Densidad poblacional entre 20-50 hab/km2	Densidad poblacional entre 50-80 hab/km2	Densidad poblacional entre 80-170 hab/km2	Densidad poblacional mayor a 170 hab/km2	1

Nota. Valores de referencia tomados de Del Río y García (2009) y Santos et al. (2013).

Índice de Vulnerabilidad de Conservación: Este índice evalúa la importancia de los ecosistemas en la zona costera y la intervención humana en ellos.

Tabla 10

Valoración del índice de vulnerabilidad de conservación

		Ranking					
N	**Variable**	**Muy bajo (1)**	**Bajo (2)**	**Moderado (3)**	**Alto (4)**	**Muy alto (5)**	**Factor**
9	Sitios prioritarios	Área Excluida		Sitio Prioritario de Conservación		Área Conservada	1
10	Cobertura de ecosistemas y hábitats	Áreas sin vegetación		Arbustos, rastrojo, Litoral rocoso, herbazales.		Ecosistemas estratégicos: marismas, pastos marinos, arrecifes de coral, playas, lagunas asociadas a la pesca	1
11	Nivel de intervención de los ecosistemas	Alta intervención		Media intervención		Baja intervención	1
12	Zonificación de áreas protegidas	Áreas de uso sostenible		Áreas de recuperación de parques y de amortiguamiento		Áreas intangibles	0.8

Nota. Valores de referencia tomados de Del Río y García (2009) y Santos et al. (2013).

Las variables utilizadas fueron analizadas y clasificadas a partir de dos fuentes principales:

i) los datos obtenidos a través del análisis y modelación de la zona de estudio, y

ii) la validación y recopilación de nueva información durante las salidas de campo.

Después de esta clasificación, se decidió aplicar una ponderación a las variables utilizando el método de Gornitz et al. (1994), con el fin de evitar la subestimación de las variables más significativas a nivel local y la sobreestimación de las menos relevantes. Para ello, se asignaron factores de corrección entre 1 y 0.8, según la importancia relativa de cada variable en la determinación de la vulnerabilidad y el riesgo. De este modo, las variables se categorizaron en dos tipos, con sus respectivos factores de ponderación.

La vulnerabilidad absoluta de cada área se calculó sumando los valores ponderados de cada variable utilizando la fórmula:

$$V_{abs} = \sum a_n f_n$$

Donde:

V_{abs} = Vulnerabilidad absoluta

a_n = Valoración del índice de vulnerabilidad

f_n = Factor de corrección

Posteriormente, los resultados fueron normalizados para obtener un índice de vulnerabilidad relativa (Vr) más realista, utilizando las siguientes ecuaciones:

$$MaxRangoV_{abs} = Max\ V_{abs} - Min\ V_{abs}$$

$$V_r = \frac{V_{abs} - Min\ V_{abs}}{Max\ Rango\ V_{abs}} * 100$$

Donde:

$MaxRangoV_{abs}$ = Diferencia entre el rango superior e inferior de la vulnerabilidad absoluta

$Max\ V_{abs}$ = Valoración máxima posible de la vulnerabilidad absoluta

$Min\ V_{abs}$ = Valoración mínima posible de la vulnerabilidad absoluta

V_r = Vulnerabilidad relativa

Para la valoración del riesgo y la vulnerabilidad en el estudio, se implementó un sistema de clasificación que asigna tanto un valor numérico como una codificación por color para facilitar la interpretación de los resultados.

El índice de riesgo y vulnerabilidad se distribuyó en cinco categorías, que van desde Muy Bajo hasta Muy Alto, con los siguientes valores numéricos asignados:

Tabla 11

Escala de valoración de los índices de vulnerabilidad y amenaza

Índice	Valoración
Muy Bajo	1
Bajo	2
Moderado	3
Alto	4
Muy Alto	5

Nota. Valores de referencia tomados de Del Río y García (2009) y Santos et al. (2013).

Adicionalmente, se estableció una escala de riesgo relativo en función del porcentaje de la vulnerabilidad relativa (Vr), lo que permitió una evaluación más precisa del nivel de riesgo. Los rangos se asignaron de la siguiente manera:

Tabla 12

Escala de valoración de los índices de vulnerabilidad y amenaza

Riesgo relativo	Porcentaje
Muy Bajo	0-20
Bajo	20-40
Moderado	40-60
Alto	60-80
Muy Alto	>80

Nota. Valores de referencia tomados de Del Río y García (2009) y Santos et al. (2013).

El análisis de vulnerabilidad se llevó a cabo para las cinco playas analizadas. A continuación, se presentan los resultados para cada playa:

Tabla 13

Análisis de vulnerabilidad para las cinco playas analizadas

	Índice de Amenaza			**Vulnerabilidad Social**				**Vulnerabilidad Económica**	**Vulnerabilidad de Conservación**				**Riesgo Relativo**
No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
S1	1	2	1	5	3	2	2	3	5	5	3	1	45
S2	3	3	3	5	5	5	4	4	3	5	1	1	64
S3	5	5	3	5	5	5	4	4	3	5	1	1	72
S4	4	5	2	5	3	3	3	4	3	5	1	1	58
S5	1	2	1	5	3	3	3	4	3	5	1	1	43

Nota. Valores de referencia tomados de Del Río y García (2009) y Santos et al. (2013).

A partir de los resultados se observa que la Playa S1, presenta una vulnerabilidad relativa de 45, clasificada como Moderada. Los factores más altos son la vulnerabilidad de conservación y el uso de la playa, mientras que la vulnerabilidad económica es baja. Para el caso de la playa S2 la vulnerabilidad relativa de 64, está clasificada como Alta. Se destacan niveles altos en la mayoría de los factores, especialmente en las variables relacionadas con la amenaza y la vulnerabilidad social.

Adicionalmente, la playa S3 es la playa con mayor vulnerabilidad, con un índice relativo de 72, lo que la clasifica como Alta. Aquí, tanto la amenaza como las vulnerabilidades social y económica presentan los valores más elevados. En el caso de la playa S4, esta tiene una vulnerabilidad relativa de 58, clasificada como Moderada, los niveles de amenaza y vulnerabilidad social son significativos, mientras que la vulnerabilidad económica es más moderada. Finalmente, la playa S5, posee una vulnerabilidad relativa de 43, clasificada como Moderada, esta playa muestra vulnerabilidades relativamente bajas en comparación con las demás, destacándose únicamente en las áreas de conservación.

4.2.3. Matriz de selección para las alternativas propuestas

Para seleccionar las mejores alternativas constructivas sostenibles que mitiguen los impactos de la erosión costera en Salgar, es necesario desarrollar una matriz de selección. Esta matriz evalúa varias alternativas según criterios relevantes relacionados con las características de la playa, las necesidades de conservación, la sostenibilidad y la adaptabilidad de las infraestructuras.

Los criterios de evaluación correspondieron a:

- Eficiencia en la mitigación de la erosión: Capacidad de la alternativa para reducir la erosión costera.

- Sostenibilidad del material: Uso de materiales con baja huella ecológica y alta durabilidad.
- Adaptabilidad al cambio climático: Capacidad de la infraestructura para adaptarse a condiciones cambiantes como el aumento del nivel del mar.
- Impacto ambiental positivo: Efecto de la alternativa sobre los ecosistemas marinos y costeros.
- Facilidad de mantenimiento: Requerimientos de mantenimiento a corto y largo plazo.
- Compatibilidad con infraestructura existente: Capacidad de la infraestructura de acoplarse con las estructuras existentes.
- Durabilidad y adaptabilidad a largo plazo: Resistencia de la infraestructura en el tiempo frente a condiciones climáticas adversas.

Las alternativas evaluadas son:

- Revegetación y plantación en los espolones mediante geotextiles
- Estructuras modulares con materiales avanzados
- Rehabilitación de dunas con vegetación autóctona
- Creación de zonas húmedas o marismas artificiales

En la tabla 14, se muestra el resultado de la matriz de evaluación, se han definido tres niveles cualitativos (Alto, Moderado y Bajo) para definir el grado de satisfacción de cada

alternativa respecto a los criterios de selección, asi mismo la asignación de estos niveles se basa en la revisión de autores como (Baker et al., 2022; Bergin & Kimberley, 2019; Bessette et al., 2018; dos Santos et al., 2024; Dunlap & White, 2008; Lieberthal et al., 2024; Ma et al., 2024; Srineash & Murali, 2019b; Toledo et al., 2024; Wang et al., 2023), los cuales han desarrollado investigaciones en las cuales se emplearon estas alternativas:

Tabla 14

Evaluación de alternativas

Criterios de Selección	Revegetación y plantación en los espolones mediante geotextiles	Estructuras modulares con materiales avanzados	Rehabilitación de dunas con vegetación autóctona	Creación de zonas húmedas o marismas artificiales
Eficiencia en la mitigación de la erosión	Moderado	Alto	Alto	Alto
Sostenibilidad del material	Alto	Moderado	Alto	Alto
Adaptabilidad al cambio climático	Moderado	Alto	Alto	Alto
Impacto ambiental positivo	Alto	Moderado	Alto	Alto
Facilidad de mantenimiento	Moderado	Alto	Bajo	Moderado
Compatibilidad con infraestructura existente	Alto	Bajo	Moderado	Alto
Durabilidad y adaptabilidad a largo plazo	Moderado	Alto	Moderado	Alto

Nota. Valores de referencia tomados de Del Río y García (2009) y Santos et al. (2013).

La creación de zonas húmedas o marismas artificiales se presenta como la alternativa más efectiva a largo plazo para mitigar la erosión costera en Salgar, especialmente por su capacidad de generar un impacto ambiental positivo y ofrecer una alta resiliencia frente a las condiciones climáticas cambiantes. Esta alternativa no solo reduce la erosión mediante la absorción del

impacto de las olas, sino que también contribuye significativamente a la biodiversidad del área, funcionando como un amortiguador natural que retiene sedimentos y protege la línea costera.

Además, es importante destacar que, previo a la construcción de los espolones en la zona, ya existían humedales naturales que desempeñaban un papel crucial en la protección del ecosistema costero. La restauración o creación de nuevas áreas de humedales permitiría no solo recuperar parte de esa función ecológica perdida, sino también mejorar las condiciones ambientales del entorno. Estos humedales artificiales pueden actuar como zonas de amortiguación naturales que mitigan los efectos del oleaje y la sedimentación, ayudando a recuperar y estabilizar el litoral.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que las alternativas basadas en la revegetación de los espolones mediante geotextiles y la rehabilitación de dunas con vegetación autóctona también ofrecen beneficios significativos en la mitigación de la erosión y son viables dependiendo de las características específicas de cada playa. La revegetación de los espolones no solo estabiliza el suelo, sino que también mejora la estética del lugar y contribuye a la protección del hábitat de la fauna local. Por su parte, la rehabilitación de dunas con plantas autóctonas fortalece la defensa natural de la costa al incrementar la capacidad de las dunas para actuar como barreras ante el avance del mar.

Finalmente, aunque la creación de zonas húmedas o marismas artificiales es la solución más integral y efectiva a largo plazo, las alternativas más naturales, como la revegetación de los espolones y la rehabilitación de dunas, podrían complementarse con la solución principal, generando un enfoque multidimensional que permita una adaptación sostenible y eficaz de las infraestructuras costeras a los cambios ambientales futuros. Cada una de estas soluciones debe ser evaluada en función de las características específicas de cada área, las necesidades de conservación y el presupuesto disponible para su implementación.

4.3. Establecer las características y especificaciones técnicas detalladas para la implementación de las alternativas constructivas propuestas.

4.3.1. Alternativa 1: Revegetación y plantación en los espolones mediante geotextiles.

Esta alternativa consiste en la estabilización de los espolones costeros mediante la revegetación con especies vegetales autóctonas y la instalación de geotextiles biodegradables. El objetivo es reducir la erosión costera utilizando una combinación de ingeniería natural y geotextiles, los cuales proporcionan una barrera temporal que protege los sedimentos mientras la vegetación arraiga y fortalece la estructura del espolón a largo plazo.

La revegetación ayuda a estabilizar el suelo, mejorar la retención de sedimentos y fomentar un ecosistema más resiliente. A medida que las plantas crecen y sus raíces se

desarrollan, se incrementa la cohesión del terreno, lo que minimiza la pérdida de material por acción del oleaje y los vientos, ofreciendo una solución ecológica y duradera para mitigar la erosión costera.

4.3.1.1. Especificaciones técnicas.

Descripción: Esta actividad consiste en la instalación de geotextiles biodegradables sobre los espolones costeros, seguida de la plantación de especies vegetales autóctonas adaptadas a las condiciones costeras. Los geotextiles se despliegan y anclan al terreno para proteger el suelo y los sedimentos de la erosión durante las fases iniciales de la revegetación. Se seleccionan plantas nativas con raíces profundas que favorecen la estabilización del terreno y mejoran la cohesión de los sedimentos. La combinación de ambos elementos permite la restauración natural de la zona, al tiempo que ofrece una solución sostenible para la protección del espolón y la reducción de la erosión costera.

Durante la primera fase, se preparará el terreno y se nivelarán los espolones. Luego, los geotextiles se instalan y aseguran, tras lo cual se realizan perforaciones para la plantación de vegetación. Finalmente, se establecen protocolos de monitoreo y mantenimiento para garantizar el crecimiento exitoso de la vegetación y la integridad de los geotextiles hasta que se descompongan naturalmente.

MATERIALES:

1. **Geotextiles biodegradables:**

- **Especificación:** Se utilizan geotextiles fabricados con fibras naturales como el coco o yute, que son biodegradables y compatibles con el clima tropical del Caribe colombiano. Estos materiales proporcionan una barrera inicial contra la erosión mientras permiten el paso del agua y facilitan la germinación de plantas.
- **Cantidad:** Aproximadamente 1,000 m² de geotextil por espolón (dependiendo del tamaño del área a cubrir) (Dunlap & White, 2008).

2. **Estacas de madera biodegradable:**

- **Especificación:** Estacas de madera de bambú o especies locales biodegradables, de 30 a 50 cm de largo. Se emplea con el fin de fijar el geotextil al suelo y evitar su desplazamiento debido al viento o el oleaje.
- **Cantidad:** 1 estaca por metro cuadrado, asegurando una fijación cada metro a lo largo del geotextil.

3. **Especies vegetales autóctonas:**

- **Especificación:** Plantas costeras nativas del Caribe colombiano, adaptadas a suelos arenosos y condiciones salinas. Se emplean con el fin de estabilizar el suelo a largo plazo mediante el desarrollo de un sistema radicular profundo, que mejorará la cohesión del terreno y reducirá la erosión. Las especies recomendadas incluyen:
- ***Spartina alterniflora*:** Conocida por su resistencia a la salinidad y capacidad para retener sedimentos.

Figura 32

Spartina alterniflora



Nota. (Muhammad et al., 2024)

- ***Ipomoea pes-caprae* (Bejuco de playa):** Una planta rastrera que crece rápidamente, ideal para estabilizar dunas y espolones.

Figura 33

Ipomoea pes-caprae



Nota. (Dussan-Arquez & Rodríguez-Rodríguez, 2022)

- ***Mimosa pigra*:** Un arbusto de raíces profundas que ayuda a fortalecer la estructura del suelo.

Figura 34

Mimosa pigra



Nota. (Odériz et al., 2020)

- **Cantidad:** De 4 a 5 plantas por metro cuadrado (densidad óptima para una buena cobertura y retención de sedimentos).

4. **Sustrato para revegetación (opcional):**

- **Especificación:** Sustrato enriquecido con materia orgánica, compuesto por tierra vegetal y abono orgánico. Empleado para mejorar las condiciones de arraigo de las plantas en los primeros meses.

- **Cantidad:** Dependiendo de la calidad del suelo existente, se puede aplicar una capa de 5-10 cm en las zonas donde se plantará.

5. **Mantillo orgánico (opcional):**

- **Especificación:** Capa protectora de paja o fibras vegetales locales (hojas de palma seca) para cubrir el geotextil y mejorar la retención de humedad. Permite mantener la humedad del suelo y proteger las raíces jóvenes de las plantas, facilitando su arraigo y crecimiento inicial.
- **Cantidad:** Capa de 3-5 cm de espesor sobre el área revegetada.

6. **Herramientas de plantación:**

- **Especificación:** Herramientas manuales básicas para realizar perforaciones en el geotextil y facilitar la siembra, como palas pequeñas, azadones y horquillas. Empleadas para facilitar el proceso de siembra y asegurar una instalación adecuada de las plantas en el geotextil.
- **Cantidad:** Suficientes para el personal involucrado en la revegetación (mínimo 1 herramienta por persona).

7. **Riego temporal (en caso de estación seca):**

- **Especificación:** Sistema de riego por goteo o manual utilizando mangueras de baja presión. Permite asegurar que las plantas recién instaladas reciban agua suficiente durante las primeras etapas de arraigo, especialmente en temporadas de sequía.
- **Cantidad:** Dependiendo del área, se puede instalar un sistema temporal o se asignarán operarios para el riego manual.

8. **Materiales para señalización y protección de la zona:**

- **Especificación:** Cintas de señalización, estacas de madera y vallas temporales. Se emplea para proteger las áreas revegetadas y evitar el tránsito humano o vehicular que pueda dañar las plantas o el geotextil.
- **Cantidad:** Dependiendo de la extensión del proyecto, se distribuirán estratégicamente alrededor de la zona de trabajo.

EJECUCIÓN:

Etapa 1: Preparación del Terreno

- **Descripción:** Antes de la instalación de los geotextiles y la revegetación, se realiza una limpieza y nivelación del terreno. Se eliminan escombros, piedras sueltas y vegetación no deseada que pueda interferir con el proceso de instalación.

- **Actividades:**
    - Retiro manual de residuos sólidos y maleza.
    - Nivelación del terreno en los espolones para asegurar una superficie uniforme.
    - Compactación ligera en áreas necesarias para evitar asentamientos futuros.
- **Herramientas:** Palas, azadones, y maquinaria ligera (en caso de ser necesario).

Etapa 2: Instalación de los Geotextiles Biodegradables

- **Descripción:** Una vez preparado el terreno, se procede a instalar los geotextiles biodegradables sobre los espolones. Este material actúa como una barrera temporal que protege los sedimentos mientras las plantas se establecen.
- **Actividades:**
    - Despliegue del geotextil a lo largo del espolón, asegurando que cubra toda el área afectada por la erosión.
    - Solapado de los bordes del geotextil (aproximadamente 20 cm) para garantizar una cobertura continua.

    - Anclaje del geotextil con estacas de madera biodegradable, con una separación de aproximadamente 1 metro entre estacas.

- **Herramientas:** Estacas de madera, martillos, tijeras para cortar geotextil.

Etapa 3: Perforación para la Plantación de Especies Vegetales

- **Descripción:** Se realiza la perforación del geotextil en los puntos designados para la revegetación. Se crean pequeñas aberturas que permiten la plantación de las especies vegetales nativas seleccionadas.
- **Actividades:**
    - Marcar los puntos de plantación según la densidad planificada (4-5 plantas por metro cuadrado).
    - Perforar el geotextil y hacer pequeñas excavaciones en el terreno para plantar las especies vegetales.
- **Herramientas:** Herramientas de mano (palas pequeñas, horquillas) para perforar y plantar.

Etapa 4: Plantación de Especies Vegetales Autóctonas

- **Descripción:** Se procede con la siembra de las plantas autóctonas seleccionadas, que se han elegido por su capacidad de adaptarse a las condiciones costeras del Caribe colombiano.

- **Actividades:**
    - Inserción de las plantas en los puntos previamente perforados.
    - Cubrimiento de las raíces con sustrato si es necesario, asegurando que las plantas queden bien arraigadas.
    - Compactación ligera del terreno alrededor de cada planta para garantizar su estabilidad.
- **Herramientas:** Palas pequeñas, manos protegidas para manipulación de plantas.

Etapa 5: Aplicación de Mantillo Orgánico (Opcional)

- **Descripción:** En caso de que las condiciones climáticas sean secas o haya riesgo de pérdida de humedad, se puede aplicar una capa de mantillo orgánico sobre el geotextil para proteger las raíces y mejorar la retención de agua.
- **Actividades:**
    - Distribuir el mantillo sobre las áreas revegetadas, cubriendo tanto el geotextil como las raíces de las plantas.
    - Asegurar que la capa de mantillo no obstruya la circulación del aire o el paso del agua hacia las raíces.
- **Herramientas:** Palas y carretillas para la distribución del mantillo.

Etapa 6: Monitoreo y Mantenimiento

- **Descripción:** Después de la plantación, se realiza un seguimiento regular para asegurar el correcto crecimiento de las plantas y la integridad del geotextil. Se evaluará el crecimiento de las especies vegetales, su capacidad de retener los sedimentos y su impacto en la reducción de la erosión.
- **Actividades:**
    - Monitoreo de la estabilidad de las plantas y el estado del geotextil.
    - Reposición de plantas en áreas donde no hayan crecido adecuadamente.
    - Mantenimiento del sistema de riego (si es necesario) y del mantillo aplicado.
- **Herramientas:** Herramientas manuales para ajustes y replantación, equipo de monitoreo.
- **Duración estimada:** Monitoreo mensual durante los primeros seis meses.

ACEPTACIÓN DE TRABAJOS

Indicador: Cumplimiento con el Diseño y Especificaciones Técnicas

- **Descripción:** Las obras deben ajustarse al diseño planteado en términos de ubicación, dimensiones, y características especificadas para los espolones y la revegetación. Los materiales, como los geotextiles biodegradables y las especies vegetales, deben cumplir con los estándares de calidad establecidos.

- **Criterio de Aceptación:** El proyecto debe ser inspeccionado para verificar que las dimensiones de las obras y la disposición de los materiales coincidan con los planos de diseño y las especificaciones técnicas.

Indicador: Integridad del Geotextil Biodegradable

- **Descripción:** El geotextil biodegradable debe estar correctamente instalado, cubriendo de manera continua los espolones y adecuadamente fijado con estacas de madera. No deben observarse rupturas, desplazamientos ni faltantes en la cobertura.
- **Criterio de Aceptación:** El geotextil debe estar firmemente anclado, sin evidencias de desplazamiento o deterioro prematuro. La inspección visual debe confirmar una cobertura uniforme en todas las áreas intervenidas.

Indicador: Estabilidad del Terreno y Espolones

- **Descripción:** Los espolones deben presentar una estabilidad adecuada luego de la instalación de los geotextiles y la revegetación. No deben observarse signos de erosión acelerada o movimientos inestables del suelo tras la implementación.
- **Criterio de Aceptación:** Los espolones deben mostrar estabilidad a lo largo de la inspección post-construcción, sin evidencias de desprendimientos de tierra o sedimentos, ni deslizamientos significativos.

Indicador: Establecimiento de la Vegetación

- **Descripción:** Las especies vegetales plantadas deben adaptarse adecuadamente al entorno costero. Deben mostrar signos de crecimiento saludable y arraigo en el suelo dentro de las primeras semanas tras la plantación.
- **Criterio de Aceptación:** Un porcentaje mínimo del 80% de las plantas debe estar arraigado y mostrando un crecimiento saludable al cabo de 2-3 meses después de la instalación. En caso de pérdida significativa de plantas, debe realizarse una replantación para asegurar la cobertura vegetal.

Indicador: Retención y Protección del Suelo

- **Descripción:** El sistema de revegetación debe demostrar su capacidad para retener el suelo y reducir los efectos de la erosión. No debe haber erosión visible o pérdida significativa de sedimentos en las áreas protegidas por los geotextiles y la vegetación.
- **Criterio de Aceptación:** Después de lluvias o marejadas, las inspecciones periódicas deben confirmar que las áreas con geotextil y vegetación no presentan erosión visible o desplazamiento de los sedimentos.

Indicador: Cumplimiento con Normativas Ambientales y de Construcción

- **Descripción:** Las obras deben cumplir con las normativas ambientales locales y los estándares de construcción aplicables en la región del Caribe colombiano. Las técnicas y

materiales utilizados deben ser acordes con las políticas de sostenibilidad y preservación ambiental.

- **Criterio de Aceptación:** El proyecto debe pasar una inspección que verifique el cumplimiento de las normativas vigentes en cuanto a la protección del medio ambiente y la sostenibilidad de los materiales utilizados.

Indicador: Costos y Tiempo de Ejecución Dentro del Presupuesto

- **Descripción:** Las obras deben completarse dentro del plazo y presupuesto establecidos, respetando los recursos asignados y optimizando la mano de obra y los materiales.
- **Criterio de Aceptación:** Los tiempos de ejecución y costos deben ser revisados al final del proyecto, confirmando que no haya sobrecostos ni retrasos significativos en la entrega de las obras.

MEDICIÓN

Los trabajos y obras ejecutadas serán medidos en metros cuadrados (m²) de superficie revegetalizada, la cual deberá ser autorizada y aprobada por el supervisor del proyecto.

4.3.1.2. Detalles y planos.

UNIDAD DE MEDIDA **M2**

DESCRIPCIÓN

Instalación de geotextiles biodegradables en espolones costeros y plantación de especies vegetales autóctonas para estabilización y protección contra la erosión costera.

EJECUCION

- Etapa 1: Preparación del terreno (limpieza, nivelación)
- Etapa 2: Instalación de geotextiles (despliegue, anclaje)
- Etapa 3: Perforación para plantación
- Etapa 4: Plantación de especies vegetales
- Etapa 5: Aplicación de mantillo (opcional)
- Etapa 6: Monitoreo y mantenimiento mensual durante 6 meses

TOLERANCIA DE ACEPTACION

- Diseño y Especificaciones Técnicas: Obras deben cumplir con diseño y especificaciones.
- Integridad del Geotextil: Geotextil debe estar bien anclado y sin desplazamientos.
- Estabilidad de Espolones: No debe haber signos de erosión.
- Establecimiento Vegetal: 80% de las plantas deben estar arraigadas y creciendo después de 2-3 meses.
- Retención del Suelo: Sin erosión ni pérdida de sedimentos.
- Cumplimiento Normativo: Cumplimiento de normativas ambientales y de construcción.
- Costos y Tiempo: Dentro de presupuesto y tiempos establecidos.

EQUIPO

- Herramienta manual
- Señalización
- Equipo de monitoreo

MATERIALES

- Geotextiles biodegradables (1,000 m²/espolón, fibras de coco o yute)
- Estacas de madera biodegradable (1 estaca/m², de bambú o madera local)
- Plantas autóctonas: Spartina alterniflora, Ipomoea pes-caprae, Mimosa

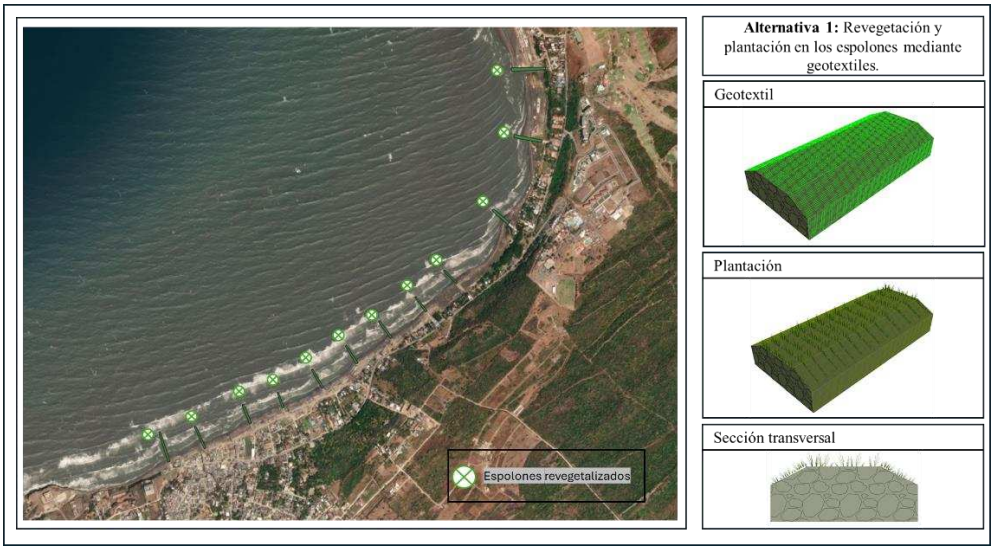
pigra (4-5 plantas/m²)

- Sustrato orgánico opcional
- Mantillo orgánico opcional
- Herramientas manuales
- 7. Riego temporal si es necesario

MEDIDA Y FORMA DE PAGO

La medida de pago serán los metros cúbicos (M2) instalados, de acuerdo con los niveles y dimensiones anotados en los planos o por el Contratante y/o la Interventoría.

DETALLES CONSTRUCTIVOS



4.3.2. Alternativa 2: Estructuras modulares con materiales avanzados.

La alternativa 2 propone la construcción de estructuras modulares empleando materiales avanzados de ingeniería para la protección costera en Salgar, Atlántico. Estas estructuras están diseñadas para actuar como barreras físicas que mitigan los efectos de la erosión costera, reduciendo la energía del oleaje y estabilizando la línea de costa. El uso de módulos

prefabricados permite una instalación rápida, flexible y eficiente, adaptándose a las condiciones específicas del terreno.

Los materiales avanzados incluyen concreto reforzado con fibras, polímeros de alto rendimiento y aleaciones metálicas resistentes a la corrosión, que ofrecen durabilidad y resistencia frente a las condiciones climáticas agresivas del Caribe colombiano. Además, estos materiales son seleccionados por su bajo impacto ambiental, contribuyendo a la sostenibilidad de la solución.

4.3.2.1. Especificaciones técnicas.

Descripción: La actividad consiste en la instalación de estructuras modulares prefabricadas a lo largo de la línea costera de Salgar, Atlántico, para mitigar la erosión y proteger tanto las playas como las infraestructuras existentes. Estas estructuras están fabricadas con materiales avanzados como concreto reforzado con fibras, polímeros de alta resistencia y aleaciones metálicas anticorrosivas, lo que garantiza su durabilidad frente a las condiciones climáticas y marinas del Caribe.

El proceso comienza con la preparación del sitio, que incluye la limpieza y nivelación del terreno costero para asegurar una base adecuada para las estructuras. Posteriormente, se realiza el transporte e instalación de los módulos, los cuales han sido fabricados en plantas fuera del sitio

para minimizar las perturbaciones en el entorno natural. Los módulos se ensamblan in situ, utilizando maquinaria especializada para garantizar su correcta colocación y alineación.

La actividad también incluye el relleno y compactación de material granular alrededor de las estructuras para aumentar su estabilidad y prevenir socavaciones. Finalmente, se realizan inspecciones periódicas para asegurar que las estructuras cumplan con las especificaciones de diseño y que el impacto ambiental sea mínimo.

MATERIALES:

1. **Concreto Reforzado con Fibras**

- Material principal para los módulos prefabricados, diseñado para resistir las condiciones agresivas de la costa caribeña, como la salinidad, la humedad y la abrasión. Este concreto está reforzado con fibras sintéticas o metálicas, lo que le otorga mayor resistencia a la tensión, flexibilidad y durabilidad frente al desgaste provocado por el oleaje.

2. **Geotextiles de Alta Resistencia**

- Se utilizan para estabilizar el terreno bajo los módulos y evitar la erosión del suelo circundante. Los geotextiles permiten el paso del agua, pero retienen las partículas de suelo, ayudando a prevenir la socavación. Estos textiles están diseñados para soportar la exposición continua al agua salada y a la radiación solar.

3. **Polímeros de Alto Rendimiento (FRP - Fiber Reinforced Polymer)**

- Empleados en componentes adicionales de las estructuras modulares, como elementos de anclaje y refuerzos. Los polímeros reforzados con fibra son ligeros, resistentes a la corrosión y tienen una larga vida útil en ambientes marinos, siendo ideales para evitar la degradación provocada por la salinidad y la humedad del Caribe.

4. **Aleaciones Metálicas Resistentes a la Corrosión (Acero Inoxidable y Aluminio Marino)**

- Utilizadas en los elementos estructurales secundarios, como conexiones y anclajes, que deben resistir la exposición prolongada al agua de mar. Estas aleaciones tienen una alta resistencia a la corrosión, reduciendo los costos de mantenimiento y aumentando la vida útil de la estructura.

5. **Piedra Triturada y Material Granular Compactado**

- Material utilizado como relleno alrededor de los módulos para garantizar la estabilidad de las estructuras y prevenir socavaciones. Se selecciona un material granular que permita un buen drenaje y que sea resistente a la acción del oleaje y las mareas.

6. **Selladores Marinos (Poliuretano o Epóxicos de Alta Resistencia)**

- Se aplican en las juntas y uniones de los módulos para asegurar que sean impermeables y resistentes a la infiltración de agua. Estos selladores están formulados para soportar la exposición al agua salada y los cambios de temperatura, garantizando la integridad de las estructuras.

7. **Plantas Costeras Nativas para la Revegetación Complementaria**

- Especies autóctonas que se plantarán alrededor de las estructuras para mejorar la protección del suelo y fomentar la regeneración natural del ecosistema costero. Las plantas seleccionadas serán aquellas con alta tolerancia a la salinidad y la exposición directa al sol, típicas de la región caribeña.

EJECUCIÓN

Etapa 1. Preparación del Sitio

- **Limpieza del área:** Se retiran escombros, vegetación no deseada y otros materiales presentes en el sitio para asegurar una superficie limpia y estable.
- **Nivelación del terreno:** Se realiza la nivelación del terreno donde se instalarán los módulos para garantizar que las estructuras estén correctamente alineadas y asentadas. Esto incluye la posible excavación en áreas que lo requieran para mejorar la estabilidad.

- **Colocación de geotextiles:** Se instalan geotextiles de alta resistencia en la base del área intervenida para evitar la erosión del suelo y estabilizar el terreno, permitiendo el drenaje sin perder partículas de suelo.

Etapa 2. Transporte de Módulos

- Los módulos prefabricados se transportan desde la planta de producción hasta el sitio de la obra utilizando camiones especializados.
- Durante el transporte, se garantiza que las piezas lleguen en condiciones óptimas, con los cuidados necesarios para evitar daños.

Etapa 3. Instalación de los Módulos Prefabricados

- **Colocación de los módulos:** Con la ayuda de grúas y maquinaria especializada, se colocan los módulos sobre la base preparada, siguiendo el diseño establecido en los planos. La alineación y nivelación de cada módulo es clave para asegurar la estabilidad y la resistencia de la estructura.
- **Anclaje y fijación:** Los módulos se anclan firmemente al terreno mediante sistemas de anclaje de acero inoxidable o polímeros reforzados con fibra (FRP). Esto garantiza que las estructuras permanezcan firmes ante la acción de las olas y las corrientes marinas.

- **Unión de módulos:** Las uniones entre los módulos se sellan con selladores marinos de alta resistencia (como epóxicos o poliuretanos), asegurando impermeabilidad y protección contra la corrosión.

Etapa 4. Relleno y Compactación

- **Relleno con material granular:** Se utiliza piedra triturada y material granular compactado alrededor de las estructuras para mejorar la estabilidad de los módulos y prevenir la socavación causada por las mareas y el oleaje. Este material ayuda a distribuir uniformemente la carga y a mantener la integridad de la estructura.
- **Compactación:** El material granular se compacta en capas para asegurar su durabilidad y resistencia, evitando que el agua elimine el material y cause desplazamientos.

Etapa 5. Revegetación Complementaria (opcional)

Para complementar la protección del suelo alrededor de las estructuras modulares, se pueden plantar especies vegetales nativas resistentes a la salinidad. Estas plantas ayudan a mejorar la retención de suelo, reducir la erosión y restaurar el ecosistema costero.

Etapa 6. Inspección y Verificación

- **Inspección inicial:** Una vez que los módulos están instalados y el relleno ha sido compactado, se realiza una inspección técnica para verificar que todo cumpla con las especificaciones del proyecto.
- **Verificación periódica:** Durante las primeras semanas tras la instalación, se llevan a cabo inspecciones periódicas para asegurar que las estructuras y el suelo circundante se mantengan estables y que no se presenten fallas en las juntas o en los anclajes.

Etapa 7. Mantenimiento y Seguimiento

- **Riego periódico (en caso de revegetación):** Durante los primeros meses, se realiza un riego periódico para asegurar que la vegetación plantada alrededor de las estructuras se establezca correctamente.
- **Mantenimiento preventivo:** Se planifican inspecciones anuales para verificar la integridad estructural de los módulos y el estado de los anclajes y sellos, garantizando que continúen resistiendo las condiciones marinas adversas.

ACEPTACIÓN DE TRABAJOS

Indicador: Cumplimiento del Diseño

Las estructuras modulares deben instalarse de acuerdo con los planos y especificaciones técnicas aprobadas, asegurando que se respeten las dimensiones, forma y distribución de los módulos en el sitio.

El ensamblaje de los módulos debe realizarse de manera precisa y sin desviaciones que comprometan la estabilidad o estética de la construcción.

Indicador: Materiales Utilizados:

Los materiales avanzados, como compuestos de alto rendimiento, acero inoxidable o polímeros reforzados deben cumplir con las especificaciones de resistencia, durabilidad y sostenibilidad indicadas en el proyecto.

Todos los materiales deben ser resistentes a las condiciones climáticas del Caribe colombiano, tales como alta salinidad, humedad y exposición solar.

Los geotextiles, anclajes, y otros componentes deben cumplir con las normas técnicas locales e internacionales.

Indicador: Resistencia Estructural

Las estructuras modulares deben someterse a pruebas de resistencia estructural, asegurando que sean capaces de soportar cargas de viento, impacto de oleaje y otras condiciones adversas.

Se deben realizar inspecciones de estabilidad y resistencia de los anclajes al suelo, verificando que la estructura no presente desplazamientos o asentamientos significativos.

Indicador: Conexiones y Ensamblaje

Las uniones entre los módulos deben ser herméticas, resistentes a la corrosión y permitir la flexibilidad necesaria para adaptarse a los movimientos naturales de la estructura sin afectar su integridad.

Los sistemas de anclaje al terreno y entre módulos deben ser revisados para garantizar que las fuerzas de impacto del oleaje y viento no comprometan la seguridad estructural.

Indicador: Durabilidad y Sostenibilidad

Los materiales utilizados deben garantizar una vida útil prolongada, considerando la exposición a factores ambientales como la salinidad y el clima tropical.

Se debe verificar que las estructuras estén diseñadas para minimizar el impacto ambiental y maximizar la eficiencia energética, evaluando el uso de recursos sostenibles en su fabricación e instalación.

Indicador: Ajuste a Normas y Reglamentación

Las obras deben cumplir con las normativas de construcción, seguridad y sostenibilidad aplicables en Colombia, así como con los estándares internacionales aplicables para construcciones modulares en zonas costeras.

Se debe verificar que las estructuras modulares cuenten con los permisos ambientales y de construcción necesarios.

Indicador: Integración con el Entorno

Las estructuras deben estar correctamente integradas en el paisaje costero, considerando tanto la estética como la funcionalidad de la obra.

Debe haber una armonización con el entorno natural y las áreas vecinas, minimizando el impacto visual y ambiental.

Indicador: Pruebas de Funcionalidad

Se deben realizar pruebas de funcionalidad una vez instaladas las estructuras modulares, evaluando la eficacia de los sistemas de drenaje, protección frente a la erosión y resistencia a la salinidad y humedad.

Indicador: Documentación y Aprobaciones

Se requiere la entrega de toda la documentación técnica, incluyendo reportes de calidad, informes de pruebas, y aprobaciones de supervisores e ingenieros a cargo, asegurando que todos los requisitos del proyecto han sido cumplidos.

Estos criterios de aceptación son esenciales para asegurar que las estructuras modulares con materiales avanzados no solo cumplan con los estándares constructivos, sino también con los principios de sostenibilidad y adaptación a las condiciones específicas del Caribe colombiano.

MEDICIÓN

El metro lineal (ml) será utilizado como unidad de medida para las siguientes actividades dentro de esta alternativa.

4.3.2.2. Detalles y planos.

UNIDAD DE MEDIDA	**ML**

DESCRIPCIÓN

Instalación de estructuras modulares prefabricadas a lo largo de la línea costera de Salgar, Atlántico, para mitigar la erosión y proteger tanto las playas como las infraestructuras existentes. Estructuras fabricadas con materiales avanzados (concreto reforzado con fibras, polímeros de alta resistencia y aleaciones metálicas anticorrosivas) estas dependerán del diseño seleccionado.

EJECUCION

- Preparación del Sitio
- Transporte de Módulos
- Instalación de los Módulos Prefabricados
- Relleno y Compactación
- Revegetación Complementaria (Opcional)
- Inspección y Verificación
- Mantenimiento y Seguimiento

TOLERANCIA DE ACEPTACION

- Alineación y Nivelación de los Módulos
- Compactación del Material Granular
- Hermeticidad de las Uniones
- Vegetación Complementaria
- Conexiones y Ensamblaje
- Durabilidad y Sostenibilidad

EQUIPO

- Herramienta manual
- Señalización
- Equipo de monitoreo

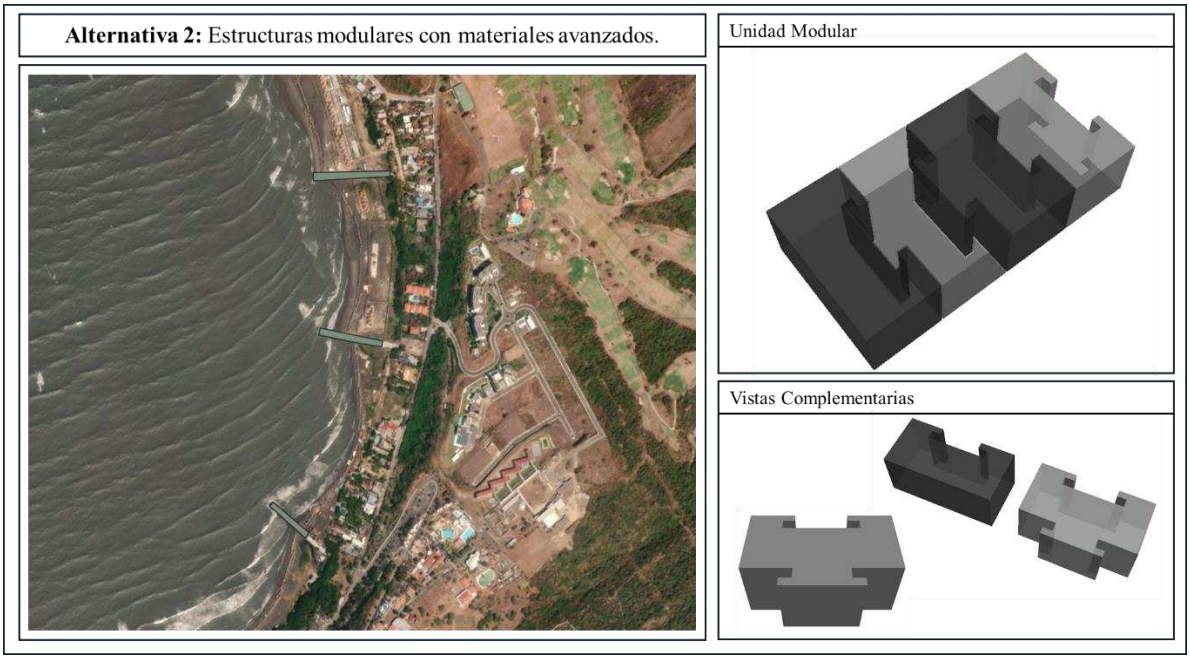
MATERIALES

- Grúa móvil
- Camiones de carga
- Compactadora
- Excavadora
- Volquetas
- Bomba de agua
- Herramienta menor

MEDIDA Y FORMA DE PAGO

La medida de pago serán los metros lineales (ML) instalados, de acuerdo con los niveles y dimensiones anotados en los planos o por el Contratante y/o la Interventoría.

DETALLES CONSTRUCTIVOS



4.3.3. Alternativa 3: Rehabilitación de dunas con vegetación autóctona.

La rehabilitación de dunas con vegetación autóctona es una solución natural y sostenible para mitigar los efectos de la erosión costera, proteger los ecosistemas y preservar la estabilidad

del litoral. Esta alternativa se basa en la restauración y fortalecimiento de las dunas existentes mediante la reintroducción de especies vegetales nativas, capaces de estabilizar el suelo arenoso y formar una barrera natural contra la acción del viento y el oleaje.

La vegetación autóctona, como gramíneas costeras, arbustos y plantas adaptadas a condiciones salinas y áridas, ayuda a consolidar las dunas al fijar la arena con sus raíces, reduciendo la erosión eólica y aportando biodiversidad al ecosistema. Este proceso no solo contribuye a la protección del litoral, sino que también crea hábitats para la fauna local y mejora el paisaje costero.

4.3.3.1. Especificaciones técnicas.

Descripción: La actividad de rehabilitación de dunas con vegetación autóctona consiste en restaurar y estabilizar las dunas costeras mediante la plantación estratégica de especies vegetales nativas, adaptadas a las condiciones del entorno. El proceso incluye la preparación del terreno, selección de especies, plantación y mantenimiento posterior para asegurar la consolidación de la vegetación.

MATERIALES

1. **Plantas Autóctonas Nativas**

- Gramíneas costeras: Especies como Spartina patens y Panicum racemosum, adaptadas a suelos arenosos y condiciones salinas.
- Arbustos nativos Ejemplares como Sesuvium portulacastrum (verdolaga de playa) o Ipomoea pes-caprae (bejuco de playa), que son resistentes a los vientos fuertes y al ambiente salino.
- Árboles resistentes (si se requiere): Especies como Coccoloba uvifera (uva de playa), que ayudan a estabilizar las zonas altas de las dunas.

2. Geotextiles Biodegradables:

Materiales de fibra natural como yute o coco, que permiten estabilizar el terreno mientras la vegetación se establece. Estos geotextiles ayudan a retener la arena y prevenir la erosión mientras las plantas arraigan.

3. Sustrato y acondicionadores de suelo:

En zonas de duna muy degradadas, puede requerirse el uso de compost o enmiendas orgánicas para mejorar las condiciones del suelo y asegurar una mejor tasa de germinación y crecimiento de las plantas.

Arena: En caso de movimientos de arena o para nivelar áreas erosionadas, se utiliza arena similar a la de la zona costera local.

4. Estacas de Madera o Bambú:

Estacas o postes de madera tratada o bambú para la fijación de los geotextiles en las zonas más erosionadas y para guiar la plantación.

5. Cercas de protección:

Cercas temporales de madera o postes de bambú con cuerdas, diseñadas para delimitar la zona de rehabilitación y evitar el paso peatonal o vehicular mientras las dunas se regeneran.

6. Señalización:

Letreros informativos para indicar áreas en rehabilitación, informar a la comunidad y turistas, y fomentar la protección de la vegetación en crecimiento.

EJECUCIÓN

Etapa 1. Estudio Previo del Sitio

- Realizar un análisis del área a rehabilitar, evaluando el estado actual de las dunas, la composición del suelo, la topografía y las condiciones ambientales.
- Identificar las especies de vegetación autóctona más adecuadas para la rehabilitación.

Etapa 2. Limpieza del Área

- Retirar residuos, escombros y cualquier tipo de vegetación invasora que pueda competir con las especies nativas.
- Si es necesario, realizar nivelaciones menores para acondicionar la superficie.

Etapa 3. Preparación del Terreno

- Acondicionar el terreno mediante rastrillado para crear un sustrato adecuado para la plantación.
- Marcar los lugares donde se plantarán las especies vegetales, siguiendo un diseño que maximice la retención de arena.

Etapa 4. Instalación de Geotextiles

- Colocar geotextiles biodegradables en áreas críticas de erosión para estabilizar el terreno. Asegurarse de que estén bien fijados con estacas de madera o bambú.

- Las capas de geotextil deben superponerse adecuadamente para evitar el desplazamiento de arena.

Etapa 5. Plantación de Vegetación

- Realizar la plantación de las especies autóctonas siguiendo el diseño previamente establecido.
- Asegurarse de que cada planta esté bien asentada y con suficiente espacio para el crecimiento.
- Para garantizar una buena tasa de supervivencia, se recomienda plantar en condiciones adecuadas de humedad (preferiblemente en días nublados o después de lluvias).

Etapa 6. Riego y Mantenimiento Inicial

- Implementar un sistema de riego temporal para las primeras semanas, asegurando que las plantas reciban suficiente agua para establecerse.
- Monitorizar el crecimiento de las plantas, realizando podas ligeras si es necesario para fomentar un crecimiento saludable.

Etapa 7. Protección del Área

- Instalar cercas temporales alrededor del área rehabilitada para prevenir el acceso de personas y animales, permitiendo que la vegetación se asiente sin interrupciones.
- Colocar señalizaciones informativas sobre la importancia de la conservación de las dunas y el proceso de rehabilitación.

Etapa 8. Monitoreo y Evaluación

- Realizar un seguimiento periódico del crecimiento y establecimiento de la vegetación durante al menos un año.
- Evaluar la eficacia de la rehabilitación y ajustar las estrategias si es necesario, implementando riegos adicionales o replantaciones.

Etapa 9. Mantenimiento a Largo Plazo

- Establecer un plan de mantenimiento a largo plazo que incluya la supervisión del área, el control de especies invasoras y la promoción de la recuperación natural del ecosistema.

ACEPTACIÓN DE TRABAJOS

Indicador: Establecimiento de la Vegetación

Al menos un 80% de las plantas sembradas deben mostrar signos de crecimiento y desarrollo saludable dentro de los primeros seis meses.

Las especies autóctonas deben ser identificables y deben haber comenzado el proceso de arraigo.

Indicador: Integridad de los Geotextiles

Los geotextiles utilizados deben estar completamente intactos y no presentar desgastes ni roturas significativas después de seis meses de la instalación.

No debe haber desplazamiento significativo de la arena bajo los geotextiles, lo que indicaría una adecuada funcionalidad en la retención de sedimentos.

Indicador: Control de Erosión

La reducción de la erosión en el área rehabilitada debe ser evidente en comparación con el estado anterior, medido mediante inspecciones visuales y análisis de fotografías antes y después.

La formación de nuevas dunas debe ser observable, indicando que la intervención ha favorecido la acumulación de arena.

Indicador: Cumplimiento de Diseño

Las plantas deben estar ubicadas de acuerdo con el diseño aprobado, sin desviaciones significativas en el espaciamiento o en la disposición.

Se debe llevar un registro de la ubicación de las plantas y su estado en un informe que evidencie el cumplimiento con el plan original.

Indicador: Mantenimiento y Monitoreo

Se debe presentar un plan de monitoreo que incluya intervalos de evaluación y actividades de mantenimiento realizadas, tales como riego adicional y control de especies invasoras.

Un informe final debe documentar todas las actividades de mantenimiento y los resultados del seguimiento.

Indicador: Durabilidad de la Protección

Las cercas temporales deben permanecer en su lugar y en condiciones adecuadas durante al menos el periodo de establecimiento de la vegetación (mínimo un año), evitando el acceso no autorizado a la zona rehabilitada.

Indicador: Condiciones Ambientales

Durante la evaluación, las condiciones ambientales (temperatura, humedad, etc.) deben estar dentro de los rangos que favorezcan el crecimiento de la vegetación autóctona y no debe haber condiciones adversas que hayan comprometido la rehabilitación.

MEDICIÓN

La unidad de medida será el m^2 esta unidad se utilizará para medir el área total de las dunas rehabilitadas, incluyendo la superficie donde se ha realizado la plantación de vegetación autóctona.

4.3.3.2. Detalles y planos.

UNIDAD DE MEDIDA **M2**

DESCRIPCIÓN

Restauración y estabilización de dunas costeras a través de la plantación de especies nativas adaptadas al entorno. El proceso incluye la preparación del terreno, selección de plantas, plantación y mantenimiento posterior para asegurar el crecimiento y consolidación de la vegetación.

EJECUCION

- Estudio Previo del Sitio
- Limpieza del Área
- Preparación del Terreno
- Instalación de Geotextiles
- Plantación de Vegetación
- Riego y Mantenimiento Inicial
- Protección del Área
- Monitoreo y Evaluación
- Mantenimiento a Largo Plazo

TOLERANCIA DE ACEPTACION

- Establecimiento de la Vegetación
- Integridad de los Geotextiles
- Control de Erosión
- Cumplimiento de Diseño
- Mantenimiento y Monitoreo
- Durabilidad de la Protección
- Condiciones Ambientales

EQUIPO

- Herramienta manual
- Señalización
- Equipo de monitoreo

MATERIALES

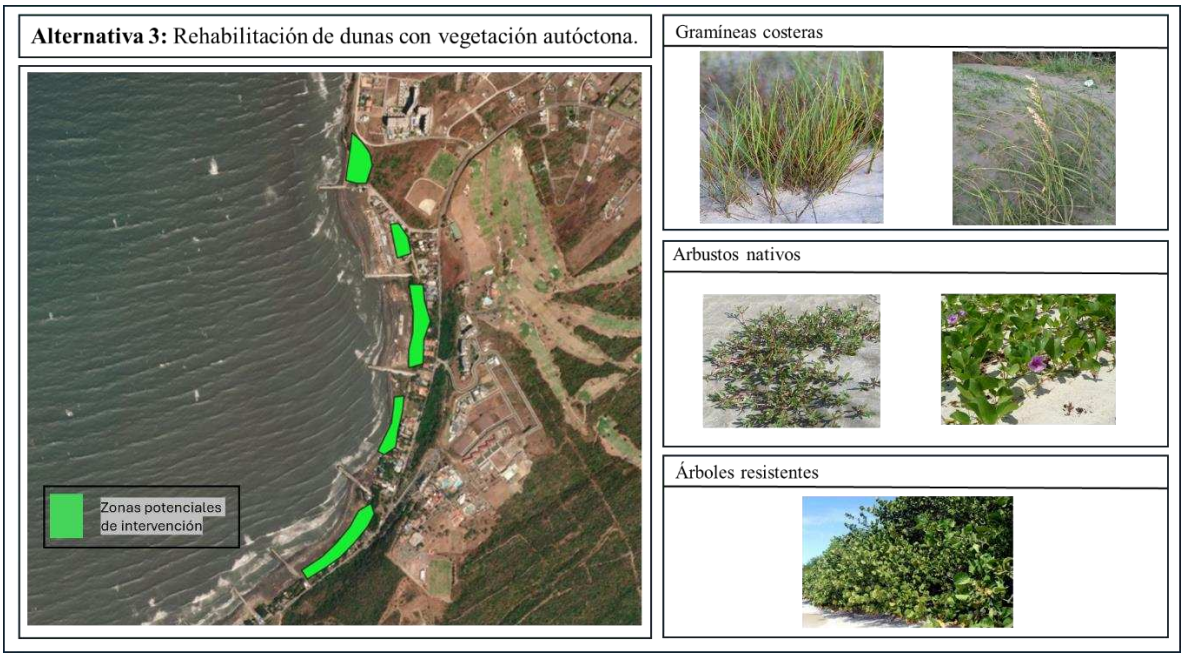
- Plantas Autóctonas Nativas

- Geotextiles Biodegradables
- Sustrato y Acondicionadores de Suelo
- Compost o enmiendas orgánicas
- Estacas de Madera o Bambú
- Cercas de Protección
- Señalización

MEDIDA Y FORMA DE PAGO

La medida de pago serán los metros cuadrados (M2) instalados, de acuerdo con los niveles y dimensiones anotados en los planos o por el Contratante y/o la Interventoría.

DETALLES CONSTRUCTIVOS



4.3.4. Alternativa 4: Creación de zonas húmedas o marismas artificiales.

La creación de zonas húmedas o marismas artificiales consiste en el diseño y establecimiento de ecosistemas acuáticos que imitan las funciones y características de las zonas

húmedas naturales. Este enfoque busca restaurar y preservar la biodiversidad, así como proporcionar múltiples beneficios ambientales y sociales.

4.3.4.1. Especificaciones técnicas.

Descripción: La creación de zonas húmedas o marismas artificiales es una estrategia innovadora diseñada para restaurar y mejorar los ecosistemas costeros mediante la construcción de áreas que simulan las características y funciones de las zonas húmedas naturales. Este enfoque busca generar un ambiente acuático que no solo proteja la costa de la erosión, sino que también ofrezca múltiples beneficios ambientales, económicos y sociales.

MATERIALES

1. **Sustrato para Plantación**
    - Suelo Orgánico: Se utiliza una mezcla de suelo orgánico, que es rico en nutrientes y favorece el crecimiento de las plantas nativas. Este sustrato debe ser capaz de retener la humedad y proporcionar un medio adecuado para las raíces.
    - Grava y Arena: Se emplea grava y arena para mejorar la drenabilidad del suelo y permitir un adecuado flujo de agua en el sistema.

2. **Vegetación Nativa**

    - Especies Acuáticas: Se seleccion plantas nativas adaptadas a condiciones húmedas, como juncos (Schoenoplectus spp.), cañas de azúcar (Arundo donax), y otras gramíneas. Estas especies son esenciales para la estabilización del suelo y la filtración de agua.
    - Plantas Flotantes: Especies como el lirio de agua (Eichhornia crassipes) pueden ser incorporadas para proporcionar hábitat a la fauna acuática y contribuir a la oxigenación del agua.

3. **Materiales de Infraestructura**

    - Geotextiles: Se utilizarán geotextiles biodegradables para ayudar a estabilizar el suelo y prevenir la erosión durante el establecimiento inicial de las plantas. Estos materiales permiten el paso del agua y las raíces, mientras retienen el sustrato.
    - Bloques de concreto o Piedras: Para construir diques o bordes que delimiten las áreas de la marisma, se pueden emplear bloques de concreto o piedras locales. Estos elementos ayudan a controlar el flujo de agua y evitar la erosión en las orillas.

4. **Sistema de Drenaje y Control de Agua:**

    - Tuberías y Drenajes: Se instalarán tuberías y sistemas de drenaje para regular el nivel del agua en la marisma, asegurando que se mantenga la humedad adecuada y se prevengan inundaciones.

- Válvulas y Compuertas: Estos elementos se utilizarán para gestionar el flujo de agua, permitiendo ajustes en función de las condiciones climáticas y las necesidades de la vegetación.

5. **Materiales de Monitoreo:**
    - Sensores de Humedad y Calidad del Agua: Se incorporarán sensores para monitorear la humedad del suelo y la calidad del agua, permitiendo un manejo más efectivo de la zona húmeda.
    - Señalización Educativa: Se utilizarán materiales para crear señalización que informe a los visitantes sobre la importancia de las marismas y las especies presentes, promoviendo la educación ambiental.

EJECUCIÓN

Etapa 1. Estudio de Viabilidad y Planificación

Evaluación del Sitio: Realizar un estudio de las características del terreno, incluyendo la topografía, la hidrología y la biodiversidad existente. Este análisis ayudará a determinar la ubicación óptima para las marismas.

Diseño del Proyecto: Elaborar un diseño que contemple la configuración de la zona húmeda, incluyendo la distribución de los estanques, canales y áreas de plantación.

Etapa 2. Preparación del Terreno

Desmalezado y Limpieza: Retirar la vegetación invasora y los desechos del área seleccionada para garantizar un espacio limpio para la construcción.

Excavación: Realizar la excavación de los estanques y canales según el diseño aprobado, teniendo en cuenta la profundidad y la pendiente adecuadas para el manejo del agua.

Etapa 3. Construcción de Infraestructura

Instalación de Diques y Bordes: Construir diques y bordes utilizando bloques de concreto o piedras para delimitar las áreas de la marisma y controlar el flujo de agua.

Sistema de Drenaje: Colocar tuberías y drenajes que permitan regular el nivel del agua en la marisma, asegurando la adecuada retención y evacuación del agua según sea necesario.

Etapa 4. Preparación del Sustrato

Aplicación de Suelo Orgánico: Distribuir una mezcla de suelo orgánico, grava y arena en los estanques y áreas de plantación. Esto proporcionará un medio adecuado para el crecimiento de las plantas nativas.

Nivelación y Compactación: Nivelar el sustrato y compactar ligeramente para asegurar una base estable para la vegetación.

Etapa 5. Plantación de Vegetación Nativa

Selección de Especies: Elegir especies nativas adecuadas para el clima y las condiciones del sitio. Las plantas deben ser resistentes a la humedad y adaptadas a las condiciones locales.

Plantación: Realizar la plantación de las especies seleccionadas en el sustrato preparado, asegurando una distribución adecuada y densidad de plantación para promover el crecimiento.

Etapa 6. Monitoreo y Mantenimiento Inicial

Riego: Proporcionar riego periódico para establecer y mantener la germinación de las plantas, especialmente durante las primeras semanas.

Monitoreo de la Vegetación: Supervisar el crecimiento de las plantas y el desarrollo del ecosistema, realizando ajustes en el riego y el manejo del agua según sea necesario.

ACEPTACIÓN DE TRABAJOS

Indicador: Diseño y Dimensiones

El diseño de la zona húmeda debe adherirse a los planos aprobados, incluyendo las dimensiones, formas y profundidades de los estanques y canales.

Las áreas de plantación deben estar correctamente demarcadas y cumplir con las especificaciones de diseño en cuanto a la distribución y densidad de las especies vegetales.

Indicador: Calidad del Sustrato

El sustrato utilizado debe ser una mezcla adecuada de suelo orgánico, grava y arena, cumpliendo con las especificaciones técnicas establecidas en el proyecto.

El pH, la textura y la capacidad de retención de agua del sustrato deben ser adecuados para las especies vegetales seleccionadas.

Indicador: Instalación de Infraestructura

Los diques y bordes deben estar correctamente construidos, sin filtraciones que puedan comprometer la retención del agua.

El sistema de drenaje debe funcionar correctamente, asegurando la regulación del nivel del agua sin generar inundaciones o sequías en las áreas de plantación.

Indicador: Vegetación Nativa

La vegetación plantada debe ser completamente nativa, saludable y adaptada a las condiciones del sitio.

Al menos un porcentaje mínimo (ej. 80%) de las plantas sembradas debe mostrar signos de crecimiento saludable y establecimiento dentro de un plazo específico (por ejemplo, seis meses).

Indicador: Calidad del Agua

Se deben realizar análisis de calidad del agua para asegurarse de que cumpla con los estándares ecológicos necesarios, incluyendo parámetros como la turbidez, oxígeno disuelto y nutrientes.

El agua debe estar presente en los niveles adecuados para el mantenimiento de la vegetación y los ecosistemas acuáticos asociados.

Indicador: Monitoreo y Mantenimiento**:

Se deben establecer registros documentales del monitoreo de la vegetación y la calidad del agua, los cuales serán evaluados en inspecciones.

Un plan de mantenimiento debe estar en funcionamiento y ser capaz de abordar cualquier problema de crecimiento de plantas, erosión o sedimentación.

MEDICIÓN

La unidad de medida para la creación de zonas húmedas o marismas artificiales se establecerá en metros cuadrados (m^2).

4.3.4.2. Detalles y planos.

UNIDAD DE MEDIDA	**ML**

DESCRIPCIÓN

Creación de zonas húmedas o marismas artificiales para restaurar y mejorar los ecosistemas costeros.

EJECUCION

- Estudio de Viabilidad y Planificación
- Preparación del Terreno
- Construcción de Infraestructura
- Preparación del Sustrato
- Plantación de Vegetación Nativa
- Monitoreo y Mantenimiento Inicial

TOLERANCIA DE ACEPTACION

- Diseño y Dimensiones
- Calidad del Sustrato
- Instalación de Infraestructura
- Vegetación Nativa
- Calidad del Agua
- Monitoreo y Mantenimiento

EQUIPO

- Excavadora
- Bulldozer
- Compactadora
- Tuberías y accesorios
- Geotextiles
- Sistemas de riego
- Herramienta menor
- Sensores de humedad y calidad del agua
- Equipos de monitoreo ambiental

- Vehículos para transporte de materiales

MATERIALES

- Sustrato para plantación
- Vegetación nativa
- Materiales de infraestructura
- Sistema de drenaje y control de agua
- Materiales de monitoreo

MEDIDA Y FORMA DE PAGO

La medida de pago serán los metros lineales (M2) instalados, de acuerdo con los niveles y dimensiones anotados en los planos o por el Contratante y/o la Interventoría.

DETALLES CONSTRUCTIVOS

Alternativa 4: Creación de zonas húmedas o marismas artificiales.



Gramíneas costeras




Arbustos nativos




Árboles resistentes



5. Conclusiones

A partir del análisis integral que incluyó el estudio de las condiciones climáticas, la propagación del oleaje, la evolución de la línea de costa y el análisis de vulnerabilidad se pudo identificar de manera precisa el grado de erosión que afecta a las playas de Salgar y la necesidad de adoptar estrategias sostenibles y eficaces para mitigar este fenómeno. Las observaciones han destacado el carácter dinámico del entorno costero, lo que implica la importancia de seleccionar soluciones adaptativas y resilientes para enfrentar tanto las amenazas actuales como las futuras.

El análisis de las condiciones climáticas reveló que la región enfrenta un aumento en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, como tormentas y marejadas ciclónicas. Estos fenómenos están intensificando los procesos de erosión en la línea de costa y acelerando la pérdida de sedimentos. El estudio de la propagación del oleaje mostró que las olas tienden a concentrarse en ciertas áreas, lo que agrava la erosión en zonas específicas de las playas analizadas. Esto ha permitido identificar áreas prioritarias para la implementación de soluciones.

La evolución histórica de la línea de costa evidenció un retroceso significativo en varios sectores, producto tanto de los fenómenos naturales como de actividades antropogénicas. La construcción de infraestructura en zonas costeras ha contribuido a la degradación del entorno, exacerbando los efectos de la erosión. Estos hallazgos subrayan la urgencia de medidas de conservación y rehabilitación que no solo aborden los impactos pasados, sino que también garanticen la sostenibilidad de las futuras intervenciones.

A partir del análisis de vulnerabilidad se logró identificar que las playas S2 y S3 requieren una mayor atención para implementar estrategias de conservación y adaptación frente a amenazas, en cambio, las playas S1, S4 y S5 podrían enfocarse en el mantenimiento y fortalecimiento de sus capacidades de conservación. La variabilidad en los índices de vulnerabilidad refleja la complejidad de los desafíos que enfrentan las playas, y que resalta la importancia de un enfoque de gestión costera integrado que considere las características específicas de cada playa y la participación de las comunidades locales en la toma de decisiones.

La implementación de alternativas constructivas sostenibles en Salgar para mitigar la erosión costera representa un enfoque innovador y responsable que integra la ingeniería con la conservación ambiental. Las estrategias propuestas, como la revegetación y la utilización de geotextiles, las estructuras modulares con materiales avanzados, la rehabilitación de dunas con vegetación autóctona y la creación de zonas húmedas o marismas destacan por su capacidad para adaptarse a las condiciones cambiantes del entorno costero y su contribución a la sostenibilidad.

Desde el punto de vista constructivo, estas soluciones no solo abordan de manera efectiva los problemas de erosión, sino que también promueven la durabilidad y resistencia de las infraestructuras frente a fenómenos climáticos extremos. La combinación de elementos naturales con tecnología avanzada permite la creación de estructuras que no solo cumplen funciones de protección, sino que también enriquecen el paisaje y fomentan la biodiversidad local.

6. Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos, se recomiendan las siguientes acciones:

Implementación de soluciones integrales: Considerando la complejidad del entorno costero y los diferentes factores que contribuyen a la erosión, es esencial adoptar un enfoque multidimensional que combine varias de las alternativas propuestas. La creación de zonas húmedas o marismas artificiales debe ser la prioridad, complementada con la revegetación de espolones y la rehabilitación de dunas, para maximizar la efectividad de las medidas.

Monitoreo continuo de la línea de costa: Es fundamental establecer un sistema de monitoreo continuo para evaluar la efectividad de las medidas implementadas y realizar ajustes según sea necesario. Las condiciones climáticas cambiantes y la dinámica de la propagación del oleaje requieren un seguimiento constante para asegurar que las intervenciones sigan siendo eficaces a lo largo del tiempo.

Participación comunitaria: Las comunidades locales deben ser incluidas en el proceso de rehabilitación costera, especialmente en la fase de implementación y mantenimiento de las soluciones basadas en vegetación. La participación de la población contribuirá a fortalecer el sentido de apropiación y cuidado de los ecosistemas costeros restaurados.

7. Referencias

Andrade-Amaya, C. A., Ferrero-Ronquillo, A. J., Leon-Rincon, H., Mora-Paez, H., & Carvajal-Perico, H. (2017). On coastline changes between 1735 and 2011 and subsidence in Cartagena Bay, Colombia; [Sobre cambios en la linea de costa entre 1735 y 2011 y la subsidencia en la Bahia de Cartagena de Indias, Colombia]. Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Fisicas y Naturales, 41(158), 94 – 106. https://doi.org/10.18257/raccefyn.360

Baker, S., Murphy, E., Cornett, A., & Knox, P. (2022). Experimental Study of Wave Attenuation Across an Artificial Salt Marsh. Frontiers in Built Environment, 8. https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.893664

Barbaro, G., Foti, G., & Sicilia, C. L. (2014). Coastal erosion in the South of Italy. Disaster Advances, 7(3), 37–42. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84896863514&partnerID=40&md5=12d55790ef4c0a225099e177cce0b3c1

Barreto, M., Tejeda, R. M., Cabrera, N., Bonano, V., Díaz, E., Pérez, K., & Castro, A. (2021). THE STATE OF COASTAL EROSION IN PUERTO RICO AFTER HURRICANE MARÍA; [EL ESTADO DE LA EROSIÓN COSTERA POST-HURACÁN MARÍA EN PUERTO RICO]. Revista Geografica de Chile Terra Australis, 57, 29 – 40. https://doi.org/10.23854/07199562.2021571esp.Barreto29

Bergin, D. O., & Kimberley, M. O. (2019). Rehabilitation of coastal foredunes in new zealand using indigenous sand-binding species. Science for Conservation, 2019-December.

https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85118838170&partnerID=40&md5=ec80745a72a98f12a1d480be6744bf62

Bernal, G., Urrego, L. E., Gómez-García, Á. M., Betancur, S., & Osorio, A. F. (2014). Geomorphological evolution and coastal vegetation of Palmeras Beach Gorgona Island National Natural Park, Colombian Pacific; [Evolución geomorfológica y vegetación costera de playa Palmeras Parque Nacional Natural Isla Gorgona, Pacífico Colombiano]. Latin American Journal of Aquatic Research, 42(3), 622 – 638. https://doi.org/10.3856/vol42-issue3-fulltext-19

Bessette, S. R., Hicks, D. W., & Fierro-Cabo, A. (2018). Biological assessment of dune restoration in south Texas. Ocean and Coastal Management, 163, 466–477. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.06.019

Bio, A., Bastos, L., Granja, H., Pinho, J. L. S., Goncalves, J. A., Henriques, R., Madeira, S., Magalhaes, A., & Rodrigues, D. (2015). Methods for coastal monitoring and erosion risk assessment: Two Portuguese case studies. Journal of Integrated Coastal Zone Management, 15(1), 47 – 63. https://doi.org/10.5894/rgci490

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

Caribe, D., De, C., & Erosión, L. A. (2007). 013-Diagnóstico De La Erosión en la Zona Costera de Caribe Colombiano.

Carmona, J. C. H., Uribe, J. P., Hoyos, M. A., & Padilla, L. A. Z. (2024). Vulnerability and climate risk analysis of the mangrove socio-ecosystem in Colombia; [Análisis de vulnerabilidad y riesgo climático del socioecosistema de manglar en Colombia]. Boletin de Investigaciones Marinas y Costeras, 53(2), 103 – 132. https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2024.53.2.1308

Chen, Z., Luo, F., Zhou, G., Zhu, F., Wu, H., Li, R., & Zhang, C. (2024). Hydrodynamic modeling study of nature-based hybrid coastal defense strategy applied in salt marsh restoration. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 298. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2024.108666

Coca, O., & Ricaurte-Villota, C. (2023). Morphodynamics of a macro-tidal tropical beach: La Bocana, Pacific coast of Colombia; [Morfodinámica de una playa tropical macromareal: La Bocana, costa Pacífica de Colombia]. Boletin de Investigaciones Marinas y Costeras, 52(2), 77 – 102. https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2023.52.2.1209

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

Coca-Domínguez, O., Ricaurte-Villota, C., David, F., & Morales, G. (n.d.). Modelo de gestión y análisis del riesgo por erosión costera. Caso de estudio departamento de Córdoba.

Connell, M., & Beattie, A. (2003). Coastal erosion and flood protection for Maryport Harbour, Cumbria. Concrete (London), 37(2), 46 – 47.

https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0037323039&partnerID=40&md5=0fd7924d0c7911f3fb1c5050f3da4b8a

Delgado-González, O., Lizárraga-Arciniega, R., Martínez-Díaz-de-León, A., Galindo-Bect, L., Fermán-Almada, J. L., Sánchez-Arcilla, A., Mosso, C., Pérez-Higuera, R., & Cruz-Varela, A. (2005). Beach-line changes at the mouth of Punta Banda Estuary, Baja California, during 1972-s2003; [Cambios en la posición de la línea de playa de la boca del Estero de Punta Banda, Baja California, durante 1972-2003]. Ciencias Marinas, 31(4), 707 – 717. https://doi.org/10.7773/cm.v31i4.36

dos Santos, A. A., Nunes-Freitas, A. F., Tompson, C. M., Barbosa, G., Takahashi, D., Suyama, Y., & Lira, C. F. (2024). Multidisciplinary assessment of a restored mangrove ecosystem in Guanabara Bay, Brazil: linking science and conservation. Wetlands Ecology and Management. https://doi.org/10.1007/s11273-024-10012-5

Dumax, N., & Rozan, A. (2021). Valuation of the environmental benefits induced by a constructed wetland. Wetlands Ecology and Management, 29(6), 809 – 822. https://doi.org/10.1007/s11273-021-09811-x

Dunlap, S., & White, C. (2008). Revegetation of a detention basin in Harris county, Texas: Lessons learned. International Erosion Control Association - 39th Annual Conference and Expo of the International Erosion Control Association 2008 - Environmental Connection 2008: Drive Your Future, 210–221. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84866899208&partnerID=40&md5=20bd0c2ca85f125149c85ba0605f87dc

Dussan-Arquez, M. R., & Rodríguez-Rodríguez, J. A. (2022). Identification and prioritization of native plant species for the restoration of eroded beaches and dunes in Colombia; [Identificación y priorización de especies vegetales nativas para la restauración de playas y dunas erosionadas en Colombia]. Caldasia, 44(2), 368 – 379. https://doi.org/10.15446/caldasia.v44n2.90722

Edeso, J. M. (2008). Geological and geomorphological natural risks. Lurralde: Investigacion y Espacio, 31, 325–374. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-58449099984&partnerID=40&md5=96eca4e7e5987e23dc6f361bc57b7ac4

El-Asmar, H. M., & White, K. (2002). Changes in coastal sediment transport processes due to construction of New Damietta Harbour, Nile Delta, Egypt. Coastal Engineering, 46(2), 127 – 138. https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00068-6

Fernández, J. E. B., Linares, A. P. M., & Santana, J. R. H. (2016). Hyperannual morphodynamic variations (1951-2007) of the coastline between Punta Diamante and Papagayo River, Acapulco, Mexico; [Variaciones morfodinámicas hiperanuales (1951-2007) de la línea costera entre punta diamante y río papagayo, acapulco, México]. Boletin de La Asociacion de Geografos Espanoles, 2016(71), 301 – 322. https://doi.org/10.21138/bage.2284

Fleming, C. A. (1991). The development of wider perspectives in coastal erosion control. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85041145187&partnerID=40&md5=42d0e383b684aecd2df8d6734773694f

García-Ruiz, A., Díez-Minguito, M., Verichev, K., & Carpio, M. (2024). Bibliometric Analysis of Urban Coastal Development: Strategies for Climate-Resilient Timber Housing. Sustainability (Switzerland), 16(4). https://doi.org/10.3390/su16041431

Garzon, J. L., Ferreira, O., & Plomaritis, T. A. (2022). Modeling of Coastal Erosion in Exposed and Groin-Protected Steep Beaches. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 148(6). https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000719

Hanley, M. E., Hoggart, S. P. G., Simmonds, D. J., Bichot, A., Colangelo, M. A., Bozzeda, F., Heurtefeux, H., Ondiviela, B., Ostrowski, R., Recio, M., Trude, R., Zawadzka-Kahlau, E., & Thompson, R. C. (2014). Shifting sands? Coastal protection by sand banks, beaches and dunes. Coastal Engineering, 87, 136–146. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.10.020

Hanrahan, P. M. (2014). The Evolution of Coastal Erosion Control Technology the oceans are changing. Technological ingenuity is poised to meet the challenge. Erosion Control, 21(2), 50 – 54. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84895540672&partnerID=40&md5=b1d9fae1bf6c6ca2577dcded98895e6e

Herrera, V. R. (2015). Geomorphology, erosion and sedimentation in coastal zones of the Burica Peninsula; [Geomorfología, zonas de erosión y sedimentación costera de la Península de Burica, Costa Rica]. Revista de Biologia Tropical, 63, 407 – 416. https://doi.org/10.15517/rbt.v63i1.23119

Holthuijsen, L. H. (n.d.). Waves in Oceanic And Coastal Waters (CAMBRIDGE, Ed.).

INVEMAR. (2018). Amenaza y Vulnerabilidad por Erosión Costera en Colombia: Enfoque regional para la gestión del riesgo.

Kantardgi, I. G., Zheleznyak, M. I., & Anshakov, A. S. (2019). Numerical modeling of nonlinear hydrodynamics of the coastal areas. Magazine of Civil Engineering, 87(3), 80 – 92. https://doi.org/10.18720/MCE.87.7

Kokot, R. R., & Chomnalez, F. (2011). Retreat of the line of coast in Las Grutas, Río Negro province; [Retroceso de la línea de costa en Las Grutas, provincia de Río Negro]. Revista de La Asociacion Geologica Argentina, 69(1), 88 – 96. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84868260220&partnerID=40&md5=3269a85c39bfa28a6652d13ded854b41

Leaman, C. K., Harley, M. D., Splinter, K. D., Thran, M. C., Kinsela, M. A., & Turner, I. L. (2021). A storm hazard matrix combining coastal flooding and beach erosion. Coastal Engineering, 170. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.104001

Li, X., Kang, Y., Wan, S., Chen, X., & Shiping, L. (2016). A vegetation reconstruction method to plant Sedum spectabile Boreau using drip-irrigation with saline water on a coastal saline soil in region around Bohai Gulf. Paddy and Water Environment, 14(4), 491 – 498. https://doi.org/10.1007/s10333-015-0518-7

Lieberthal, B., Perry, R., Younce, E., Hanley, L., Bryant, M., & Huguenard, K. (2024). Design and Deployment of a Floating Porous Screen Breakwater in a Mesotidal Environment. Journal of Marine Science and Engineering, 12(9). https://doi.org/10.3390/jmse12091684

López, S. C. (2020). Anthropic effects on the geomorphology and morphodynamics of the coastal zone of La Paz lagoon, Baja California Sur, Mexico; [Efecto antrópico en la geomorfología y morfodinámica de la franja costera de la Laguna de La Paz, Baja California Sur, México]. Investigaciones Geograficas, 103. https://doi.org/10.14350/RIG.60084

Ma, M., Huang, W., Jung, S., Oslon, C., Yin, K., & Xu, S. (2024). Evaluating Vegetation Effects on Wave Attenuation and Dune Erosion during Hurricane. Journal of Marine Science and Engineering, 12(8). https://doi.org/10.3390/jmse12081326

Merlotto, A., & Bértola, G. R. (2009). Coastline evolution at Balneario Parque Mar Chiquita, Argentina; [Evolución de la línea de costa en el Balneario Parque Mar Chiquita, Argentina]. Ciencias Marinas, 35(3), 271 – 286. https://doi.org/10.7773/cm.v35i3.1423

MinAmbiente. (n.d.). RESUMEN PLAN MAESTRO DE EROSIÓN COSTERA DE COLOMBIA. www.minambiente.gov.co

Moradi, M., Chertouk, N., & Ilinca, A. (2022). Modelling of a Wave Energy Converter Impact on Coastal Erosion, a Case Study for Palm Beach-Azur, Algeria. Sustainability (Switzerland), 14(24). https://doi.org/10.3390/su142416595

Muhammad, B. L., Lee, K., Yoon, W., Chae, J., & Ki, J.-S. (2024). Genetic diversity and phylogeography of the smooth cordgrass Spartina alterniflora and its invasion into Korean coasts. Regional Studies in Marine Science, 78. https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103729

Narváez, D. H., Cabrera, A. V., Bornachera, A. Z., & Sierra-Correa, P. C. (2019). Climate change and socioeconomic impacts on the Colombian coastal and insular area; [El cambio climático y los impactos socioeconómicos sobre la zona costera e insular colombiana]. Boletin de Investigaciones Marinas y Costeras, 48(2), 9 – 32. https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2019.48.2.764

Odériz, I., Knöchelmann, N., Silva, R., Feagin, R. A., Martínez, M. L., & Mendoza, E. (2020). Reinforcement of vegetated and unvegetated dunes by a rocky core: A viable alternative for dissipating waves and providing protection? Coastal Engineering, 158. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103675

Panaitescu, F.-V., Panaitescu, M., Anton, I.-A., Anton, C., & Turof, M. (2018). New solutions to protect the Romanian coastline. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 10977. https://doi.org/10.1117/12.2322487

Ratnayake, N. P., Ratnayake, A. S., Azoor, R. M., Weththasinghe, S. M., Seneviratne, I. D. J., Senarathne, N., Premasiri, R., & Dushyantha, N. (2019). Erosion processes driven by monsoon events after a beach nourishment and breakwater construction at Uswetakeiyawa beach, Sri Lanka. SN Applied Sciences, 1(1). https://doi.org/10.1007/s42452-018-0050-7

Ricaurte-Villota, C., Santamaría-Del-Ángel, E., Coca-Domínguez, O., Morales-Giraldo, D. F., & González-Arteaga, M. (2021a). DETERMINING FACTORS OF THE HAZARD AND VULNERABILITY BY COASTAL EROSION IN COLOMBIA. Revista Geografica de Chile Terra Australis, 57, 129–139. https://doi.org/10.23854/07199562.2021571esp.Ricaurte-Villota129

Ricaurte-Villota, C., Santamaría-Del-Ángel, E., Coca-Domínguez, O., Morales-Giraldo, D. F., & González-Arteaga, M. (2021b). DETERMINING FACTORS OF THE HAZARD AND VULNERABILITY BY COASTAL EROSION IN COLOMBIA; [FACTORES DETERMINANTES DE LA AMENAZA Y VULNERABILIDAD POR EROSIÓN COSTERA EN COLOMBIA]. Revista Geografica de Chile Terra Australis, 57, 129 – 139. https://doi.org/10.23854/07199562.2021571esp.Ricaurte-Villota129

Rodriguez, E., Avila, G., & Guerra-Chanis, G. (2022). Coastline changes in the Pacific of Panama due to coastal erosion; [Cambios en la linea de costa del Pacifico de Panama debido a erosion costera.]. Proceedings - 2022 8th International Engineering, Sciences and Technology Conference, IESTEC 2022, 440 – 444. https://doi.org/10.1109/IESTEC54539.2022.00075

Srineash, V. K., & Murali, K. (2019a). Functional performance of modular porous reef breakwaters. Journal of Hydro-Environment Research, 27, 20 – 31. https://doi.org/10.1016/j.jher.2019.07.006

Srineash, V. K., & Murali, K. (2019b). Functional performance of modular porous reef breakwaters. Journal of Hydro-Environment Research, 27, 20–31. https://doi.org/10.1016/j.jher.2019.07.006

Stauble, D. K., & Tabar, J. R. (2003). The use of submerged narrow-crested breakwaters for shoreline erosion control. Journal of Coastal Research, 19(3), 684 – 722. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0042926833&partnerID=40&md5=a7efa07ef44ef82cb0e0a3aba8b94e3c

Toledo, I., Pagán, J. I., López, I., & Aragonés, L. (2024). Nature-Based Approaches to Protect the Shoreline in Urban Environments: The Case of Benidorm (Spain). Advances in Science, Technology and Innovation, 11–18. https://doi.org/10.1007/978-3-031-65088-8_2

Torres-Hugues, R., & Córdova-López, L. (2010). Methodology for beach rehabilitation and protection; [Metodología para la rehabilitación y protección de playas]. Tecnologia y Ciencias Del Agua, 1(4), 149 – 155. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84896519665&partnerID=40&md5=54d89a8de1deac52447068f683f1f4f9

Uribe-Castañeda, N., Satizabal, C. A., Orozco, L. H., & Kintz, J. R. C. (2020). Ecosystems services vulnerability of Uramba Marine Protected Area; [Vulnerabilidad de los servicios ecosistémicos del área marina protegida Uramba]. Boletin de Investigaciones Marinas y Costeras, 49, 95 – 118. https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2020.49.SuplEsp.1055

Van de Graaff, J., & Koster, M. J. (1990). Dune and beach erosion and nourishment. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85041141951&partnerID=40&md5=cde37e29e99f40cb696108b883a34d9a

Wang, X.-C., Xin, P., Zhou, Z., & Zhang, F.-X. (2023). A systematic review of morphological models of salt marshes. Water Science and Engineering, 16(4), 313–323. https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.08.006

Woods, N. N., Kirschner, A., & Zinnert, J. C. (2023). Intraspecific competition in common coastal dune grasses overshadows facilitation on the dune face. Restoration Ecology, 31(4). https://doi.org/10.1111/rec.13870

Yu, J.-T., & Chen, Z.-S. (2011). Study on headland-bay sandy coast stability in South China coasts. China Ocean Engineering, 25(1), 1 – 13. https://doi.org/10.1007/s13344-011-0001-1

Zainuddin, S. N. H., Ariffin, E. H., Taslin, P. N. A., Dong, W. S., Ramli, M. Z., Abdul Maulud, K. N., Awang, N. A., Nadzri, M. I., Ibrahim, M. S. I., & Ratnayake, A. S. (2024). Sand dune restoration as sustainable natural architectural design for coastal protection along seasonal storm-prone beach. Results in Engineering, 22. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102149

Zamith, L. R., & Scarano, F. R. (2010). Restoration of a coastal swamp forest in southeast Brazil. Wetlands Ecology and Management, 18(4), 435 – 448. https://doi.org/10.1007/s11273-010-9177-z

Zêzere, J. L. (2023). GEOHAZARDS IN PORTUGAL: A STATE OF THE ART; [PERIGOS GEOMORFOLÓGICOS EM PORTUGAL: ESTADO DA ARTE]; [PELIGROS GEOMORFOLOGICOS EN PORTUGAL: ESTADO DEL ARTE]. Finisterra, 58(124), 7 – 27. https://doi.org/10.18055/Finis33142