



UNIVERSIDAD DE
MANIZALES®

**Análisis multitemporal de erosión y sedimentación costera en el municipio de
Dibulla, La Guajira entre los años 2010-2024**

Juan David Betancur García.
Cristian Fernando Burgos Palomino.
Mario Alberto Ramírez Moreno.
Rubén Andrés Tirado Rodríguez.

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

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

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual
Manizales, Caldas, Colombia
2025

Cita	(Betancur García et al., 2025)
Referencia	Betancur García, J. D.; Burgos Palomino, C. F.; Ramírez Moreno, M. A.; Tirado Rodríguez R. A. (2025). <i>Análisis multitemporal de erosión y sedimentación costera en el municipio de Dibulla, La Guajira entre los años 2010-2024</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual, II

Biblioteca y Centro de Recursos: biblioteca.umanizales.edu.co

Repositorio Institucional: ridum.umanizales.edu.co

Universidad de Manizales: umanizales.edu.co

Revistas: revistasum.umanizales.edu.co

Fondo Editorial: editorialum.umanizales.edu.co

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

Dedicatoria

Este logro no es solo nuestro, sino de todos los que nos sostuvieron en el camino. A Dios y a la vida, por habernos dotado de la salud, la resiliencia y la oportunidad de llegar hasta aquí.

A nuestras familias, el verdadero pilar de este esfuerzo. Su amor incondicional, los sacrificios silenciosos y la paciencia infinita frente a las largas ausencias fueron nuestro combustible. A ustedes les dedicamos cada línea, cada desvelo y el orgullo de esta meta alcanzada.

A nuestros compañeros de travesía y amigos, esos camaradas que compartieron las tensiones, las risas en medio de la crisis y los momentos de alivio. La camaradería y el apoyo mutuo hicieron estas jornadas mucho más llevaderas.

Finalmente, a la hermosa tierra de La Guajira, con la profunda esperanza de que nuestro trabajo sirva como una herramienta útil para la protección de su litoral y para la gestión sostenible de sus recursos naturales.

Agradecimientos

A nuestros amigos y compañeros de estudio: gracias por ser una red de apoyo invaluable. Su presencia se sintió en cada etapa de este proceso, no solo en las discusiones académicas que enriquecieron el trabajo, sino también en las palabras de aliento y, sobre todo, en esos momentos de distracción y humor que fueron vitales para mantener el equilibrio y la cordura durante esta larga jornada.

Un reconocimiento muy especial y nuestra gratitud más sincera a la ingeniera Ana María Giraldo Patiño. Su acompañamiento constante, paciencia inagotable y motivación firme fueron pilares fundamentales que hicieron posible la culminación de esta tesis.

Agradecemos profundamente a la vida por darnos la oportunidad de realizar este trabajo. Esperamos que este pequeño esfuerzo se convierta en una herramienta útil y concreta para el conocimiento y la sostenibilidad del litoral de La Guajira, contribuyendo efectivamente a la protección de nuestro medio ambiente.

Agradecimientos Mario Alberto Ramirez Moreno:

Agradezco profundamente a Dios, a mi madre Paulina, a mi esposa Loraine y a mi hijo Mario Emmanuelito, quienes me han acompañado y apoyado incondicionalmente en todos los ámbitos de mi vida

Agradecimientos Juan David Betancur García:

Agradezco primeramente a Dios; a Mercedes y Dorian, mis padres, quienes me han apoyado desde el amor a lograr todo mi crecimiento personal, profesional y laboral. Sin ellos nada sería posible.

Agradecimientos Rubén:

Expreso mi más sincero agradecimiento a Rubén, Carmen y Sergio y demás familia, por ser mi fuerza diaria, mi inspiración y el apoyo incondicional que jamás me ha faltado.

A mis dos ángeles, Libia y Rubén, quienes, aunque ya no me acompañan en este plano terrenal, permanecen en mi corazón. Su amor, sus enseñanzas y su presencia espiritual han sido pilares fundamentales en la consecución de este logro. Este triunfo también les pertenece.

Tabla de contenido

Resumen	10
Abstract	11
Introducción	12
1. Planteamiento del problema.....	14
1.1. Antecedentes	15
2. Justificación	26
3. Objetivos	28
3.1. Objetivo general	28
3.2. Objetivos específicos.....	28
4. Hipótesis	29
5. Marco teórico	30
5.1. Erosión y Sedimentación Costera.....	30
5.2. Procesos Geomorfológicos en el Litoral.	30
5.3. Enfoque multitemporal con SIG y teledetección	31
5.3.1. Análisis multitemporal de la línea de costa mediante imágenes satelitales.	32
5.4. Planificación Territorial	33
5.4.1. Ordenamiento del Territorio Costero y su Implicación en la Gestión de Riesgos.	34
5.5. Teorías relacionadas con la temática de estudio	36
5.5.1. Teoría de la dinámica costera y los procesos geomorfológicos	36
5.5.2. Dinámica de la Erosión y Sedimentación Costera: Factores Geomorfológicos y Climáticos.	36
5.6. Bases Legales	37
6. Metodología.....	40
6.1. Tipo de Investigación	41

6.2.	Diseño de la Investigación	41
6.3.	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	43
6.4.	Población, Muestra y Muestreo.....	48
6.5.	Procedimiento para recolección de datos.	49
7.	Resultados	50
7.1.	Análisis de los cambios en la línea de costa del municipio de Dibulla entre los años 2010 y 2024.....	50
7.2.	Caracterización de las zonas más Afectadas por Procesos de Erosión y Sedimentación 58	
7.3.	Estrategias de gestión costera basadas en los resultados obtenidos del análisis multitemporal	60
8.	Discusión.....	70
8.1.	Evolución de la línea costera entre 2010 y 2024.....	70
8.2.	Aplicación de índices espectrales (NDVI y NDWI)	72
8.3.	Comparación con la Literatura Existente	73
9.	Conclusiones	75
	Referencias	83

Lista de tablas

Tabla 1. Bases conceptuales	35
Tabla 2. Bases legales	38
Tabla 3. Diseño metodológico planteado	42
Tabla 4. Estrategias de gestión costera.....	66

Lista de figuras

Figura 1. Litoral del municipio de Dibulla año 2025.....	26
Figura 2. Urbanismo no planificado.....	29
Figura 3. Erosión del río en el litoral de Dibulla.....	31
Figura 4. Sector urbanístico municipio de la Dibulla.	33
Figura 5. Ubicación municipio de Dibulla, La Guajira.....	40
Figura 6. Uso herramienta USGS.....	43
Figura 7. Procesamiento NDWI.....	44
Figura 8. Índice Modificado de Agua de Diferencia Normalizada (MNDWI).....	45
Figura 9. Proceso desarrollo línea de costa.....	46
Figura 10. Transectos.....	48
Figura 11. Comparación multitemporal de las líneas de costa (2010–2024) en Dibulla, La Guajira.....	51
Figura 12. Evolución temporal de la línea de costa en transectos representativos.....	52
Figura 13. Tasa de Cambio Lineal (LRR) para el periodo 2010–2024.....	53
Figura 14. Erosión y Acreción.....	53
Figura 15. Desplazamiento Neto de la Costa (NSM) entre 2010 y 2024.....	54
Figura 16. Cambio Máximo de la Costa (SCE) registrado en el periodo 2010–2024.....	55
Figura 17. Estacionalidad de la línea de costa en transectos seleccionados.....	57

Siglas, acrónimos y abreviaturas

ANLA	Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (Entidad regulatoria ambiental en Colombia)
CDB	Convenio sobre la Diversidad Biológica
CM	Cambio Climático
DEM	Modelo Digital de Elevación (Digital Elevation Model)
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus (Sensor del satélite Landsat-7)
GPS	Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System)
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change)
MNDWI	Índice Modificado de Agua de Diferencia Normalizada (Modified Normalized Difference Water Index)
NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (National Aeronautics and Space Administration)
NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index)
NDWI	Índice de Agua de Diferencia Normalizada (Normalized Difference Water Index)
NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration)
PNN	Parques Nacionales Naturales (Si hiciste referencia a áreas protegidas)
POT	Plan de Ordenamiento Territorial
SBN	Soluciones basadas en la Naturaleza
SIG	Sistemas de Información Geográfica
UAV	Vehículo Aéreo No Tripulado (Unmanned Aerial Vehicle)
UNCLOS	Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar
UTM	Proyección Universal Transversa de Mercator (Universal Transverse Mercator)

Resumen

El objetivo central de esta investigación fue analizar la evolución de la erosión y sedimentación costera en el municipio de Dibulla, La Guajira (Colombia), durante el período 2010-2024. El estudio buscó caracterizar las zonas más vulnerables para proponer estrategias de gestión ambiental del litoral, aplicables por la administración municipal y otras entidades territoriales. Se optó por un método cuantitativo con un diseño no experimental, longitudinal y multitemporal. La metodología se basó rigurosamente en la teledetección y el análisis de datos geoespaciales. La recolección de información implicó el procesamiento de imágenes satelitales multitemporales (Landsat y Sentinel), utilizando técnicas como la clasificación supervisada y el análisis de índices espectrales (NDVI y NDWI) para delimitar la línea de costa en los años clave: 2010, 2015, 2020 y 2024.

El análisis multitemporal evidenció un retroceso generalizado de la línea de costa en Dibulla durante el periodo estudiado. Los procesos de erosión más significativos se localizaron específicamente en áreas con alta presencia poblacional, como zonas urbanizadas y turísticas. Es importante notar que, en contraste, se identificaron procesos localizados de sedimentación cerca de las desembocaduras fluviales, aunque en menor magnitud. La precisión de la metodología geoespacial permitió caracterizar con exactitud estas zonas de alta vulnerabilidad.

Palabras clave: erosión costera, sedimentación, Dibulla, teledetección, SIG, análisis multitemporal

Abstract

The central objective of this research was to analyze the evolution of coastal erosion and sedimentation in the municipality of Dibulla, La Guajira (Colombia), over the period 2010–2024. The study aimed to characterize the most vulnerable zones and propose sound strategies for coastal environmental management, which can be utilized by municipal administration and other departmental and/or national entities.

A quantitative method was employed, utilizing a non-experimental, longitudinal, and multitemporal design. The methodology relied rigorously on remote sensing and geospatial data analysis. Data collection involved processing multitemporal satellite imagery (Landsat and Sentinel), using techniques such as supervised classification and spectral index analysis (NDVI and NDWI) to delimit the coastline for the key years: 2010, 2015, 2020, and 2024.

The multitemporal analysis evidenced a generalized retreat of the coastline in the municipality of Dibulla during the study period. The most significant erosion processes were specifically located in areas with high population density, such as urbanized and tourist zones. Notably, localized sedimentation processes were identified near river mouths, albeit to a lesser extent. The precision of the geospatial methodology allowed for the accurate characterization of these highly vulnerable zones..

Keywords: coastal erosion, sedimentation, Dibulla, remote sensing, GIS, multitemporal analysis.

Introducción

En el municipio de Dibulla, ubicado en La Guajira, Colombia, estos procesos han generado modificaciones significativas en el litoral, afectando tanto a las comunidades humanas como a la biodiversidad costera. La dinámica costera en esta región ha sido moldeada por una combinación de factores naturales, como la variabilidad climática, y actividades humanas, como el urbanismo y el turismo, lo que ha intensificado los efectos negativos de la erosión y sedimentación. Ante este escenario, resulta crucial entender las variaciones que la línea de costa ha experimentado en los últimos años para poder implementar estrategias eficaces de gestión y conservación.

La presente investigación tiene como objetivo analizar la evolución de la erosión y sedimentación costera en Dibulla entre los años 2010 y 2024, mediante un enfoque multitemporal utilizando herramientas de teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG). Este estudio busca identificar los cambios en la línea de costa, caracterizar las zonas más afectadas y proponer soluciones que contribuyan a la preservación del litoral y a la mitigación de los impactos de estos procesos en la región. A través del uso de imágenes satelitales y análisis geospaciales, se pretende obtener una visión detallada de las dinámicas de erosión y sedimentación, lo que permitirá mejorar la planificación territorial y la gestión ambiental en el área.

El análisis multitemporal resulta particularmente adecuado para este tipo de estudios, ya que permite observar las transformaciones en la línea de costa a lo largo del tiempo, identificando las áreas más vulnerables a la erosión y sedimentación. Además, el uso de tecnologías avanzadas como los SIG y la teledetección proporciona una herramienta precisa y objetiva para monitorear los cambios costeros, lo que representa un avance significativo respecto a los métodos tradicionales de análisis. Este enfoque no solo facilita la caracterización de los procesos erosivos y sedimentarios, sino que también permite anticipar futuros escenarios y definir acciones que favorezcan la sostenibilidad del litoral.

Los resultados obtenidos a partir de este estudio servirán como base para la implementación de estrategias de gestión costera que promuevan la restauración de los ecosistemas naturales y la regulación del desarrollo humano en áreas críticas. A través de la integración de los conocimientos sobre la dinámica costera y la intervención humana, se podrá diseñar un marco de gestión que permita mitigar los efectos negativos de la erosión, conservando los recursos naturales y

protegiendo las comunidades costeras ante futuros riesgos. La importancia de esta investigación radica en proporcionar una comprensión de la evolución de los procesos de erosión y sedimentación en Dibulla, lo cual contribuirá a la toma de decisiones informadas para la gestión sostenible del litoral. Al integrar herramientas de SIG y teledetección con un análisis multitemporal, se busca no solo identificar las zonas más afectadas, sino también proponer soluciones eficaces que aseguren la protección del medio ambiente costero en el largo plazo

1. Planteamiento del problema

Este estudio analiza los procesos de erosión y sedimentación costera en el municipio de Dibulla, La Guajira, entre 2010 y 2024. Estos procesos afectan al litoral, modifican la línea de costa y representan un riesgo ecológico y socioeconómico para la zona. La investigación hace uso de herramientas de teledetección y SIG para profundizar sobre los cambios multitemporales en la región. Se espera que a través de dicho análisis se posibilite reconocer cuáles son las zonas vulnerables y proponer planes de gestión territorial para favorecer la conservación del litoral. La importancia de este estudio radica en la necesidad de entender la dinámica del litoral para aplicar de forma efectiva políticas de mitigación.

Descripción de la Problemática

La erosión y sedimentación costera representan una amenaza significativa para los ecosistemas y comunidades del municipio de Dibulla, en La Guajira, donde la línea de costa ha mostrado un retroceso progresivo en los últimos años. Estos procesos se originan tanto por factores naturales (como la acción de las olas, el viento y las variaciones climáticas), como por actividades humanas relacionadas con la urbanización y la explotación de recursos. La modificación de la cobertura del suelo y el desarrollo turístico han alterado los patrones de sedimentación, afectando la estabilidad de las playas y reduciendo su capacidad de recuperación.

Novaes et al. (2024) destacan que los indicadores de vulnerabilidad son esenciales para la planificación territorial, mientras que Sandoval et al. (2021) evidencian que los cambios en el uso del suelo agravan los procesos erosivos. De manera similar, Garzo et al. (2023) demostraron en Buenos Aires cómo la presión humana acelera la pérdida de terrenos costeros, una situación comparable a la de Dibulla, donde los procesos de erosión y sedimentación ponen en riesgo el equilibrio ambiental y las actividades económicas locales.

En este contexto, la aplicación de tecnologías como la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se presenta como una herramienta clave para el seguimiento y análisis de los cambios en la línea de costa (Gomes et al., 2022). Estudios recientes resaltan la necesidad de integrar medidas naturales y tecnológicas para mitigar los impactos de la erosión (Cámara et al., 2023; Perricone et al., 2023). Sin embargo, en Dibulla persiste la ausencia de investigaciones multitemporales que evalúen cómo estos procesos han evolucionado a lo largo del

tiempo. Comprender la interacción entre la hidrodinámica, las actividades humanas y los factores naturales (Vallarino et al., 2023) resulta fundamental para formular estrategias de manejo costero que garanticen la sostenibilidad ecológica, social y económica del litoral

1.1. Antecedentes

En el desarrollo del presente proyecto de investigación, se llevará a cabo una revisión de los antecedentes significativos en cuanto a la erosión y sedimentación costera, tanto a nivel internacional como nacional. Entre otras consideraciones, se analizará también aquellos trabajos que se ocupan de los efectos del cambio climático en los litorales y de la forma como estas investigaciones ayudan a la comprensión de la dinámica costera. El examen de aquellos antecedentes ayudará a establecer el contexto de la investigación que se presenta en el trabajo y permitirá hacer ver las metodologías y enfoques más adecuados para llevarla a cabo.

Antecedentes Internacionales

El estudio de Villarreal (2024), titulado Implicancia de los procesos eólicos y lagunares en el modelado del paisaje y su relación con el uso del suelo en la estepa de Tierra del Fuego, realizado en la Universidad Nacional del Sur, Argentina, analiza cómo los procesos eólicos y lagunares afectan la geografía de la estepa fueguina. A través de un análisis detallado de la dinámica de los vientos, las lagunas y los sedimentos, se identificaron geoformas de origen eólico en las periferias de las lagunas, asociadas principalmente a la deflación y los vientos predominantes. Los resultados muestran que los procesos de deflación y sedimentación están condicionados por la falta de agua y la influencia de los vientos, impactando el uso del suelo, especialmente en la actividad ganadera. Este antecedente se vincula con mi investigación al estudiar cómo los procesos naturales condicionan las actividades productivas en zonas costeras y su relación con la gestión ambiental y territorial.

El estudio de Santamaría (2021), titulado Identificación y estudio de los minerales contenidos en los placeres marinos de la costa atlántica de Tierra del Fuego, Argentina, realizado en la Universidad Nacional de La Plata, Argentina, investiga la composición, procedencia y génesis de los yacimientos de tipo “placer” en las playas de la costa atlántica nororiental de la Isla Grande de Tierra del Fuego. Utilizando muestreos sistemáticos en playas, depósitos glaciogénicos y la

Plataforma Continental, se identificaron minerales pesados como granates, óxidos de Fe y Ti, y oro. Los resultados revelaron que los depósitos están asociados principalmente a eventos de oleaje de tormenta y a procesos glaciales que transportaron grandes cantidades de material hacia la costa. Este antecedente se vincula con mi investigación al abordar los procesos sedimentarios costeros y su impacto en la distribución de recursos naturales en áreas costeras.

El estudio de Espinosa (2023), titulado Evaluación geoambiental del litoral de Santa Fe, municipio Playa, La Habana, realizado en la Universidad de La Habana, aborda la degradación ambiental en el litoral de Santa Fe, un área del municipio Playa. A través de la aplicación de un enfoque geocológico, la investigación analiza factores como la interacción entre la población y el entorno, destacando la pérdida de zonas de manglar y el crecimiento desordenado de las áreas urbanas. Los resultados muestran que la degradación del entorno se ha acelerado debido a la falta de planificación territorial, lo que ha afectado la organización espacial y los servicios ecosistémicos de la zona. Este antecedente se vincula con mi investigación al abordar los impactos de la urbanización y el cambio climático sobre los ecosistemas costeros, con énfasis en la gestión y ordenamiento del territorio.

El estudio de Truchet (2022), titulado Implementación de indicadores de alerta temprana en programas integrales de estudio de contaminación en ambientes marinos costeros y estuariales, realizado en la Universidad Nacional del Sur, Argentina, analiza la contaminación por metales pesados en sedimentos y en la hepatopáncreas del cangrejo *Neohelice granulata*, un biomonitor de ecosistemas costeros. La investigación evaluó las concentraciones de metales (Cd, Cu, Zn, Pb, Ni, Mn, Cr, Fe) en tres sitios del estuario de Bahía Blanca, aplicando varios indicadores bioquímicos como metalotioneínas (MT), catalasa (CAT) y glutatión-S-transferasa (GST). Los resultados mostraron que *N. granulata* es efectivo para monitorear la contaminación por metales, pero las MT no fueron útiles como biomarcadores, aunque sí funcionaron como defensa antioxidante. Este antecedente se vincula con mi investigación, al abordar los efectos de los contaminantes en los ecosistemas costeros y el uso de especies clave para su monitoreo.

El estudio de Meléndez (2024), titulado Análisis multitemporal de la dinámica de cobertura del manglar del estero de Puntarenas mediante la teledetección para el período 1974-2024, realizado en la Universidad de Costa Rica, analiza los cambios en los manglares de la región de Puntarenas utilizando imágenes satelitales y herramientas de teledetección. A través de índices

espectrales como el NDVI y MVI, y la técnica de clasificación supervisada Support Vector Machine (SVM), el estudio cuantifica las pérdidas y ganancias de manglares en un periodo de 50 años. Los resultados indican que, aunque hubo una pérdida significativa en las primeras décadas, a partir de 1999 se observó una recuperación notable gracias a políticas de conservación. Este antecedente se vincula con mi investigación al tratar sobre los impactos de la erosión y la intervención humana en los ecosistemas costeros y la necesidad de implementar estrategias de conservación y restauración.

El estudio de Carrera (2020), examina el impacto de la erosión costera en el desarrollo de proyectos residenciales en el Balneario de Buenos Aires, zona norte de Perú. Mediante una investigación correlacional y un análisis cualitativo con una muestra de 155 personas, incluyendo pobladores, empresarios y funcionarios públicos, se determina que la erosión costera severa afecta negativamente la viabilidad de los proyectos residenciales. El análisis estadístico reveló que la erosión disminuye considerablemente el desarrollo inmobiliario debido a la alteración geomorfológica del suelo y la vulnerabilidad de la zona. Este trabajo, realizado en el marco de una maestría, es relevante para mi investigación, ya que ambos abordan el impacto de la erosión costera en el desarrollo urbano. Los resultados subrayan la necesidad de intervenciones urbanas y de ingeniería para mitigar los efectos negativos.

El estudio de Quispe (2020), analiza la desvalorización del terreno urbano en el sector Playa Acapulco, en el distrito de Moche, debido a la erosión costera y su impacto en el desarrollo inmobiliario. Mediante un enfoque mixto y un diseño explicativo, se recogieron datos de 168 familias y 25 empresarios del sector construcción, concluyendo que la erosión ha reducido significativamente el área de playa, lo que ha desincentivado la inversión en proyectos residenciales y turísticos. La erosión, que ha afectado alrededor de 53,295 m² en los últimos 20 años, ha causado una pérdida de valor en los terrenos, perjudicando tanto a los residentes como a los empresarios. Este estudio se relaciona con mi investigación al tratar sobre los efectos de la erosión costera en el desarrollo urbano y la viabilidad de proyectos en zonas costeras.

El estudio de Laguna (2021), titulado Relación de la Comunidad de Cangrejos con los Procesos Erosivos de la Playa Puerto Vargas, Parque Nacional Cahuita, Limón, Para el Planteamiento de Acciones de Conservación, realizado en la Universidad Nacional de Costa Rica, explora cómo la erosión costera afecta a la comunidad de cangrejos en la playa Puerto Vargas. A

través de trabajo de campo y análisis estadísticos, se encontró que la abundancia de cangrejos está correlacionada con los procesos erosivos, influenciada por factores como la pendiente y la temperatura. Este estudio se vincula con mi investigación al abordar cómo los procesos erosivos impactan el ecosistema costero y las estrategias de conservación necesarias.

El estudio de Llanos (2021), titulado Impacto de la intervención humana en el flujo de sedimentos de la cuenca del río Yuna y sus efectos en el Parque Nacional Manglares del Bajo Yuna, República Dominicana, realizado en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), aborda cómo las actividades humanas alteran el flujo de sedimentos en la cuenca del río Yuna, afectando negativamente al ecosistema de manglares.

Este trabajo de maestría utiliza herramientas como imágenes satelitales, SIG y el software INVEST para evaluar el impacto de la deforestación, la falta de gestión y el aumento de la carga sedimentaria en la zona. Los resultados muestran un incremento del 221% en la carga de sedimentos debido a la intervención humana, lo que pone en riesgo el manglar. Esta investigación se vincula con mi trabajo, ya que ambos analizan los efectos de la intervención humana en los ecosistemas costeros y la necesidad de un manejo adecuado de los recursos naturales.

El estudio de Pazos (2021), titulado Estudio de microplásticos en la columna de agua, sedimento intermareal y biota residente en la costa del estuario del Río de la Plata (Franja Costera Sur), realizado en la Universidad Nacional de La Plata, Argentina, analiza la distribución y los efectos de los microplásticos (MPs) en el estuario del Río de la Plata. Esta tesis doctoral evalúa la presencia de MPs en tres compartimentos: columna de agua, sedimentos y biota, a lo largo de 150 km de costa, abarcando diez sitios con distintos usos del suelo. Los resultados muestran que los MPs están ampliamente distribuidos, con mayores concentraciones cerca de áreas urbanas, especialmente en la zona intermareal y en peces costeros. Este trabajo se relaciona con mi investigación al abordar los efectos del contaminante emergente, los microplásticos, en ecosistemas costeros y la necesidad de estudios más detallados sobre su impacto ecológico.

El estudio de Becerra (2023), titulado Caracterización de la ganadería bovina y sus impactos socioambientales en la cuenca del Río Arroyo Seco, municipios de Cihuatlán y Cuautitlán de García Barragán, Jalisco, México, realizado en el Centro Universitario de la Costa Sur de la Universidad de Guadalajara, se enfoca en los sistemas de producción ganadera en la cuenca del Río Arroyo Seco, Jalisco. Este trabajo de maestría identificó tres perfiles de ganaderos:

complementario, en transición y maximizador, a partir de entrevistas y análisis de variables socioeconómicas y ecológicas. Los resultados indicaron que la ganadería extensiva genera impactos significativos como deforestación, erosión y emisión de gases de efecto invernadero. Este antecedente se vincula con mi investigación, pues ambos estudios analizan los efectos de las actividades agropecuarias en el medio ambiente, con un enfoque en la gestión sostenible de las cuencas costeras.

El estudio de Andreoli (2024), titulado Estudio morfodinámico y de las secuencias sismoestratigráficas cuaternarias de la plataforma marina adyacente al estuario de Bahía Blanca, realizado en la Universidad Nacional del Sur (Argentina), se enfoca en el análisis geológico del fondo marino y subsuelo de la región cercana al estuario de Bahía Blanca. Este trabajo de doctorado emplea diversas técnicas como relevamientos sismoacústicos, sonar de barrido lateral y perfilador sísmico de alta resolución, para identificar rasgos geomorfológicos, sedimentológicos y las secuencias sísmicas del subsuelo. Los resultados indican la existencia de terrazas marinas antiguas asociadas a variaciones en el nivel del mar, y la identificación de una gran reserva de gas somero en la cuenca. Este estudio se vincula con mi investigación al abordar los procesos sedimentológicos en zonas costeras y su influencia en la morfodinámica del estuario.

El estudio de Aguilar (2021), titulado Evaluación de la opresión costera en Mazatlán, Sinaloa, realizado en la Universidad Nacional Autónoma de México, se centra en la dinámica de la opresión costera en una zona altamente urbanizada como Mazatlán. Este trabajo de doctorado utiliza una metodología basada en el ciclo DESCR (Drivers, Exchanges, States of the environment, Consequences, and Responses) y análisis de la Capacidad de Carga Turística (CCT) para evaluar cómo el aumento del nivel del mar, la urbanización y los eventos meteorológicos extremos afectan la zona costera. Los resultados muestran que Mazatlán experimenta opresión costera de baja a media intensidad, y se proyecta que aumente significativamente para el año 2100. Este estudio se vincula con mi investigación al abordar la opresión costera en áreas costeras turísticas y la necesidad urgente de un manejo sostenible.

El estudio de Escamilla (2023), titulado Bases para la planeación espacial de la zona costera de los municipios de Guaymas y Empalme, Sonora, México: Enfoque basado en el ecosistema, realizado en el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), tiene como objetivo evaluar la diversidad y los riesgos ecológicos de los ecosistemas costeros de la región para

aplicarlos en la planeación costera. Utilizando un enfoque basado en encuestas a expertos y análisis de los ecosistemas presentes (playas, manglares, pastos marinos, entre otros), se identificaron amenazas como el vertimiento de aguas residuales, la pesca ilegal y la infraestructura costera. Los resultados mostraron que los manglares y cuerpos de agua costeros están en mayor riesgo debido a estas actividades y al cambio climático. Este antecedente se vincula con mi investigación, ya que ambos abordan la importancia de planificar la zona costera para asegurar su sostenibilidad frente a las amenazas humanas y naturales.

El estudio de Vega (2021), titulado *Granulometría y geoquímica de sedimentos detríticos de las playas Tecolutla y Coatzacoalcos del Golfo de México*, realizado en la UNAM, analiza la granulometría, mineralogía y geoquímica de los sedimentos de estas playas. La investigación identifica la procedencia de los sedimentos y la contaminación por metales pesados como Cu, Pb y Zn, encontrando un mayor nivel de contaminación por Cu en Tecolutla, lo que sugiere un origen antropogénico. En contraste, los sedimentos de Coatzacoalcos presentaron menores niveles de contaminación. Este antecedente se vincula con mi investigación al examinar la relación entre la contaminación por metales pesados y la procedencia de los sedimentos.

Las investigaciones internacionales revisadas coinciden en que los cambios en las zonas costeras son el resultado de una compleja interacción entre la naturaleza y las actividades humanas. Trabajos como los de Villarreal (2024) y Santamaría (2021) muestran cómo factores naturales, como el viento, las corrientes marinas y los procesos glaciales, influyen directamente en la forma del paisaje y en la distribución de los sedimentos. Estos estudios dejan ver que los procesos naturales no solo transforman la geografía costera, sino que también afectan los usos del suelo y las actividades productivas que dependen de ella.

Por otra parte, Espinosa (2023), Carrera (2020) y Quispe (2020) puntualizan en que la urbanización acelerada y el desarrollo turístico sin planificación agravan la erosión costera, reducen la estabilidad del terreno y ponen en riesgo tanto los ecosistemas como la economía local. Dicho de otro modo, estos antecedentes respaldan la necesidad de realizar un análisis multitemporal de la erosión y la sedimentación costera en Dibulla, La Guajira (2010–2024), que permita entender cómo ha cambiado su línea de costa y qué factores naturales o humanos están detrás de esa transformación.

Antecedentes Nacionales

Primeramente, el estudio de Guerrero (2022), titulado Análisis de estado de falla geotécnica por acciones hidrodinámicas en el Tajamar Occidental de Bocas de Ceniza, de Barranquilla, se enfoca en la estabilidad geotécnica del dique enrocado que canaliza el Río Magdalena en Barranquilla. Utilizando modelos matemáticos dentro de un análisis probabilístico, el estudio evalúa el comportamiento del suelo y su interacción con el agua, con el fin de determinar la probabilidad de falla de la estructura ante las sollicitaciones hidrodinámicas. Los resultados muestran que la inestabilidad del talud en el Tajamar Occidental podría generar fallas geotécnicas que afecten la navegabilidad en el canal hacia el Puerto de Barranquilla. Este antecedente se vincula con mi investigación, al abordar la relación entre las dinámicas hidrodinámicas y los riesgos geotécnicos en infraestructuras costeras.

En esta misma línea de investigación, el estudio de Jaramillo (2022), titulado El turismo frente a los principales efectos del cambio climático durante el siglo XXI. Estudio de caso: municipio de Santa Marta, Colombia, realizado en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, evalúa los efectos del cambio climático sobre el sector turístico en Santa Marta. A través de un análisis basado en datos hidrometeorológicos, imágenes satelitales y trabajo de campo, el estudio aborda el ascenso del nivel medio del mar y el impacto sobre el abastecimiento de agua. Los resultados muestran que la principal vulnerabilidad del turismo se concentra en las playas y la infraestructura turística, con implicaciones en la modalidad de turismo asociado al sol y playa. Este antecedente se vincula con mi investigación, ya que ambos estudios analizan los efectos del cambio climático en áreas costeras y su impacto en sectores económicos clave.

Por otro lado, el estudio de Durán (2025), titulado Análisis geomorfoestructural de los rasgos asociados con el diapirismo de lodo en el talud continental costa afuera de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe colombiano, se enfoca en caracterizar la geomorfología y morfometría de las geoformas submarinas en el margen Caribe colombiano. Utilizando datos batimétricos de alta resolución y análisis cuantitativos, se identificaron 48 estructuras asociadas al diapirismo de lodo, como volcanes de lodo constructivos y pockmarks. Los resultados muestran que los volcanes de lodo están controlados por sobrepresión sedimentaria y fallas tectónicas, mientras que los pockmarks son depresiones relacionadas con escapes de fluidos. Este antecedente se vincula con mi investigación al estudiar cómo los procesos geomorfológicos y tectónicos influyen en las

dinámicas costeras y marinas, lo cual es clave para la planificación y gestión ambiental en zonas costeras.

Del mismo modo, el estudio de Durán Márquez (2025), titulado Análisis geomorfoestructural de los rasgos asociados con el diapirismo de lodo en el talud continental costa afuera de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe colombiano, se enfoca en la caracterización de las geoformas submarinas en el Caribe colombiano relacionadas con procesos de diapirismo de lodo. Utilizando datos batimétricos de alta resolución, se identificaron dos tipos principales de estructuras: volcanes de lodo constructivos y pockmarks. El estudio reveló que las primeras, controladas por sobrepresión sedimentaria, tienen morfometrías elongadas, mientras que los pockmarks son depresiones asociadas a escapes de fluidos. Este trabajo se vincula con mi investigación al estudiar cómo los procesos tectónicos y sedimentarios afectan las dinámicas costeras, lo que tiene implicaciones para la gestión del territorio y la evaluación de riesgos.

El estudio de García (2021), titulado Clima marítimo, procesos de erosión/acreción y amenazas/vulnerabilidades por erosión: caso de estudio de la barrera costera de Puerto Velero, Departamento del Atlántico, realizado en la Universidad del Atlántico (Colombia), aborda la evolución de la costa de Puerto Velero entre 1979 y 2018. Este trabajo de maestría tiene como objetivo analizar cómo el oleaje y los vientos afectan los procesos de erosión y acreción en la zona, utilizando herramientas geoespaciales como imágenes satelitales y ArcGIS Pro. Los resultados muestran que la erosión ha predominado en los últimos años, afectando la espiga de Puerto Velero y la ciénaga de Balboa. Este estudio se vincula con mi investigación, ya que ambos abordan el impacto de los procesos costeros en la sostenibilidad y la gestión del litoral.

En cuanto al estudio de Quintero (2023), titulado Análisis hidrológico de una cuenca costera del Río Guachaca del departamento de Magdalena: relación entre su comportamiento y la morfología de sus playas, realizado en la Universidad del Norte, Colombia, se enfoca en entender cómo las variaciones hidrológicas del río Guachaca impactan la morfología de las playas cercanas. Este trabajo de maestría emplea un enfoque de modelación utilizando el software Delf3D para estudiar la distribución de sedimentos y la erosión en la zona costera, observando cómo las corrientes marinas y el oleaje influyen en estos procesos. Los resultados indican que la dirección del oleaje juega un papel crucial en la erosión y sedimentación en el área de estudio. Esta

investigación se vincula con mi trabajo, ya que ambos abordan cómo factores hidrológicos y oceanográficos afectan las zonas costeras, especialmente en términos de erosión.

Por otra parte, el estudio de Daza (2022), titulado Aplicación de modelos matemáticos de transporte de sedimentos para la estimación de cambios morfológicos en las playas de Ciénaga, Magdalena, realizado en el contexto de una maestría en Ingeniería Civil, se centra en la evaluación de los cambios morfológicos en la playa de Costa Verde, Ciénaga-Magdalena. Utilizando modelos matemáticos para estimar el transporte longitudinal y transversal de sedimentos, el estudio emplea información climática marítima para evaluar la evolución del perfil de la playa y su balance sedimentario. Los resultados muestran un déficit en el volumen de arena, lo que indica un proceso erosivo significativo. Este trabajo se vincula con mi investigación al abordar el impacto de la dinámica sedimentaria en las playas costeras y su relación con la erosión.

El estudio de García (2021), titulado Vulnerabilidad costera en cuatro sitios del suroeste del Caribe Colombiano ante el ascenso del nivel del mar, realizado en la Universidad de Antioquia, se enfoca en la evaluación de la vulnerabilidad costera en diversas localidades del litoral Antioqueño debido al aumento del nivel del mar. Este trabajo de maestría utiliza índices de Vulnerabilidad Costera, Ecológica y Socioeconómica para analizar los sitios de Volcán de Lodo, Río Hobo, Zapata y Punta Las Vacas, empleando imágenes satelitales, fotografías aéreas y datos in situ. Los resultados indican que la mayor parte de la costa en Volcán de Lodo y Río Hobo presenta vulnerabilidades altas a muy altas, con tasas de erosión de hasta 10 m/año. Este antecedente se vincula con mi investigación al abordar los efectos del ascenso del nivel del mar en las zonas costeras y la necesidad de implementar medidas de gestión ante el cambio climático.

El estudio de Díaz (2022), titulado Análisis de los procesos hidrodinámicos y sedimentológicos en la desembocadura del Río Magdalena a partir de modelación computacional, realizado en el marco de una maestría en Ingeniería Civil, se enfoca en la variabilidad de la intrusión salina en la desembocadura del río Magdalena. A través de modelación computacional, el autor calibra y valida el modelo con datos de campo para predecir la localización de la intrusión salina en función del caudal del río. Además, el estudio examina su impacto en el canal navegable y el transporte de sedimentos, lo que afecta tanto la bocatoma de captación como las condiciones para la navegación. Este antecedente se relaciona con mi investigación al abordar la influencia de los procesos hidrodinámicos y el transporte de sedimentos en áreas costeras críticas.

El estudio de Urrutia (2025), titulado Evaluación del desempeño de las herramientas hidrológicas HYDROBID Y HEC – HMS en la estimación de caudales máximos mensuales en las regiones del Valle del Cauca y Tolima, realizado en la Universidad Nacional de Colombia, evalúa la capacidad de estos modelos para estimar caudales máximos en las cuencas de los ríos Coello y Dagua. Utilizando datos históricos de caudales y criterios de desempeño, el estudio muestra que HEC-HMS presentó un mejor ajuste en comparación con HYDROBID, especialmente en la simulación de caudales extremos. Sin embargo, ambos modelos mostraron limitaciones significativas debido a la calidad de los datos y la calibración de los parámetros. Este antecedente se vincula con mi investigación, ya que ambos análisis buscan optimizar la precisión de los modelos hidrológicos en cuencas específicas, contribuyendo a la gestión del riesgo hídrico.

Finalmente, el estudio de Morelo Muñoz (2024), titulado Influencia de la energía del oleaje incidente sobre las comunidades bentónicas en la plataforma calcárea de los Bajos de Punta Caribana, Necoclí (Colombia), realizado en la Universidad de Antioquia, se centra en cómo la energía del oleaje, modificada por los Bajos de Punta Caribana, afecta las comunidades bentónicas en la región del Golfo de Urabá. Utilizando sensores de presión in situ y datos del modelo “Delft3D”, el estudio evaluó la dirección, energía y disipación del oleaje, y su relación con la cobertura de las comunidades bentónicas. Los resultados mostraron que, aunque el oleaje se ve reducido en el costado oriental de los Bajos, la diferencia energética no afectó de manera directa la cobertura de la comunidad bentónica, excepto en el caso de las esponjas, cuya cobertura fue significativamente mayor en el costado occidental. Este antecedente se vincula con mi investigación, ya que ambos abordan los impactos de factores hidrodinámicos en los ecosistemas costeros.

En el contexto colombiano, distintos estudios han aportado al entendimiento de los procesos costeros y sus implicaciones ambientales. Guerrero (2022) y Díaz (2022) analizaron la influencia de las dinámicas hidrodinámicas y del transporte de sedimentos en la estabilidad de estructuras y zonas de desembocadura fluvial, mientras que Daza (2022), Quintero (2023) y García (2021) mostraron cómo el oleaje, las corrientes y el viento han intensificado la erosión en playas del Caribe colombiano. Por su parte, Jaramillo (2022) y García (2021) evidenciaron los efectos del cambio climático y el ascenso del nivel del mar sobre la infraestructura costera y el turismo, alertando sobre la necesidad de gestión y adaptación.

Asimismo, Durán (2025), Durán Márquez (2025) y Morelo Muñoz (2024) exploraron procesos geomorfológicos y marinos, mientras que Urrutia (2025) aplicó modelos hidrológicos para la predicción de caudales extremos. Finalmente, estos trabajos reflejan la importancia de comprender la interacción entre los factores naturales y antrópicos en la transformación del litoral, fundamento esencial para el análisis multitemporal de la erosión y sedimentación costera en Dibulla, La Guajira (2010–2024).

2. Justificación

En el municipio de Dibulla, La Guajira, la erosión y la sedimentación costera se han convertido en un problema que afecta visible y considerablemente tanto al entorno natural como a la vida de las comunidades que habitan cerca del mar. Cada año se observan cambios en la línea de costa, pérdida de playas y alteraciones en los ecosistemas marinos, consecuencias de la acción combinada del oleaje, las lluvias, el viento y, sobre todo, de la intervención humana. La construcción sin planificación, la tala de vegetación y el uso inadecuado del suelo han acelerado estos procesos, comprometiendo la estabilidad del territorio y la economía local basada en actividades como la pesca y el turismo. Ante este panorama, surge la necesidad de comprender cómo ha cambiado el litoral de Dibulla en los últimos años y qué factores están impulsando esas transformaciones.

Figura 1.

Litoral del municipio de Dibulla año 2025.



Nota: Fuente elaboración propia

Este estudio se justifica porque busca analizar, a través de un enfoque multitemporal, los cambios que ha experimentado la costa de Dibulla entre 2010 y 2024. Mediante el uso de imágenes

satelitales y herramientas de sistemas de información geográfica (SIG), se podrá identificar con precisión la evolución de la línea de costa y los patrones de erosión y sedimentación. Contar con esta información permitirá no solo conocer el estado actual del litoral, sino también anticipar posibles escenarios futuros y aportar evidencia científica útil para la toma de decisiones en materia de planificación ambiental y gestión del territorio.

La importancia y viabilidad de esta investigación radica en que, hasta ahora, no existen estudios locales que documenten de manera detallada los cambios morfológicos de la costa de Dibulla a lo largo del tiempo. Por eso, los resultados podrán servir de apoyo a las autoridades ambientales, a las instituciones educativas y a la comunidad misma para diseñar estrategias sostenibles que ayuden a reducir los efectos de la erosión y a conservar los ecosistemas costeros. En definitiva, este trabajo investigativo busca contribuir al conocimiento y a la protección del litoral guajiro, ofreciendo una herramienta técnica y práctica que promueva un desarrollo más equilibrado entre el ser humano y su entorno natural.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Analizar de manera multitemporal la erosión y sedimentación costera en el municipio de Dibulla, La Guajira, entre los años 2010–2024.

3.2. Objetivos específicos

Identificar los cambios en la línea de costa del municipio de Dibulla entre los años 2010 y 2024, utilizando imágenes satelitales y datos geoespaciales procesados mediante SIG.

Caracterizar las zonas más afectadas por procesos de erosión y sedimentación en el litoral de Dibulla, a través de técnicas de teledetección y análisis multitemporal con SIG.

Evaluar la relación entre los procesos de erosión y sedimentación identificados y los factores naturales y antrópicos que influyen en la dinámica costera del municipio de Dibulla.

4. Hipótesis

La hipótesis del presente trabajo de investigación postula que la erosión costera observada en el litoral del municipio de Dibulla, La Guajira, durante el período 2010-2024, no es un fenómeno puramente natural. Sino que, por el contrario, la evidencia sugiere que este proceso ha sido intensificado de manera significativa por el urbanismo no planificado y el desarrollo turístico en la zona. Esta relación se verifica al demostrar que las tasas más altas de retroceso de la línea de costa se localizan precisamente en aquellas áreas con mayor intervención humana, un patrón que logramos establecer y cuantificar gracias al análisis multitemporal con SIG y teledetección.

Figura 2.
Urbanismo no planificado



Nota. Fuente elaboración propia

5. Marco teórico

El presente marco teórico se enfoca en la definición de la base conceptual de esta investigación sobre erosión y sedimentación costera. Se inicia con la exposición de los conceptos básicos de los procesos geomorfológicos que afectan el litoral, que son la clave para entender la dinámica de Dibulla. Además, es crucial explicar los conceptos de la planificación territorial y la gestión ambiental para afrontar los impactos de estos procesos en las zonas costeras. Lo anterior permitirá ofrecer una visión integral y necesaria para el estudio.

5.1. Erosión y Sedimentación Costera

La erosión costera es un proceso natural, pero su intensidad ha aumentado debido a las actividades humanas. Según Rodríguez et al. (2020) expresan que, en América del Norte, la sedimentación costera aumentó en el siglo XX debido a las presas, que cambiaron el orden de flujo de los sedimentos, e incrementaron la erosión de las costas receptoras. La erosión costera provoca la pérdida de hábitats y afecta a la infraestructura costera. La erosión costera y la sedimentación son relevantes para entender cómo los cambios en los sistemas fluviales impactan a las costas, siendo evidente en las costas de Dibulla.

No sólo la intervención humana afectará al suministro de sedimentos, sino que también alterará el estado de la morfología costera. Para Souza et al. (2021), la cartografía geomorfológica es fundamental en el manejo costero, dada su importancia para identificar las áreas vulnerables a la erosión, y la posibilidad de realizar la toma de decisiones de la planificación territorial para ayudar a mitigar los efectos negativos de la erosión. En el caso de Dibulla, esta misma cartografía podría pasar a ser utilizada para identificar las zonas de alto riesgo y las intervenciones que sirvan para intentar disminuir los impactos de la erosión costera.

5.2. Procesos Geomorfológicos en el Litoral.

Los procesos geomorfológicos, como lo son la erosión y la sedimentación, son importantes para entender la dinámica costera. De acuerdo con Gomes et al. (2022), muestran cómo la deposición y la erosión de sedimentos pueden influir en la forma de las costas, modificando a su vez dicha línea de costa en diferentes lugares. Tales procesos naturales y antrópicos conllevan a que se generen variaciones en la estabilidad de las costas. La comprensión de los procesos geomorfológicos en el área de Dibulla permitirá reconocer las zonas vulnerables y la identificación

de las medidas adecuadas para proponer soluciones tendientes a restablecer el equilibrio natural de la zona.

La sedimentación de la costa es sumamente influenciada por la actividad de los ríos, estos aportan sedimentos a las costas. Teniendo en cuenta a Warrick (2020), destaca que la influencia de las dinámicas de las corrientes del río y del mar contribuirá a la conformación de estuarios y a la constitución de las costas, además, podría influir también en su morfología. Resulta relevante ver cómo estas relaciones implican cómo flujos cambiantes de río y sus erosiones influyen en los litorales. En Dibulla los ríos colindantes podrían estar jugando un papel decisivo en la sedimentación, lo que puede afectar a la evolución de la línea de costa y a la evolución del ecosistema costero como se muestra en la Figura 3.

Figura 3.

Erosión del río en el litoral de Dibulla



Nota. Fuente elaboración propia

5.3. Enfoque multitemporal con SIG y teledetección

A partir de la utilización del enfoque multitemporal en la investigación costera permite visualizar los cambios de la línea costera a través del tiempo, aplicando tecnologías de teledetección como imágenes de satélite y sistemas de información geoespacial (SIG). Ambos enfoques dan una perspectiva detallada acerca de cómo los factores naturales y humanos afectan a

las costas, a la vez que permiten valorar los procesos de erosión y sedimentación. Como indica Gao et al. (2022), destacan el modo en el que el análisis de imágenes intrínsecas multitemporales mediante una restricción de energía temporal espacial permite mejorar el análisis de imágenes remotas, aumentando la precisión del control de la dinámica costera. Este enfoque resulta importante para localizar áreas críticas que necesitan determinadas intervenciones que mitigan los efectos producidos por la erosión y sedimentación en el litoral.

De este modo, el análisis multitemporal con SIG también es un método de evaluación de los impactos del cambio climático en zonas costeras, ya que permite observar la evolución de la línea de costa y la distribución de los sedimentos. De acuerdo con el IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing (2020), las técnicas avanzadas de análisis de series temporales pueden utilizarse para detectar patrones de cambios y evaluar las implicaciones de estos para la gestión costera. La posibilidad de combinar distintas fuentes de datos y tratarlas de una manera accesible, permite mejorar la toma de decisiones sobre la gestión del litoral, especialmente en el caso de zonas como Dibulla, donde los cambios en la línea de costa son evidentes.

5.3.1. Análisis multitemporal de la línea de costa mediante imágenes satelitales.

Por otra parte, el análisis multitemporal representa un componente importante para estudiar la evolución de la línea de costa, sobre todo utilizando las tecnologías de teledetección que permiten observar los cambios de la línea de costa con alta resolución tanto espacial como temporal. Según Bergamasco et al. (2023), han propuesto una arquitectura de aprendizaje de dos ramas que basa su arquitectura en el uso de diferentes sensores y en el uso de datos multitemporales logrando mejorar la segmentación semántica sobre imágenes remotas. Este enfoque es el adecuado para saber identificar patrones y clasificar áreas litorales en base a su vulnerabilidad a la erosión y sedimentación en Dibulla, lo que permite aplicar este método a un proceso de seguimiento de los cambios del litoral eficaz.

En cuanto a la utilización de series temporales de teledetección es también fundamental para mejorar la precisión del análisis de la línea de costa, pues es importante para el análisis de estas dos resoluciones de imagen y de sus respectivas series de imágenes, especialmente si se integran distintas resoluciones de imágenes y sensores. A juicio de Southworth y Muir (2021), resaltan la importancia que pueden tener para los retos ambientales actuales, el hacer un análisis de

esta tipología, pues se extienden a construir modelos predictivos de la evolución costera con cierto grado de precisión. En el caso específico de Dibulla, el uso de estas modernas técnicas podría, incluso, ayudar a anticipar los efectos derivados de los fenómenos naturales y de las actividades humanas. Lo que por último podría dar lugar a una planificación y gestión costera activa. A continuación, se presentan unas fotografías inéditas del Litoral de Dibulla.

Figura 4.
Sector urbanístico municipio de la Dibulla.



5.4. Planificación Territorial

En primer lugar, la planificación de los territorios sobre los espacios costeros constituye un eje fundamental para el desarrollo sostenible del litoral. Gracias a los enfoques integrados de planificación, los conflictos entre el desarrollo humano y la conservación de los ecosistemas costeros podrán ser equilibrados, para restringir los efectos adversos de la urbanización y de la práctica de actividades económicas. De manera adicional, Escandón et al. (2022) pueden afirmar que la planificación espacial de los sistemas socioecológicos marino-costero representa una buena forma de alcanzar un desarrollo que no repercuta de forma acusada en los recursos naturales. Este mensaje ha podido ser extendido al caso de Dibulla para buscar el equilibrio entre el crecimiento

poblacional y el desarrollo del litoral, aplicando instrumentos para la identificación de zonas vulnerables y los riesgos de erosión y sedimentación.

La planificación de la zona costera debe contemplar tanto los aspectos sociales como los ambientales, puesto que la costa es un lugar de elevada biodiversidad y también es un lugar muy demandado por la actividad humana. Como señala Galacho et al. (2024), sugieren un modelo de análisis espacial para conocer la adecuación del territorio en las áreas urbanas costeras, que permite detectar las mejores áreas para el desarrollo sin comprometer la sostenibilidad del entorno. El modelo propuesto podría ser aplicable en Dibulla para ayudar en el crecimiento urbano en función de las dinámicas de erosión y sedimentación, así como la aplicación de criterios de ordenación que permitan la adaptación de las comunidades costeras a sus cambios naturales y debidos a la acción humana.

5.4.1. Ordenamiento del Territorio Costero y su Implicación en la Gestión de Riesgos.

El ordenamiento del territorio costero es asumir la integración de diversos instrumentos que gestionan los riesgos de erosión, sedimentación y cambio climático. Para Souza et al. (2021), la cartografía geomorfológica constituye un instrumento de gran interés en el desarrollo de la planificación costera, al poder identificar las comunidades vulnerables y la toma de decisión respecto a la distribución del uso del suelo. En el caso de Dibulla, ello permitiría identificar las zonas de riesgo y fortalecer las medidas mediante que reduzcan el impacto de los procesos erosivos, garantizando así su resiliencia ante fenómenos naturales.

En cuanto a la gestión de riesgos en las costas, esta no debe limitarse a la prevención, sino que ha de adaptarse y restaurar los ecosistemas como consecuencia de la erosión y la sedimentación. Como señala Becker y cols (2021), muestra que una visión integrada de las cuestiones que combinan lo político, lo administrativo y lo morfológico, es necesario para poder desarrollar estrategias de la gestión del territorio. En el caso de Dibulla, esta visión no solo es capaz de regular el uso del suelo, sino que también permitirá diseñar políticas públicas en el sentido de la restauración de hábitats naturales, como las dumas o las playas, las cuales, favorecen y ayudan a la protección del litoral frente a los futuros riesgos.

En este apartado, se resumen los conceptos importantes que sustentan el estudio de la erosión y sedimentación costera, que se agrupan en tres categorías. Se describen las definiciones y principales enfoques sobre los procesos geomorfológicos, el análisis multitemporal a través de los

recursos presentes en SIG y la teledetección, por último, la planificación de la región costera. La tabla que se encuentra a continuación proporciona una representación clara de estos conceptos y su relación con la gestión de costas y el seguimiento de la evolución de la línea de costa en Dibulla.

Tabla 1.
Bases conceptuales

Categoría	Subcategoría	Definición	Relación con la Investigación
Erosión y Sedimentación Costera	Procesos Geomorfológicos en el Litoral	La erosión costera es el desgaste de la costa debido a factores naturales y humanos, mientras que la sedimentación es la acumulación de sedimentos en las costas.	Fundamental para entender cómo los procesos de erosión y sedimentación afectan la línea de costa de Dibulla.
Enfoque Multitemporal con SIG y Teledetección	Análisis Multitemporal de la Línea de Costa mediante Imágenes Satelitales	El análisis multitemporal utiliza imágenes satelitales y SIG para estudiar los cambios en la línea de costa a lo largo del tiempo.	Ayuda a monitorear los cambios en la costa de Dibulla, facilitando la identificación de áreas vulnerables y la gestión de riesgos.
Planificación Territorial	Ordenamiento del Territorio Costero y su Implicación en la Gestión de Riesgos	El ordenamiento territorial costero busca gestionar el uso del suelo para mitigar los riesgos asociados con la erosión, la sedimentación y el cambio climático.	Crucial para la gestión de las zonas costeras de Dibulla, asegurando el equilibrio entre el desarrollo humano y la conservación.

Nota. La tabla resume las categorías y subcategorías clave de la investigación, destacando conceptos fundamentales sobre erosión, análisis multitemporal y planificación territorial en Dibulla.

5.5. Teorías relacionadas con la temática de estudio

En este apartado se muestran las teorías importantes que sirven de base al análisis de la erosión y sedimentación costera junto con su relación con los factores geomorfológicos y climáticos. Dichas teorías constituyen el aparato teórico que permite entender los procesos que se producen en las costas y la dinámica de los sedimentos. Se explorarán teorías sobre la evolución de la línea de costa, teoría como sobre la influencia de los fenómenos naturales y teoría como sobre la influencia de la actividad humana en la transformación de los litorales. Estas teorías servirán de base para el análisis de los datos y para la formulación de estrategias de gestión costera.

5.5.1. Teoría de la dinámica costera y los procesos geomorfológicos

La dinámica costera y los procesos geomorfológicos estudian cómo los factores físicos (como por ejemplo el oleaje, las corrientes marinas, el viento y las mareas) interactúan con los sedimentos para modificar la forma de la costa a lo largo del tiempo. Por ejemplo, en un reciente trabajo se señala que la variabilidad de la línea de costa ya sea por erosión o por acumulación de sedimentos, está fuertemente gobernada por la oferta de sedimento, la energía del oleaje y la intervención humana (Feng et al., 2023). Este punto de vista es importante para comprender la situación en Dibulla, dado que los procesos naturales están siendo alterados por las actividades humanas, y determinar cómo esos cambios inciden en la estabilidad y evolución de la costa resulta esencial para su gestión.

5.5.2. Dinámica de la Erosión y Sedimentación Costera: Factores Geomorfológicos y Climáticos.

La erosión en las zonas costeras se ve acentuada a causa del cambio climático, siendo esto un factor de debilidad para las costas. Con base en lo expuesto por Pang et al., 2023, acontecimientos como tormentas severas y el aumento del nivel del mar propician mayores procesos erosionales. Estas alteraciones climáticas alteran la distribución de sedimentos, modificando la estabilidad de las playas y la línea de la costa. La interacción de los factores climáticos y geomorfológicos no hace sino aumentar la complejidad de la dinámica costera y la necesidad de entenderla en la planificación y gestión litoral, especialmente en zonas como Dibulla, que se puede afirmar que tal cambio será de impacto inmediato.

La hidrodinámica costera también influye en los procesos de erosión y sedimentos. Según Vallarino et al. (2023), consideran que las olas y las corrientes marinas provocan la redistribución

de los sedimentos a lo largo de las áreas costeras. Dicha redistribución es determinante para el entendimiento de cómo las costas experimentan variaciones en la línea de costa, lo cual afecta los procesos de erosión y sedimentación. La exploración de la dinámica hidrodinámica es decisivo para prevenir los efectos de este tipo de análisis en las zonas costeras y el diseño de alternativas de mitigar la variabilidad de los efectos del cambio climático.

5.6. Bases Legales

A nivel internacional, uno de los principales marcos jurídicos relacionados con la gestión costera continúa siendo la *Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (CNUDM)*, la cual establece los principios fundamentales para la protección, preservación y uso sostenible de los ecosistemas marinos y costeros. Este instrumento reconoce que los problemas que afectan a los océanos, como la erosión, la sedimentación y la contaminación, requieren de una cooperación global y de políticas integradas que promuevan la gestión sostenible del litoral.

En su más reciente revisión, la Organización de las Naciones Unidas (2023) destacó los avances y desafíos de la CNUDM en sus cuarenta años de vigencia, subrayando la responsabilidad de los Estados de proteger el medio marino, prevenir su degradación y asegurar el equilibrio entre el desarrollo económico y la conservación ambiental en las zonas costeras.

En el entorno nacional de Colombia, uno de los marcos normativos relevantes en lo que respeta a la gestión costera, y que crea el Ministerio del Medio Ambiente y establece el Sistema Nacional Ambiental (SINA), es la Ley 99 de 1993. Esta ley asigna responsabilidades al Estado y a las autoridades locales para la conservación y manejo de los recursos naturales, lo que incluye los ecosistemas costeros, y establece directrices para la gestión sostenible de las zonas marítimas y costeras, poniendo énfasis en la conservación de la biodiversidad y la protección ante la erosión costera (Congreso de Colombia 1993).

Otras de las normas relevantes para el caso de Colombia es la Ley 23 de 1973, con la que se regula el tema del ordenamiento territorial y la preservación del medio ambiente, la cual señala que las autoridades locales deben integrar los factores ambientales en la planificación territorial, especialmente en las regiones costeras y marinas, que los temas ambientales deben estar integrados en el ordenamiento territorial, dado que debe reflejar en la práctica los impactos de la erosión y la sedimentación en el desarrollo urbano y rural, al tener en cuenta los mismos para establecer

mecanismos que permitan una respuesta desde políticas públicas y programas orientados a la restauración de los ecosistemas costeros (Congreso de Colombia, 1973).

En este apartado se presentan las principales normativas internacionales y nacionales que respaldan la gestión costera, la protección del medio ambiente marino y la adaptación al cambio climático, y que dan cuenta del marco jurídico que regula la protección y conservación del litoral y del medio marino, tanto a nivel internacional como en la realidad colombiana. A continuación, se presenta una tabla que resume las principales claves normativas que da cuenta de los principios y directrices que se deben tener en cuenta para la gestión sostenible y para contrarrestar los efectos de la erosión y la sedimentación.

Tabla 2.
Bases legales

Normativa	Descripción	Ámbito
Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (CNUDM)	Establece las reglas para la protección y conservación de los ecosistemas marinos, incluyendo la gestión de la erosión costera y la sedimentación.	Internacional
Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (ODS 14)	Promueve la conservación y el uso sostenible de los océanos, mares y recursos marinos, enfocándose en la mitigación de los impactos del cambio climático en las costas.	Internacional
Ley 99 de 1993 (Colombia)	Crea el Ministerio del Medio Ambiente y establece el Sistema Nacional Ambiental (SINA) para la gestión sostenible de los recursos naturales, incluidos los ecosistemas costeros.	Nacional (Colombia)

Ley 23 de 1973 (Colombia)	Regula el ordenamiento territorial y la protección ambiental en Colombia, considerando los impactos de la erosión y sedimentación en el desarrollo territorial.	Nacional (Colombia)
--------------------------------------	---	---------------------

Nota. La tabla resume las principales normativas internacionales y nacionales relacionadas con la gestión costera, destacando su relevancia para la protección de los ecosistemas marinos y la mitigación de los impactos de la erosión y sedimentación

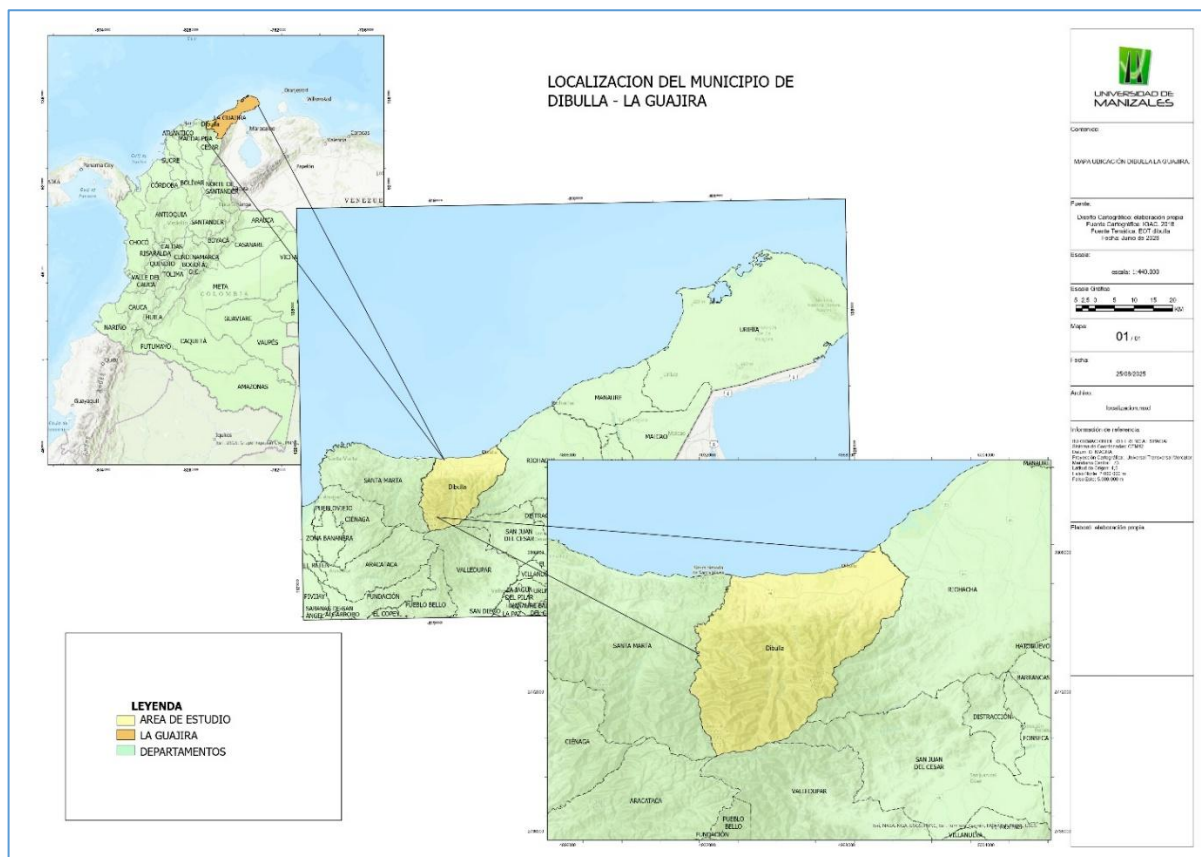
6. Metodología

La investigación se apoya en el paradigma positivista, orientado hacia la observación objetiva y la medición sistemática de fenómenos naturales. Este enfoque permitió analizar la dinámica de la costa a través de datos cuantificables, empleando herramientas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la teledetección. En este sentido, Mohammad Ali (2024) describe que el paradigma positivista asume una realidad objetiva, accesible mediante evidencia empírica y métodos cuantitativos (cuantificación, generalización y replicabilidad). Gracias a ello, en este estudio se identificaron patrones espaciales de erosión y sedimentación en el litoral de Dibulla, contribuyendo a una interpretación rigurosa del cambio ambiental costero y proporcionando el marco metodológico adecuado para el análisis multitemporal.

Figura

Ubicación municipio de Dibulla, La Guajira

5.



Nota: Elaboración propia

De acuerdo con esta perspectiva, se optó por un método cuantitativo dada la posibilidad de gestionar información geoespacial mediante procedimientos de análisis numérico. A través de imágenes satelitales multitemporales se realizó una evaluación sistemática de los cambios ocurridos en la costa entre 2010 y 2024, lo que permitió relacionar variables físicas y territoriales para fundamentar propuestas de gestión ambiental del litoral. Como señalan Pilcher y Cortazzi (2024), los métodos cuantitativos permiten recolectar datos estructurados y analizarlos empíricamente para identificar patrones y tendencias en contextos diversos.

El municipio de Dibulla se ubica en el occidente de La Guajira, sobre la costa Caribe, con una extensión aproximada de 1.847 km². Su territorio combina planicies costeras con zonas montañosas que alcanzan los 4.850 m s. n. m. en la Sierra Nevada de Santa Marta. Entre las principales amenazas ambientales se encuentran la erosión costera, los movimientos en masa y las presiones antrópicas derivadas de la deforestación y la expansión agropecuaria.

6.1. Tipo de Investigación

La investigación desarrollada adoptó un carácter descriptivo y exploratorio, con el propósito de detallar con precisión el fenómeno costero menor y profundizar en sus causas, así como en los patrones espaciales. Según Hovestad (2024), los estudios descriptivos se enfocan en *“describir o definir un fenómeno particular”* mientras que los exploratorios buscan arrojar luz sobre contextos poco estudiados. De este modo, en el presente trabajo se documentaron los cambios morfológicos de la línea de costa de Dibulla mediante análisis geoespacial, entendiendo por ello las transformaciones físicas del litoral; al mismo tiempo, se identificaron áreas vulnerables mediante el cruce de variables geográficas, sin pretender establecer relaciones causales directas, sino más bien capturar patrones temporales y espaciales reconocibles. Esta combinación de tipologías permitió llevar a cabo un análisis riguroso y flexible, adecuado para un fenómeno complejo que requiere acciones de ordenamiento ambiental.

6.2. Diseño de la Investigación

El diseño adoptado en este estudio fue de tipo no experimental, puesto que no se manipuló ninguna variable, sino que los datos fueron obtenidos mediante observación indirecta de imágenes satelitales y bases geoespaciales, sin intervención directa del investigador. Según Salmons (2023), los diseños no experimentales permiten examinar fenómenos en su entorno natural, sin asignación de grupos ni manipulación de condiciones. En este caso se registraron los procesos costeros del

municipio de Dibulla mediante herramientas SIG, asegurando objetividad en la observación. Adicionalmente, el estudio se planteó como un diseño longitudinal-multitemporal, pues se analizaron los cambios ocurridos entre 2010 y 2024, lo que permitió identificar la evolución progresiva de la línea de costa y reconocer tendencias de erosión y sedimentación en distintos momentos.

Hunziker y Blankenagel (2024) señalan que los estudios longitudinales son apropiados para observar variaciones en el tiempo y detectar patrones temporales en contextos naturales. De esta forma, la estrategia metodológica refuerza la validez de los hallazgos y aporta una base sólida para la gestión ambiental costera

Tabla 3.

Diseño metodológico planteado

Fase	Actividad / Técnica	Herramienta / Fuente	Producto
Selección de imágenes	Descarga de imágenes satelitales multitemporales (2010, 2015, 2020, 2024)	USGS Earth Explorer – Landsat (TM, ETM+, OLI/TIRS)	Base de datos de imágenes satelitales Landsat 5 y Landsat 8
Procesamiento en SIG y teledetección	Corrección radiométrica y atmosférica; aplicación de índices espectrales (NDWI, MNDWI); delimitación de línea de costa	ArcGIS Pro, QGIS	Líneas de costa vectorizadas y normalizadas
Análisis con herramientas especializadas	Digitalización y gestión de datos geográficos- Cálculo de tasas de cambio- Validación y métricas complementarias	ArcGIS Pro, DSAS, SEATool	Tasas de erosión y sedimentación (EPR, LRR)
Cálculo de indicadores	Estimación de tasas de cambio costero	DSAS – SEATool	Valores de EPR y LRR
Representación cartográfica y análisis	Generación de mapas temáticos, gráficos y tablas comparativas	ArcGIS Pro	Mapas de erosión/sedimentación y análisis espacial

Nota. Elaboración propia

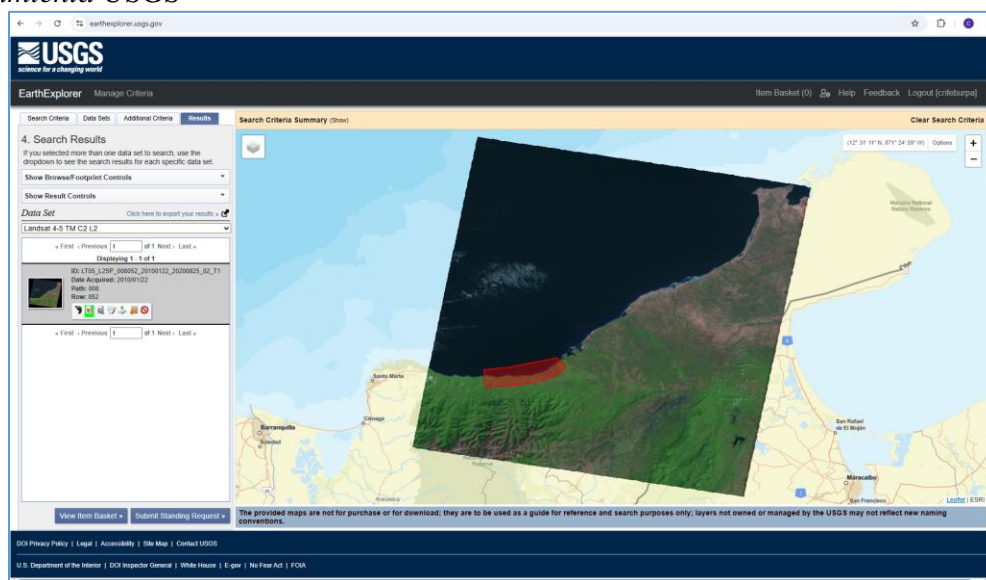
6.3. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Para el primer objetivo específico, que consistió en identificar los cambios en la línea de costa entre 2010 y 2024, se empleó como instrumento el análisis de imágenes satelitales multitemporales. Estas imágenes fueron descargadas de fuentes oficiales de diferente resolución espacial (por ejemplo, datos de los satélites Landsat 8/Landsat 9 y los de Sentinel 2A/Sentinel 2B) y posteriormente se procesaron en sinergia mediante software SIG para delimitar y comparar la línea costera. Como lo indican especialistas en monitoreo costero por satélite, la combinación de misiones satelitales ofrece una cobertura temporal y espacial que mejora la precisión del análisis multitemporal (Lee et al., 2023). Se aplicaron técnicas como clasificación supervisada y análisis de diferencia espacial, lo que garantizó datos confiables para evaluar la evolución del litoral costero

Se eligieron imágenes satelitales Landsat (TM, ETM+, OLI/TIRS) correspondientes a los años 2010, 2015, 2020 y 2024, descargadas desde el portal USGS Earth Explorer (U.S. Geological Survey [USGS], 2023). Siguiendo los siguientes Criterios de selección para una mejor calidad de los datos obtenidos:

- Escenas con baja nubosidad (<10%).
- Resolución espacial de 30 m.
- Cobertura completa del área costera de Dibulla.
- Homogeneidad temporal para garantizar comparabilidad entre periodos

Figura 6.
Uso herramienta USGS



En lo que respecta al segundo objetivo, orientado a la caracterización de las zonas afectadas por erosión y sedimentación, se ha utilizado el análisis de índices espectrales derivados de la teledetección, como el NDVI y el MNDVI, dato que permitió conocer las variaciones que existen en la cobertura vegetal y la humedad superficial. Las imágenes satelitales fueron analizadas mediante el software QGIS y el software ArcGIS, generando mapas comparativos y visuales sobre los cambios evidentes en el espacio. Esto permite la localización de áreas clave y la interpretación de sus dinámicas espaciales.

Las imágenes Landsat fueron sometidas a correcciones radiométricas y atmosféricas. Posteriormente, fueron re proyectadas al sistema de referencia EPSG:9377 MAGNA-SIRGAS 2018 Origen Nacional, recortadas a nuestra AOI (área de interés) y luego se le aplicaron índices espectrales como el NDWI (Normalized Difference Water Index) y el MNDWI (Modified NDWI), para la delimitación preliminar de la línea de costa (Xu, 2006). El resultado fue un raster con valores entre -1 y +1, donde los valores positivos representan áreas cubiertas por agua

Figura 7.
Procesamiento NDWI

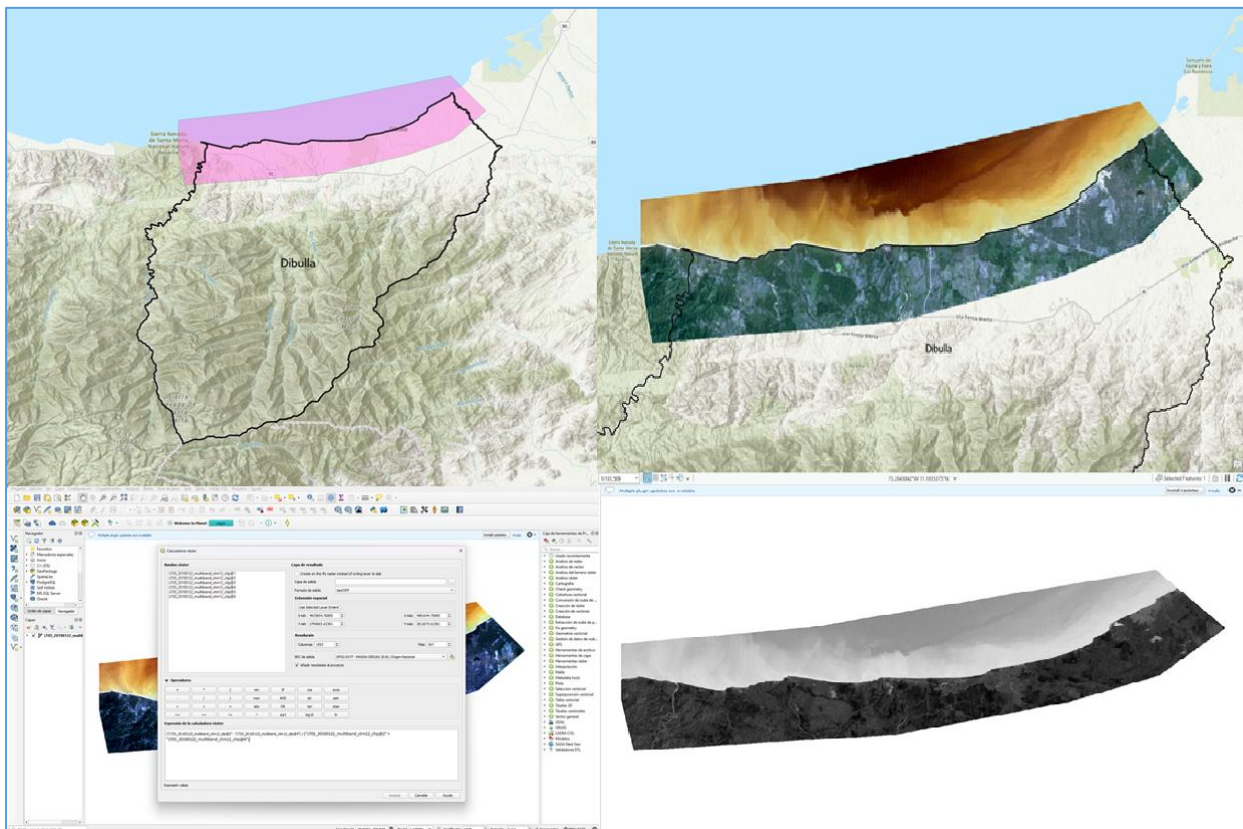
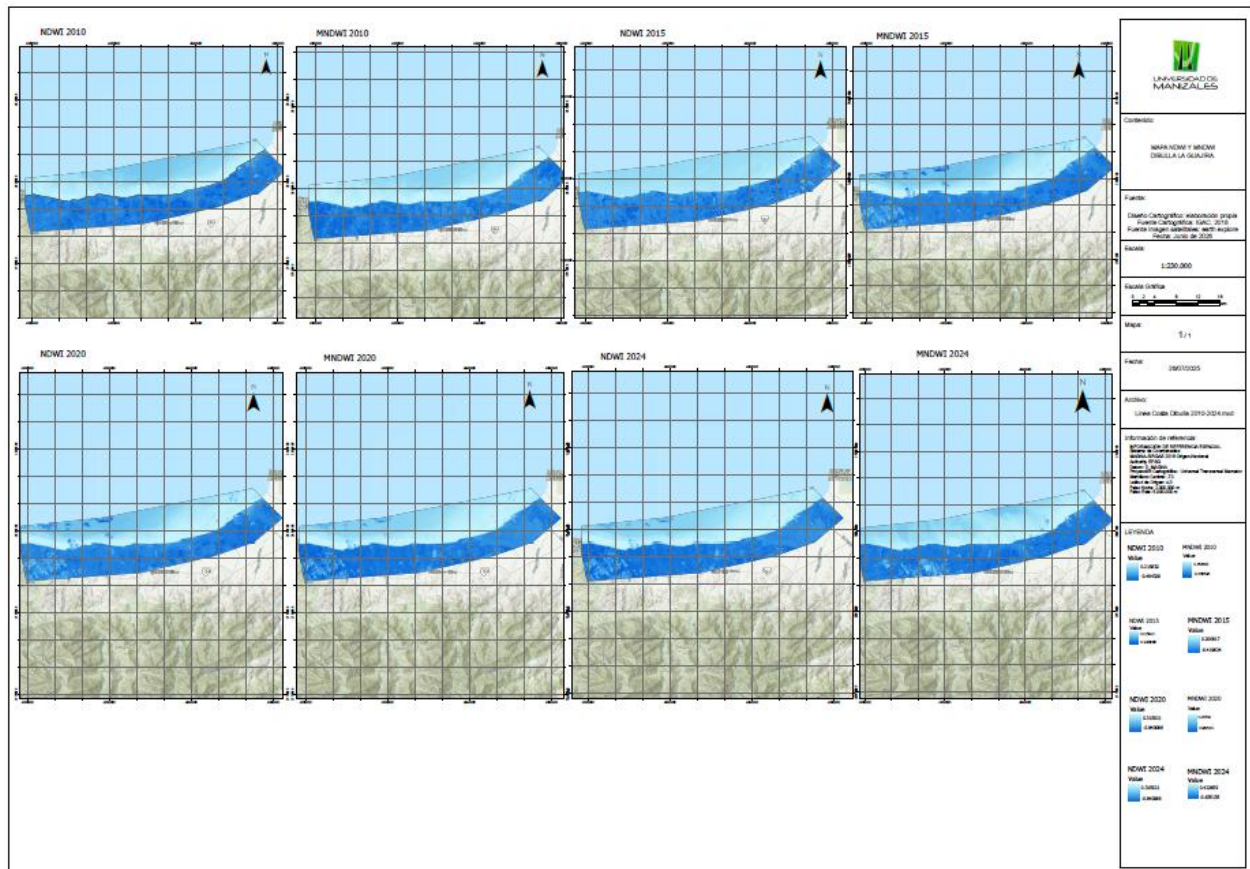


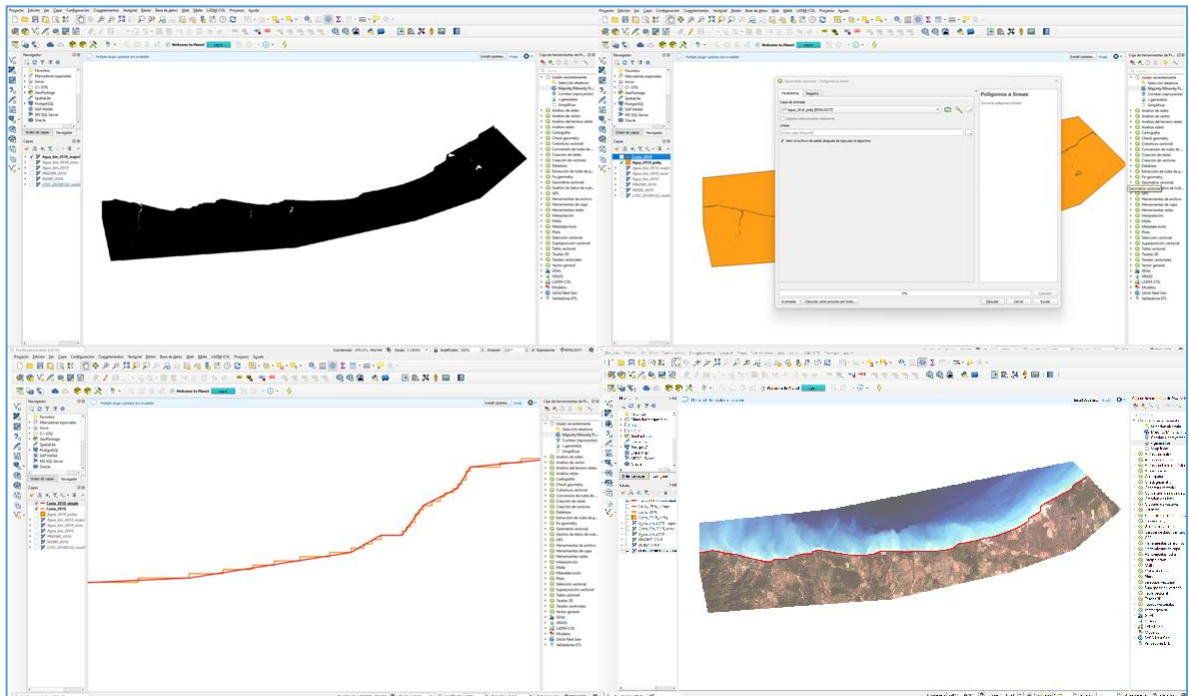
Figura 8.
Índice Modificado de Agua de Diferencia Normalizada (MNDWI)



A partir de los índices NDWI y MNDWI, se aplicó un umbral (>0) para crear una máscara binaria combinada para el robustecimiento del resultado, el cual fue depurado mediante filtros morfológicos y de mayoría (kernel 3x3) para eliminar ruido y pequeños artefactos derivados de nubes residuales o diferencias espectrales no representativas.

Una vez depuradas las máscaras de agua, se procedió a su vectorización para convertir las áreas en polígonos y, posteriormente, extraer el límite exterior correspondiente a la línea de costa. Estos contornos se suavizaron a través de algoritmos de simplificación geométrica con la herramienta GRASS \rightarrow v.generalize que redujeron irregularidades sin perder precisión espacial, asegurando una representación más realista y continua del litoral.

Figura 9.
Proceso desarrollo línea de costa



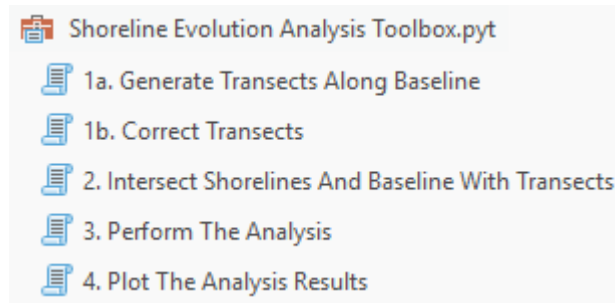
Uso de herramientas SIG y complementarias

ArcGIS Pro: procesamiento cartográfico, digitalización y análisis espacial.

DSAS (Digital Shoreline Analysis System): cálculo de tasas de cambio mediante indicadores EPR y LRR (Himmelstoss et al., 2018).

SEATool (Shoreline Erosion Analysis Tool): validación y cálculo de métricas adicionales. Esta herramienta se basa en dos insumos: las líneas de costa en un archivo vectorial y una línea base de referencia siguiendo y haciendo buenas prácticas sugeridas en las investigaciones recientes (Gallego, et al., 2024), La cual está desarrollada en Python y estructurada en módulos que se ejecutan secuencialmente:

1. *Generate Transects Along Baseline*
2. *Correct Transects*
3. *Intersect Shorelines and Baseline with Transects*
4. *Perform the Analysis*
5. *Plot the Analysis Results*



Estos módulos emplean librerías de ArcPy, así como Pandas (The Pandas Development Team, 2024), Matplotlib (The Matplotlib Development Team, 2024) y Statsmodels (Perktold et al., 2023). La incorporación de SEATool responde a la necesidad de robustecer los resultados, comparando diferentes metodologías y siguiendo buenas prácticas sugeridas en investigaciones recientes (García-Rivero, 2022).

Cálculo de indicadores

Para evaluar la dinámica costera se emplearon dos indicadores principales: *EPR* (*End Point Rate*) y *LRR* (*Linear Regression Rate*).

El *EPR* se calculó como la tasa de cambio lineal entre la primera y la última línea de costa registrada, expresada en metros por año (m/año). Para ello, se trazaron transectos perpendiculares a la línea de costa y se midió la distancia entre las posiciones de 2010 y 2024. Esta diferencia se dividió por el número de años transcurridos, obteniéndose la velocidad promedio de avance o retroceso del litoral.

El *LRR*, por su parte, se estimó mediante una regresión lineal aplicada a todas las líneas de costa intermedias (2010, 2015, 2020 y 2024). Este método permitió determinar la tendencia general del cambio considerando la variabilidad temporal. El cálculo se realizó con el complemento *Digital Shoreline Analysis System (DSAS v5.1)* en el entorno de *ArcGIS Pro*, herramienta que automatiza la generación de transectos, la extracción de distancias y el ajuste estadístico de las líneas de costa.

Figura 10.
Transectos



6.4. Población, Muestra y Muestreo

La población en esta investigación correspondió al territorio costero del municipio de Dibulla, entendido como unidad espacial de análisis. En investigaciones cuantitativas con enfoque geoespacial, la población puede estar compuesta por unidades físicas o ambientales. En opinión de Hunziker y Blankenagel (2024) indicaron que, en estos casos, la delimitación poblacional responde al área de estudio y no a individuos. Así, el litoral de Dibulla constituyó el universo observado a lo largo de un periodo multitemporal. La elección del área se basó en criterios técnicos relacionados con la disponibilidad de datos satelitales. Este enfoque permitió una observación sistemática del fenómeno costero sin intervención directa.

La muestra se definió mediante un muestreo no probabilístico basado en criterios técnicos, orientada a seleccionar zonas que mostraron variaciones significativas de la línea de costa. Se priorizaron sectores con alta vulnerabilidad ambiental, incidencias erosionarias evidentes y buena accesibilidad geoespacial. La localización de la muestra se apoyó en imágenes satelitales de los años 2010, 2015, 2020 y 2024. Este procedimiento permitió focalizar el análisis sin comprometer la representatividad del litoral en estudio. Estudios recientes en muestreo geoespacial señalan que, en contextos de datos satelitales y territorios complejos, el uso de muestreo basado en criterios

técnicos (más que en una selección probabilística estricta) es una estrategia válida para garantizar cobertura y consistencia de los datos (Atkinson et al., 2022).

6.5.Procedimiento para recolección de datos.

El proceso dio comienzo con la descarga y selección de las imágenes de satélites legibles para los años propuestos en el estudio multitemporal. Las imágenes seleccionadas corresponden a bajas nubes, buena resolución y cubren la totalidad del objeto de estudio. En este orden de ideas Atkinson et al (2022). También indica que la recolección de datos en los estudios exige un diseño cuidadoso para su análisis y el uso de criterios técnicos para la misma. Posteriormente se les realizó la corrección radiométrica y geométrica para ajustar las imágenes a la compatibilidad; las imágenes corregidas fueron introducidas a un entorno SIG para su tratamiento. Y así se pudo realizar el análisis espacial de una forma meticulosa y sistemática.

La muestra se definió mediante un muestreo no probabilístico basado en criterios técnicos, priorizando zonas que mostraron variaciones significativas en la línea de costa. Se seleccionaron sectores con alta vulnerabilidad ambiental, evidencias de erosión y buena accesibilidad geoespacial, apoyándose en imágenes satelitales de los años 2010, 2015, 2020 y 2024. Esta estrategia permitió dirigir el análisis sin comprometer la cobertura territorial del litoral en estudio. Según Zhao, et al., (2025), en investigaciones costeras apoyadas en teledetección y SIG es habitual recurrir a muestras definidas por criterios especializados más que por selección probabilística estricta, pues ello facilita la focalización de áreas clave en entornos complejos.

7. Resultados

El presente capítulo tiene como objetivo presentar los resultados obtenidos a partir del análisis multitemporal de erosión y sedimentación costera en el municipio de Dibulla, La Guajira, entre los años 2010 y 2024. Los resultados se derivan del procesamiento de imágenes satelitales utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) y herramientas de teledetección, lo que permitió identificar los cambios en la línea de costa y caracterizar las zonas más afectadas por estos procesos. La metodología empleada ha permitido realizar una evaluación precisa y detallada de la dinámica costera a lo largo del período de estudio.

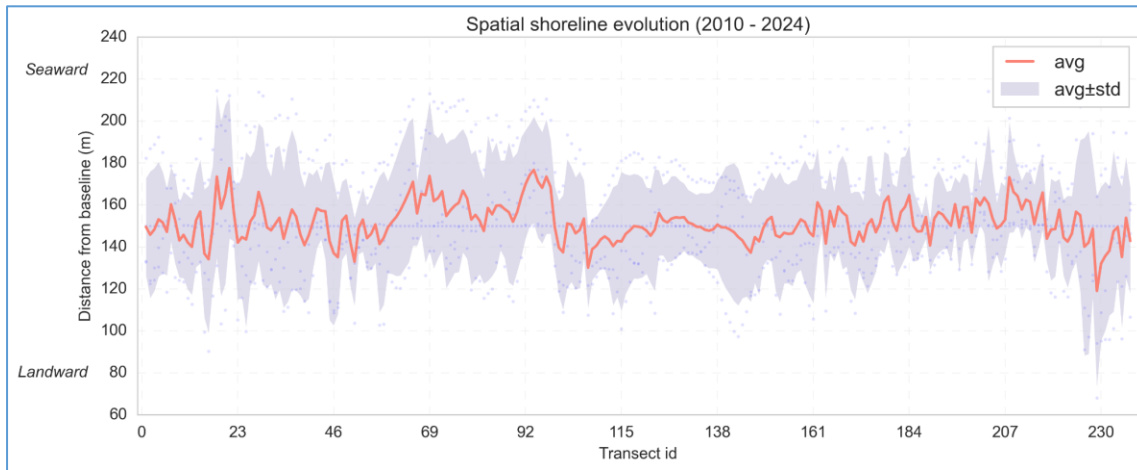
Los resultados obtenidos se estructuran en tres apartados principales: primero, la evolución de la línea costera de Dibulla entre 2010 y 2024, destacando los cambios más significativos; segundo, la caracterización de las zonas afectadas por procesos de erosión y sedimentación, identificando las áreas más vulnerables; y tercero, una propuesta de estrategias de gestión costera basadas en los hallazgos del análisis multitemporal. Estos resultados constituyen una base sólida para la toma de decisiones en la planificación territorial y la gestión ambiental en la región

7.1. Análisis de los cambios en la línea de costa del municipio de Dibulla entre los años 2010 y 2024

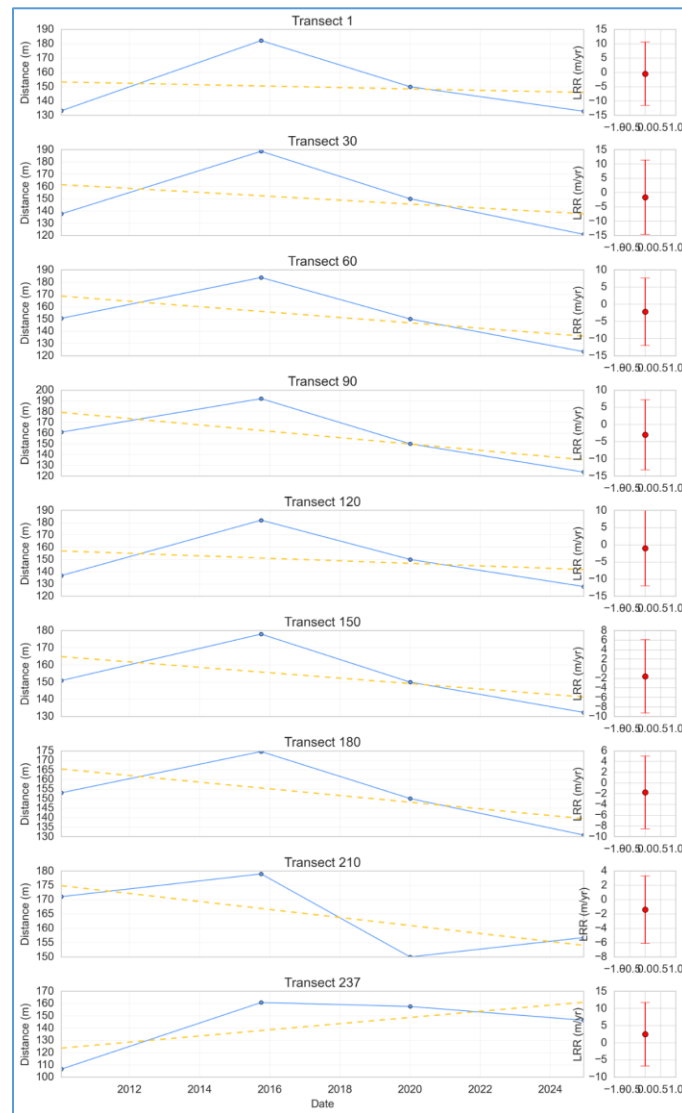
El análisis de la evolución de la línea de costa del municipio de Dibulla entre los años 2010 y 2024 se realizó utilizando imágenes satelitales multitemporales obtenidas de Landsat. Se emplearon los índices espectrales NDWI y MNDWI para generar las líneas de costa vectoriales correspondientes a los años 2010, 2015, 2020 y 2024 (ver Figura 6). Este proceso permitió identificar cambios en la morfología costera, evidenciando un retroceso generalizado de la línea de costa, especialmente en zonas con alta presión humana, como áreas urbanizadas y de desarrollo turístico. Sin embargo, algunas zonas cercanas a las desembocaduras fluviales presentaron procesos de sedimentación o acreción, aunque en menor extensión

Figura 11.

Comparación multitemporal de las líneas de costa (2010–2024) en Dibulla, La Guajira.



Los transectos representativos seleccionados en el análisis (1, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 y 237) permitieron ilustrar las variaciones espaciales y temporales más destacadas (ver Figura 2). Los resultados mostraron que, aunque algunos transectos evidenciaron episodios de acreción hasta el año 2015, entre 2015 y 2024 la tendencia general fue de retroceso pronunciado en todos los transectos evaluados. Estos cambios reflejan una mayor intensidad de la erosión en áreas con mayor intervención humana, lo que resalta la influencia de las actividades antrópicas en la dinámica costera.

Figura 12.*Evolución temporal de la línea de costa en transectos representativos*

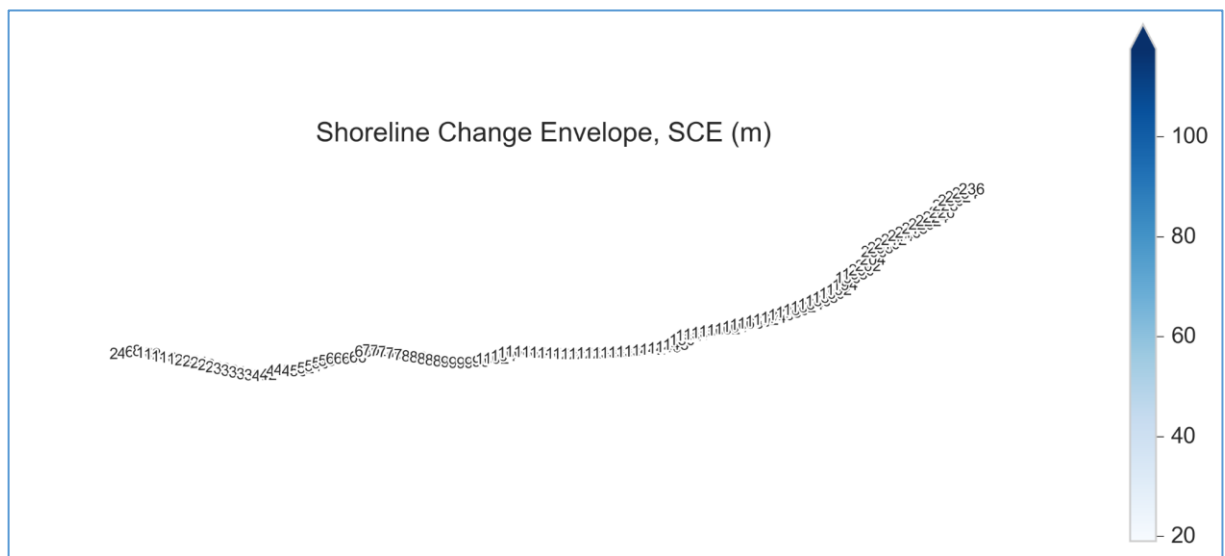
Para cuantificar la dinámica de la línea de costa, se utilizaron indicadores como la Tasa de Cambio Lineal (LRR), el Desplazamiento Neto de la Costa (NSM) y el Cambio Máximo de la Costa (SCE). En cuanto a los LRR los resultados evidencian una clara predominancia de valores negativos (colores azules), que oscilan entre -2 y -6 m/año, confirmando el proceso erosivo generalizado en la mayor parte del litoral estudiado, tal como se puede evidenciar en la Figura 3. Los transectos ubicados en los extremos del área de estudio (0-50 y 200-237) presentan las tasas de erosión más severas, alcanzando valores de hasta -6 m/año, lo que indica un retroceso sostenido y acelerado de la línea de costa en estas zonas.

Los valores de SCE oscilan predominantemente entre 20 y 60 metros en la mayor parte del área de estudio, indicando fluctuaciones considerables en la posición de la línea de costa durante el período analizado. Los transectos ubicados en los extremos norte y sur (0-40 y 220-237) presentan los valores más elevados de SCE, superando los 80-100 metros, lo que refleja una dinámica costera extremadamente variable e inestable en estas zonas críticas.

La sección central del litoral (transectos 80-180) muestra valores de SCE relativamente menores, pero aún significativos (30-50 metros), sugiriendo procesos de cambio costero menos erráticos pero persistentes. Estos altos valores de SCE en todo el litoral indican que la línea de costa de Dibulla ha experimentado oscilaciones temporales importantes, posiblemente asociadas a eventos climáticos extremos, variaciones estacionales y la influencia acumulativa de factores antrópicos.

Figura 16.

Cambio Máximo de la Costa (SCE) registrado en el periodo 2010–2024.



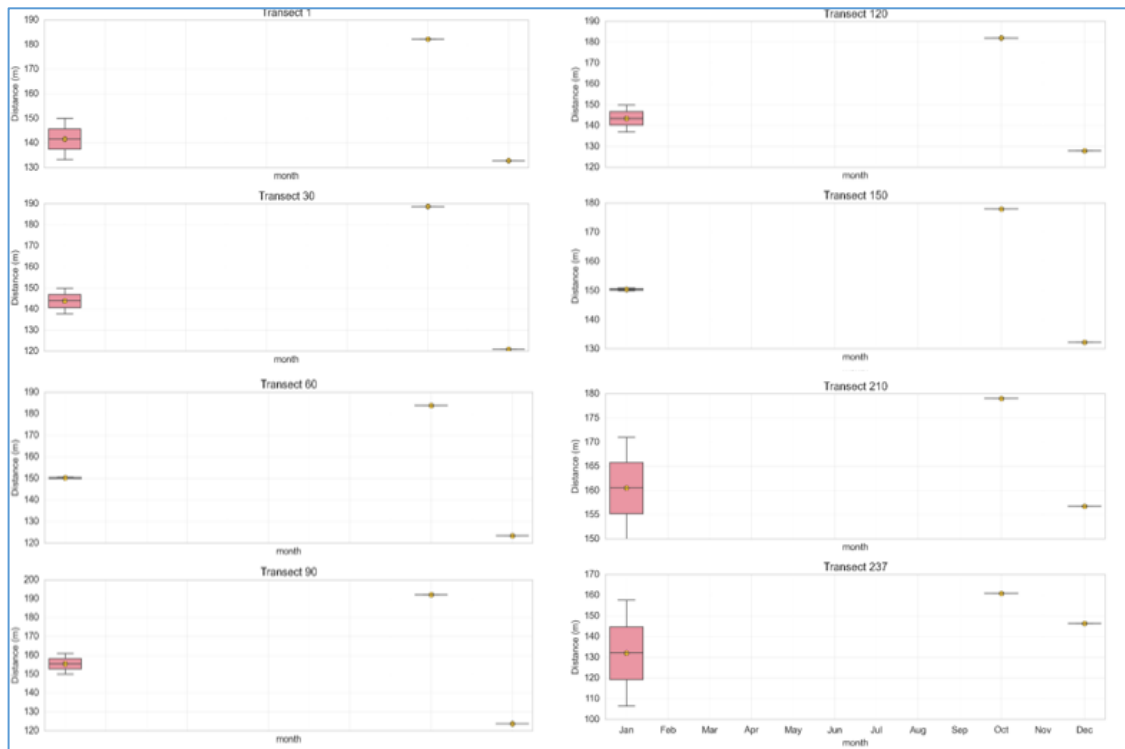
La evolución espacial de la línea de costa 2010-2024 (Ver Figura 1), revela un patrón complejo de cambios morfológicos a lo largo de los 237 transectos analizados en Dibulla. La línea promedio muestra una tendencia descendente generalizada desde los transectos iniciales hacia el final del área de estudio, confirmando el retroceso progresivo de la costa. Sin embargo, la banda de desviación estándar evidencia una variabilidad muy alta en los transectos 0-50 y 200-237, donde las fluctuaciones pueden superar los 100 metros de amplitud.

Esta alta dispersión indica que mientras algunos sectores experimentan retrocesos severos, otros mantienen relativa estabilidad o incluso procesos de acreción temporal. La sección central del litoral (transectos 100-180) presenta menor variabilidad, sugiriendo condiciones más estables, aunque la línea promedio sigue mostrando una tendencia erosiva. Los picos de máxima variabilidad coinciden con las zonas identificadas previamente como críticas en los análisis de LRR y NSM, confirmando que estos sectores no solo presentan los mayores retrocesos promedio, sino también la mayor inestabilidad temporal. Esta heterogeneidad espacial refleja la influencia diferenciada de factores locales como desembocaduras fluviales, presión antrópica y características geomorfológicas específicas de cada sector del litoral.

La estacionalidad y la variabilidad interanuales también se consideran durante el análisis. Se observaron oscilaciones en la línea de costa en algunos puntos del litoral (ver Figura 6), cuando se estuvo analizando el comportamiento de esta, pero tales oscilaciones no fueron tan reveladoras como para dar cuenta de la magnitud de los cambios que se detectan en la misma. La erosión que se observa en la playa de Dibulla parece asociarse a los procesos de acumulación a largo plazo y no con procesos estacionales o de corto plazo. La conducta de esta playa hace eco de la influencia de factores tales como el cambio climático y las modificaciones que ha impuesto el ser humano sobre el ecosistema costero.

Figura 17.

Estacionalidad de la línea de costa en transectos seleccionados.



En términos generales, el análisis de la evolución de la costa indica que Dibulla ha registrado un retroceso considerable en su litoral en el período 2010 a 2024, con tasas de erosión que llegan -6 metros por año en algunos sectores. Esta situación se ha visto incrementada por las prácticas humanas del lugar, como la urbanización y el turismo, que han modificado de manera acelerada las alteraciones naturales de sedimentación y erosión de la costa. No obstante, también se han entremezclado zonas donde ha ocurrido sedimentación, sobre todo en las áreas cercanas a los ríos y las desembocaduras fluviales.

La variabilidad espacial que se desprende del análisis realizado sugiere que los procesos de erosión y sedimentación no afectan de la misma manera todas las partes del litoral. Mientras algunas áreas sufren un retroceso de la línea de costa, otras experimentan episodios de sedimentación de carácter temporal. Pero, pese a ello, el balance general es negativo y sugiere una pérdida de territorio, lo que implica de forma incuestionable la necesidad de adoptar intervenciones para la salvaguarda de los efectos de la erosión en el municipio.

Desde la óptica de la gestión de costas, los resultados del multitemporal ponen de manifiesto que se requieren análisis estratégicos integrales para hacer frente a los impactos de la erosión. La

protección de los ecosistemas naturales de las dunas, los manglares, la ordenación del crecimiento urbano o del turismo en la franja costera podrían ser algunas de las medidas que podrían revertir la erosión. Asimismo, la restauración de los ecosistemas degradados puede ser una alternativa satisfactoria de estabilización de la línea de costa que reduzca el impacto de la erosión en las áreas del litoral más vulnerables.

La observación continua de la línea de costa mediante imágenes satelitales y tecnología como de teledetección permitirá lograr una evaluación continua de los cambios producidos, facilitando información importante para la toma de decisiones en la gestión costera y en la planificación del territorio, garantizando la adopción de las medidas necesarias para la mitigación y adaptación a los cambios. La combinación con tecnologías avanzadas, como los Sistemas de Información Geográfica (GIS), será determinante en la identificación de las áreas impactadas y en los esfuerzos dirigidos hacia la restauración y protección del litoral que más lo requieren.

7.2. Caracterización de las zonas más Afectadas por Procesos de Erosión y Sedimentación

El análisis de las zonas más afectadas por procesos de erosión y sedimentación en Dibulla se realizó mediante un enfoque multitemporal utilizando imágenes satelitales de los años 2010, 2015, 2020 y 2024. Las técnicas empleadas incluyeron el cálculo de índices espectrales como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) y el NDWI (Índice Diferencial de Agua Normalizada), herramientas útiles para detectar cambios en la cobertura vegetal y en la humedad superficial. Estos índices permitieron identificar las áreas afectadas por la pérdida de vegetación, que es un indicativo de la erosión, así como las áreas con aumento de humedad, relacionadas con la sedimentación.

El NDVI se utilizó para evaluar la variabilidad de la cobertura vegetal a lo largo de los años. Este índice es particularmente útil para detectar la pérdida de vegetación, un fenómeno asociado a la erosión costera. En aquellas áreas donde se observó una disminución del NDVI, se pudo inferir un proceso de erosión, especialmente en sectores cercanos a las zonas urbanas y turísticas. Por otro lado, el NDWI permitió identificar las áreas donde se produjeron acumulaciones de agua, típicamente en las zonas de sedimentación, como cerca de las desembocaduras de los ríos y áreas con vegetación acuática.

Los resultados obtenidos del análisis multitemporal muestran que las zonas más afectadas por erosión se encuentran principalmente en las áreas cercanas a la franja costera urbana, donde la

intervención humana ha alterado los procesos naturales de sedimentación. Estas áreas han experimentado un retroceso progresivo de la línea de costa, con valores negativos en los índices de vegetación (NDVI) y un aumento en los valores de NDWI en las zonas cercanas a cuerpos de agua. La erosión ha sido más pronunciada en estas zonas debido a la falta de protección natural y la presión derivada de actividades humanas, como la construcción de infraestructuras turísticas y la agricultura intensiva.

En contraste, las áreas que mostraron procesos de sedimentación fueron principalmente aquellas cercanas a las desembocaduras fluviales, donde el aporte de sedimentos por parte de los ríos ha favorecido la acumulación de material y la estabilidad relativa de la línea costera. Estas áreas presentan una mayor densidad de vegetación en comparación con las zonas afectadas por erosión, lo que se reflejó en los valores positivos del NDVI. El análisis de estos sectores mostró una tendencia de crecimiento de la línea de costa, lo que indica un proceso de estabilización temporal debido al aporte natural de sedimentos.

Los gráficos generados mediante el procesamiento de los índices espectrales se muestran de manera manifiesta toda la evidencia de las áreas que se encuentran vulneradas en el litoral de Dibulla. Las ubicaciones donde fueron identificados retrocesos importantes de la línea de costa son precisamente las que se encuentran más vulnerables por la intervención humana, como las playas de las localidades o playas donde hay infraestructuras de turismo. Los gráficos muestran con claridad las dinámicas de erosión y sedimentación y además se pueden utilizar para establecer los lugares críticos para la intervención y protección futura.

La comparación espacial y temporal de las zonas afectadas a lo largo de los años permite observar la evolución de estos procesos. Entre 2010 y 2024, las áreas más afectadas por la erosión experimentaron un retroceso continuo, siendo especialmente marcadas el mismo entre 2015 y 2020. Esto responde a que la erosión ha sido un proceso acumulativo y progresivo, favorecido no sólo por forma de erosión natural sino también por las actividades humanas. En cuanto a las áreas de sedimentación, aunque se aprecia un crecimiento de la línea de costa, no fue suficiente para contrarrestar el retroceso generalizado en el resto de las áreas.

La relación entre los procesos de erosión y sedimentación y las variables ambientales pone de manifiesto que el efecto de las variables climáticas, así como el desarrollo de las actividades humanas, han determinado la deriva de la línea de costa. Las zonas que sufren mayor erosión

coinciden con las de mayor presión humana, donde el proceso de modificación del entorno natural ha alterado la línea de equilibrio ecológico.

Las zonas de sedimentación, en cambio, a pesar de estar algunas veces a variación estacional, se han mantenido relativamente estables por el aporte regular de sedimento de los ríos. Con relación a la variabilidad temporal, se constata que la erosión se evidencia de forma pronunciada entre los años 2015 y hasta el año 2024, lo que podría justificarse por la mayor ocurrencia de eventos meteorológicos extremos, como es el caso de inundaciones y huracanes, que inciden sobre el área de la costa en ese año.

Este análisis temporal reafirma la importancia de considerar la variabilidad climática y sus consecuencias para el funcionamiento de la costa, y que en un contexto de cambio climático puede contribuir a favorecer la erosión en el largo plazo. Los datos generados son importantes a la hora de reforzar el uso de un modelo de ordenación costera adaptativa, que considere los rasgos y procesos naturales de erosión y sedimentación, y los efectos de las actividades humanas sobre la costa. La información obtenida a partir del análisis multitemporal con índices espectrales puede ser una base interesante en la consideración de acciones de intervención específicas sobre áreas vulnerables y favorecer la restauración de ecosistemas erosionados.

7.3. Estrategias de gestión costera basadas en los resultados obtenidos del análisis multitemporal

Los resultados del análisis multitemporal de la línea costera en Dibulla proporcionan información útil para la gestión costera y la planificación en la región. A través de la detección de las áreas más comprometidas por erosión o sedimentación, los resultados obtenidos permiten identificar y priorizar áreas de intervención y acciones específicas de mitigación. El conocimiento de cómo funcionan las dinámicas costeras favorece la implementación de políticas públicas que promuevan el uso sostenible del litoral, que preserven los ecosistemas de primera importancia y que minimicen los riesgos para la infraestructura y la población costera. A su vez, el análisis multitemporal permite comprobar la efectividad de las medidas que se han ido adoptando a lo largo del tiempo y permite abordar marcos de gobernanza adaptativa en el marco de la evolución de la línea costera.

En relación con la planificación territorial, los resultados ofrecen la base científica adecuada para una toma de decisiones fundamentadas sobre el uso en la zona costera. La información

geoespacial extraída de las imágenes satelitales y de los índices espectrales ponen de manifiesto la vulnerabilidad de las distintas áreas, permitiendo una planificación precisa y sostenible. Tal planificación habrá de tener en cuenta las variaciones que se producen en la dinámica del litoral costero natural, la resistencia de los ecosistemas naturales y la capacidad de las infraestructuras para poder resistir los efectos de la erosión, pues sólo de este modo se puede lograr un equilibrio entre el desarrollo del ser humano y la conservación del medio natural costero y poder garantizar así la sostenibilidad de la zona.

Para disminuir los efectos de la erosión y sedimentación en el municipio de Dibulla es necesario implementar de una forma integral, en la que se contemple al mismo tiempo la restauración de ecosistemas naturales y el control de las actividades humanas. La primera estrategia es la restauración y protección de los ecosistemas costeros, como los manglares, dunas, arrecifes. Los ecosistemas costeros actuarán como barreras naturales que servirán para proteger la costa, lo que reducirá el impacto de las olas y las corrientes. A su vez, la restauración de los ecosistemas costeros ayudará a la estabilización del litoral, y a su protección y conservación, fomentará la biodiversidad y contribuirá en la captura de carbono, un factor muy importante en el marco del cambio climático. La protección de estos espacios naturales será uno de los pilares de la estrategia a largo plazo.

A la par con el proceso de restauración ecológica, resulta necesario regular el crecimiento urbano y turístico en la costa de Dibulla. Las zonas vulnerables a la erosión localizada en espacios urbanos y en sectores turísticos que han visto un despliegue desmesurado de la actividad humana lo han modificado sustancialmente los procesos naturales de sedimentación. La planificación del territorio debe tener en cuenta criterios muy estrictos que controlen el crecimiento de estas áreas críticas, como lo es el desarrollo sostenible que no interfiera en la estabilidad del litoral. La promoción de la práctica del ecoturismo y la provisión de infraestructuras sostenibles son necesarias para alcanzar el equilibrio entre crecimiento económico y conservación del litoral.

En paralelo, el monitoreo de la línea costera por medio de tecnologías avanzadas, como las imágenes de satélites o los sistemas de información geográfica (SIG) es clave para la gestión. El análisis multitemporal servirá para aportar datos precisos de la variabilidad de la costa y evaluar la efectividad de las estrategias puestas en marcha. El uso adicional de vehículos aéreos no tripulados (UAV) y sensores remotos de alta resolución espacial permitirán un seguimiento mucho más

exhaustivo de los procesos costeros y mejorará la respuesta ante fenómenos meteorológicos extremos o cualquier otra inclemencia meteorológica.

A largo plazo, las soluciones de la naturaleza proporcionan una alternativa válida y sostenible para mitigar el impacto de la erosión. La reforestación con vegetación costera nativa y la restauración de los hábitats como los manglares y los lechos de hierbas, estos podrían estabilizar las costas y reducir la vulnerabilidad ante tormentas y huracanes. Las soluciones basadas en la naturaleza no sólo protegen la línea costera, sino que también generan servicios ecosistémicos valiosos, tales como la biodiversidad y la protección de los recursos de los ecosistemas, en consecuencia, tejen una red de restauración.

La administración de las cuencas hidrográficas adyacentes es otro de los componentes cruciales del mecanismo del control de la erosión. Los ríos que desaguan en la costa de Dibulla son agentes responsables de introducir sedimentos que permiten naturalmente la formación y conservación de las playas. Por ello, resulta de interés convertir la gestión de las cuencas hidrográficas en una propuesta de gestión integral, que potencia la reforestación y favorece la no deforestación y la no contaminación. Controlar la sedimentación fluvial con el fin de regular la erosión costera, favoreciendo a su vez la estabilidad de la línea de costa.

La participación de las comunidades locales es un elemento clave en la gestión costera. Es fundamental sensibilizar y educar a la población sobre los efectos de la erosión y la relevancia que los ecosistemas costeros tienen en esta realidad. La formulación de programas de educación ambiental puede conseguir una mayor implicación de los habitantes de Dibulla y generar unos hábitos de uso que favorezcan la conservación del litoral. Pero la participación de las comunidades locales en los procesos de planificación y desarrollo de la gestión costera también favorecerá la efectividad de estas actuaciones en cuanto que los habitantes locales son los que mejor conocen su territorio.

Si bien las soluciones naturales son partidas clave, en ciertas zonas más afectadas por la erosión, hay que recurrir a infraestructuras de protección como espigones y rompeolas. Sin embargo, estas infraestructuras deben ser diseñadas de forma concreta para evitar interferir la dinámica sedimentaria, así como asegurar que no generen efectos colaterales negativos en el ecosistema costero. La integración de estas infraestructuras en la planificación del litoral ha de ir

acompañada de estudios de impacto ambiental, que aseguran que las soluciones adoptadas no perjudiquen a la larga la estabilidad de la línea costera.

Para incrementar el proceso de toma de decisiones y asegurar la efectividad de las estrategias que se vayan a implementar, será deseable contar con modelos predictivos basados en datos históricos y en simulaciones de la dinámica de las costas. Con estos modelos se podrá prever los efectos de la erosión y sedimentación en los diferentes escenarios, al mismo tiempo que servirá como una información complementaria para la planificación del territorio en el largo plazo. Integrar estos modelos en el proceso de gestión costera supondría una oportunidad de empezar a vincular la toma de decisiones de una forma informada y adaptativa. Es recomendable también llevar a cabo un refuerzo de la gobernanza local y una regulación de las actividades humanas preexistentes en la costa. La capacidad de gestionar los recursos naturales y así como también la regulación del uso del suelo debe ser asumida por todos los actores implicados, incluidas las autoridades locales, las comunidades y las empresas. La colaboración de esos actores bajo un marco normativo claro y efectivo debe ser clave para poner en práctica las estrategias de gestión costera.

La recuperación de los hábitats costeros degradados como playas y dunas, deben ser una actividad prioritaria dentro de la gestión costera de Dibulla, pues además de proporcionar protección contra la erosión, son de vital importancia en la conservación de la biodiversidad y el bienestar de las poblaciones locales. La restauración de estos hábitats debe ir de la mano con un seguimiento constante que garantice la recuperación y la sostenibilidad a largo plazo, asegurando que las costas de Dibulla queden protegidas para futuras generaciones. En la siguiente tabla se resumen las estrategias y su impacto esperado.

Propuestas de Estrategias de Gestión Costera Basadas en el Análisis Multitemporal

El análisis multitemporal de la línea costera en Dibulla ofrece información práctica y esencial para la planificación y gestión de la región. Al detectar las áreas más críticas afectadas por la erosión o la sedimentación, el estudio permite priorizar dónde intervenir y qué acciones específicas de mitigación ejecutar. Comprender la dinámica costera no solo mejora la implementación de políticas que busquen el uso sostenible del litoral, sino que también protege ecosistemas vitales y minimiza el riesgo para la infraestructura y la población. Además, el análisis multitemporal es clave para medir la efectividad de las medidas adoptadas, facilitando un marco de gobernanza adaptativa.

Integración de Soluciones Ecológicas y Control Humano

Para mitigar efectivamente los efectos de la erosión y sedimentación en Dibulla, se requiere implementar una estrategia integral. El primer pilar debe ser la restauración y protección de ecosistemas costeros vitales (manglares, dunas, arrecifes). Estos actúan como barreras naturales que disminuyen el impacto del oleaje y las corrientes, estabilizan el litoral, y contribuyen a la biodiversidad.

A la par de la restauración ecológica, resulta crucial regular estrictamente el crecimiento urbano y turístico. Las zonas más vulnerables coinciden con espacios donde la actividad humana ha alterado sustancialmente los procesos naturales de sedimentación. Se recomienda que el desarrollo sostenible y la promoción del ecoturismo sean la norma, estableciendo criterios rigurosos para controlar el crecimiento en áreas críticas, asegurando que la expansión económica no interfiera con la estabilidad del litoral.

Monitoreo Tecnológico y Modelos Predictivos

El monitoreo continuo de la línea de costa es una herramienta esencial para anticipar riesgos y fortalecer la gestión ambiental del litoral. Se propone el uso de tecnologías avanzadas, como las imágenes satelitales multitemporales y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que permiten obtener datos precisos sobre la dinámica costera y evaluar la efectividad de las estrategias implementadas. Este monitoreo puede complementarse con vehículos aéreos no tripulados (UAV) y sensores de alta resolución, los cuales ofrecen información detallada sobre cambios morfológicos, desplazamientos sedimentarios y afectaciones derivadas de eventos extremos.

Además del monitoreo, resulta indispensable incorporar *modelos predictivos* que utilicen series temporales de datos históricos y variables ambientales para simular escenarios futuros de erosión y sedimentación. Estos modelos, fundamentados en técnicas estadísticas, hidrodinámicas y de aprendizaje automático, permiten anticipar la evolución del litoral bajo diferentes condiciones climáticas y de uso del suelo. Investigaciones recientes destacan la eficacia de los modelos predictivos costeros para identificar zonas de riesgo y orientar la planificación territorial sostenible (Martínez-Capel et al., 2023). En el caso de Dibulla, su aplicación facilitaría la toma de decisiones basadas en evidencia, optimizando los recursos destinados a la conservación y protección de la franja costera.

Consideraciones adicionales

Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas: Los ríos son clave para el aporte natural de sedimentos que conservan las playas. Por ello, la gestión de las cuencas adyacentes debe enfocarse en la reforestación y el control de la contaminación para asegurar una sedimentación fluvial estable.

Participación Comunitaria: Se sugiere sensibilizar y educar a la población sobre la relevancia de los ecosistemas costeros. La participación de los habitantes de Dibulla en la planificación garantiza que las acciones adoptadas sean más efectivas y sostenibles, dado que ellos son quienes mejor conocen su territorio.

Infraestructuras de Protección: Aunque las soluciones naturales son prioritarias, en zonas muy afectadas se puede recurrir a estructuras de protección. No obstante, su diseño debe ser extremadamente cuidadoso para evitar interferir negativamente con la dinámica sedimentaria natural y deben estar acompañadas de rigurosos estudios de impacto ambiental.

Tabla 4.
Estrategias de gestión costera

Estrategia de Gestión	Descripción	Acciones Específicas	Impacto Esperado
Restauración y Protección de Ecosistemas Naturales	Restaurar y proteger los ecosistemas costeros como manglares, dunas y arrecifes, que actúan como barreras naturales contra la erosión.	<ul style="list-style-type: none"> - Reforestación de manglares y vegetación costera nativa. - Restauración de dunas y áreas de pastos marinos. - Protección de arrecifes y ecosistemas marinos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción de la erosión costera. - Estabilización del litoral. - Aumento de la biodiversidad.
Regulación de la Expansión Urbana y Turística	Controlar el desarrollo urbano y turístico en las zonas costeras vulnerables para evitar la exacerbación de la erosión.	<ul style="list-style-type: none"> - Establecer zonas de protección costera sin intervención humana. - Regular la construcción de infraestructuras turísticas en áreas críticas. - Promover ecoturismo en lugar de turismo masivo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Limitación de la expansión urbana en zonas vulnerables. - Sostenibilidad en el desarrollo turístico.
Monitoreo Continuo y Uso de Tecnologías Avanzadas	Implementar un sistema de monitoreo continuo mediante imágenes satelitales, SIG y UAVs para evaluar y gestionar la erosión costera.	<ul style="list-style-type: none"> - Utilizar imágenes satelitales multitemporales. - Aplicar herramientas SIG y UAVs para un monitoreo más preciso. - Analizar la dinámica costera en tiempo real. 	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluación precisa y continua de la línea costera. - Mejora de la capacidad de respuesta ante cambios rápidos.

Soluciones Basadas en la Naturaleza	Implementar soluciones naturales como la vegetación costera para estabilizar la costa y mitigar la erosión sin alteraciones drásticas del entorno.	<ul style="list-style-type: none"> - Uso de vegetación costera nativa para reducir el impacto de las olas. - Restauración de hábitats como manglares y praderas de pastos marinos. - Promover la protección natural frente a la erosión. 	<ul style="list-style-type: none"> - Protección natural contra la erosión. - Conservación de la biodiversidad marina. - Sostenibilidad ecológica.
Protección y Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas	Gestionar de forma integral las cuencas hidrográficas cercanas para reducir la sedimentación en la costa y mitigar la erosión.	<ul style="list-style-type: none"> - Reforestación de cuencas fluviales. - Control de la deforestación y la contaminación en las cuencas. - Gestión del agua para reducir los sedimentos que llegan a la costa. 	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción de la carga sedimentaria en el litoral. - Prevención de la erosión en las áreas cercanas a los ríos.
Educación Ambiental y Participación Comunitaria	Sensibilizar y educar a la población local sobre la erosión costera y la importancia de la conservación, promoviendo su participación en la gestión costera.	<ul style="list-style-type: none"> - Implementar programas educativos en escuelas y comunidades locales. - Fomentar la participación de las comunidades en la planificación y restauración costera. - Desarrollar campañas de sensibilización ambiental. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor conciencia y compromiso de la comunidad. - Involucramiento activo en la protección del litoral.
Desarrollo de Infraestructura de Protección Costera	Implementar infraestructuras como espigones o rompeolas en áreas críticas donde las soluciones naturales no son suficientes.	<ul style="list-style-type: none"> - Construcción de espigones y barreras costeras en zonas de alta erosión. - Realización de estudios de impacto 	<ul style="list-style-type: none"> - Protección de áreas costeras vulnerables. - Reducción de la pérdida de territorio en áreas críticas.

Aplicación de Modelos Predictivos para la Planificación Costera	Utilizar modelos predictivos basados en datos históricos y simulaciones para prever el comportamiento futuro de la línea costera y mejorar la toma de decisiones.	<p>ambiental para asegurar que las infraestructuras no afecten negativamente el ecosistema.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Desarrollar modelos de simulación que predigan la erosión y sedimentación. - Aplicar escenarios de cambio climático en los modelos. - Integrar estos modelos en la planificación territorial y en la gestión costera. 	<ul style="list-style-type: none"> - Toma de decisiones informada y adaptativa. - Planificación costera anticipada frente a escenarios futuros.
Fortalecimiento de la Gobernanza y la Regulación Costera	Mejorar la coordinación entre actores clave y fortalecer la regulación costera para asegurar la sostenibilidad a largo plazo del litoral.	<ul style="list-style-type: none"> - Fortalecer la colaboración entre autoridades locales, ONGs y la comunidad. - Mejorar la regulación ambiental para limitar la intervención humana en zonas vulnerables. - Desarrollar políticas públicas basadas en los resultados de la investigación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Gestión integrada y sostenible de los recursos costeros. - Regulación más efectiva de las actividades humanas.
Restauración de Hábitats Costeros Degradados	Restaurar hábitats costeros como playas, dunas y humedales, que proporcionan	<ul style="list-style-type: none"> - Restauración de dunas costeras y playas. - Rehabilitación de humedales y 	<ul style="list-style-type: none"> - Protección y recuperación de la biodiversidad costera.

servicios ecosistémicos cruciales y protegen el litoral de la erosión.

otros hábitats críticos.

- Implementación de proyectos de monitoreo a largo plazo para evaluar el éxito de la restauración.

- Estabilización de la línea de costa.

8. Discusión

En este estudio, se analizó la dinámica de la erosión y sedimentación costera en el municipio de Dibulla entre los años 2010 y 2024, utilizando un enfoque multitemporal con Sistemas de Información Geográfica (SIG) y teledetección. Los resultados obtenidos muestran una tendencia general hacia el retroceso de la línea de costa, especialmente en áreas urbanizadas y zonas turísticas. Las zonas cercanas a desembocaduras fluviales presentaron un comportamiento diferente, con episodios de sedimentación. Estos resultados permiten identificar las áreas más vulnerables a los procesos de erosión, contribuyendo a una comprensión más precisa de la evolución de la costa en Dibulla.

Dicha investigación tiene su origen en el propósito de constatar y documentar cómo a lo largo del tiempo han ido evolucionando los procesos de erosión y sedimentación del litoral de Dibulla con el fin de poder proponer estrategias de gestión del litoral y de planificación territorial. Identificando las zonas más afectadas, el análisis multitemporal desarrollado en la investigación proporciona información útil para las intervenciones futuras. Los resultados del estudio permiten marcar la problemática de la erosión de la costa en un contexto global, en el que las áreas costeras del entorno presentes, de manera similar, se encuentran en situaciones de riesgo, provocadas por el cambio climático y la actividad humana.

8.1. Evolución de la línea costera entre 2010 y 2024

El análisis de la evolución de la línea costera en Dibulla entre 2010 y 2024 muestra un retroceso generalizado en la mayor parte del litoral, especialmente en zonas urbanizadas y de desarrollo turístico. Este comportamiento es consistente con lo observado en estudios previos realizados en otras regiones costeras, como los del sur del Caribe costarricense, donde la erosión se intensifica debido a la urbanización y las actividades humanas (Sandoval et al., 2021). Al igual que en otras áreas del Caribe, las dinámicas de erosión en Dibulla están fuertemente influenciadas por el cambio en el uso de la tierra, como lo señalan Gomes et al. (2022), quienes argumentan que la alteración de los ecosistemas costeros aumenta la vulnerabilidad de las costas a la erosión. En este sentido, el impacto de la intervención humana sobre los procesos naturales de sedimentación ha contribuido al retroceso de la línea costera en áreas de alto valor económico, como las zonas turísticas de Dibulla.

A lo largo del período de estudio, se observó que las áreas cercanas a las desembocaduras de ríos presentaron un patrón de sedimentación en lugar de erosión, lo que sugiere que el aporte de sedimentos desde las cuencas fluviales ha estabilizado temporalmente la costa en esos sectores. Este fenómeno es similar al observado por Barrantes y Ortega (2023), quienes encontraron que las desembocaduras fluviales actúan como fuentes naturales de sedimentación que pueden contrarrestar parcialmente la erosión costera, aunque de manera puntual y sin modificar la tendencia general en áreas cercanas. La sedimentación en Dibulla podría explicarse por el transporte de sedimentos provenientes de los ríos cercanos, lo cual ha favorecido la estabilización de algunos sectores de la línea costera. Sin embargo, este aporte no ha sido suficiente para mitigar los efectos de la erosión en zonas más afectadas por la actividad humana, lo que resalta la complejidad de la dinámica costera en la región.

El retroceso observado en los transectos de Dibulla también se alinea con lo reportado por Arriola et al. (2024), quienes documentaron un comportamiento similar en otras áreas del Caribe colombiano, donde la erosión costera está exacerbada por la combinación de factores naturales y humanos. En Dibulla, la presencia de infraestructuras turísticas y la expansión urbana han acelerado la erosión, como lo señala Vallarino et al. (2022), quienes encontraron que la urbanización y la infraestructura turística tienen un impacto directo en el equilibrio sedimentario de las costas. Este impacto es más evidente en los transectos cercanos a las zonas de desarrollo, donde se registraron las tasas de erosión más altas, de hasta -6 metros por año. La intervención humana en estas áreas modifica las dinámicas naturales, generando un desequilibrio en los procesos de sedimentación y contribuyendo al retroceso acelerado de la línea costera.

Por otro lado, el análisis de los datos de teledetección en conjunto con los SIG permite un enfoque multitemporal que facilita la identificación de patrones de cambio y su relación con el uso del suelo. Según la investigación de Barrantes y Ortega (2023), el uso de imágenes satelitales es clave para monitorear los cambios en la línea costera, ya que permite detectar con precisión las variaciones en la posición de la costa a lo largo del tiempo.

Las áreas más afectadas por la erosión costera en Dibulla se encuentran principalmente en las zonas urbanizadas y en los desarrollos turísticos, donde el retroceso de la línea de costa es más pronunciado. Este comportamiento es consistente con los estudios de Gomes et al. (2022), quienes señalan que la urbanización y las infraestructuras costeras alteran los procesos naturales de

sedimentación, incrementando la vulnerabilidad a la erosión. En el caso de Dibulla, el aumento de la presión humana sobre el litoral ha exacerbado este fenómeno, como también lo evidencian Barrantes y Ortega (2023) en sus investigaciones sobre los impactos de la intervención humana en las costas del Caribe. El uso de imágenes satelitales y SIG en este estudio ha permitido identificar con precisión estas zonas vulnerables, mostrando cómo las actividades humanas han acelerado el retroceso de la línea de costa.

En contraste, las áreas cercanas a las desembocaduras fluviales han mostrado un patrón distinto, con procesos de sedimentación que favorecen una estabilización temporal de la línea de costa. Este comportamiento está alineado con los hallazgos de Sandoval et al. (2021), quienes observaron que las desembocaduras de los ríos actúan como fuentes de sedimentos que contribuyen a la acumulación y reducción de la erosión costera. Sin embargo, a pesar de la estabilización en algunas zonas, los resultados muestran que estos procesos no son suficientes para mitigar la erosión generalizada en Dibulla, lo que coincide con las conclusiones de Arriola et al. (2024), quienes afirman que la influencia del aporte fluvial de sedimentos es limitada cuando otros factores, como la intervención humana, son predominantes.

La influencia de los factores hidrodinámicos, tales como el oleaje y las corrientes marinas, también ha sido clave en los procesos de erosión y sedimentación en Dibulla. Según lo reportado por Vallarino et al. (2022), las características hidrodinámicas de una costa juegan un papel determinante en la variabilidad de la línea de costa. En el caso de Dibulla, las zonas más expuestas al oleaje y las corrientes marinas muestran una mayor tasa de erosión, lo que coincide con los hallazgos de Souza et al. (2021), quienes explican cómo la interacción de estos factores naturales con las modificaciones inducidas por el ser humano intensifica la erosión. Esta compleja interacción resalta la necesidad de estrategias de gestión costera que integren tanto los aspectos naturales como los antropogénicos, como sugieren Arriola et al. (2024), para poder abordar de manera efectiva los procesos de erosión y sedimentación en la región.

8.2. Aplicación de índices espectrales (NDVI y NDWI)

El análisis de los índices espectrales, como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) y el NDWI (Índice Diferencial de Agua Normalizada), ha permitido identificar cómo la vegetación y la humedad superficial influyen en los procesos de erosión y sedimentación en el municipio de Dibulla. Los resultados obtenidos muestran que las zonas con alta densidad de

vegetación, especialmente cerca de las desembocaduras fluviales, presentan un patrón de sedimentación que favorece la estabilidad de la línea costera. Este comportamiento está en línea con lo descrito por Vallarino et al. (2022), quienes destacan que la vegetación costera juega un papel clave en la protección de las costas al reducir la velocidad del oleaje y estabilizar los sedimentos. En Dibulla, las áreas donde el NDVI muestra valores positivos reflejan una mayor cobertura vegetal, lo que está asociado con la protección natural frente a la erosión.

Por otro lado, las áreas donde se observó un retroceso de la línea costera suelen coincidir con valores bajos de NDVI, lo que indica una disminución en la cobertura vegetal, fenómeno común en zonas afectadas por actividades humanas, como la urbanización y el turismo. Este patrón de cambio es consistente con los resultados de Sandoval et al. (2021), quienes indican que la pérdida de vegetación costera está estrechamente relacionada con la intensificación de los procesos de erosión. En Dibulla, las áreas donde el NDWI mostró un aumento en los valores de humedad superficial, como las cercanas a las desembocaduras de los ríos, presentaron procesos de sedimentación. Esto respalda la teoría de Barrantes y Ortega (2023), quienes señalan que el aporte de agua de los ríos a la costa favorece la acumulación de sedimentos, contribuyendo a la estabilización temporal de la línea costera en estas zonas.

Sin embargo, los procesos de erosión en otras áreas del litoral de Dibulla no han sido mitigados por la sedimentación observada en las desembocaduras fluviales. Los valores negativos en los índices espectrales en zonas urbanizadas y turísticas confirman que la intervención humana ha modificado los procesos naturales de sedimentación y ha acelerado la erosión. Este comportamiento es coherente con los hallazgos de Gomes et al. (2022), quienes afirman que las actividades humanas, como la construcción de infraestructura y el desarrollo turístico, alteran los ciclos naturales de sedimentación y erosionan los ecosistemas costeros. Por lo tanto, el análisis de los índices espectrales no solo ha permitido identificar áreas críticas de erosión, sino también resaltar la importancia de las estrategias de restauración de la vegetación costera para contrarrestar estos efectos y promover la estabilidad a largo plazo del litoral.

8.3.Comparación con la Literatura Existente

En cuanto a los resultados obtenidos en este estudio sobre la dinámica de erosión y sedimentación costera en Dibulla, La Guajira, coinciden parcialmente con los hallazgos de investigaciones previas en el Caribe y otras zonas costeras de Colombia. En particular, los patrones

de erosión observados en áreas urbanizadas y de expansión turística se asemejan a los descritos por Sandoval et al. (2021) en el Caribe costarricense, donde la construcción de infraestructura turística ha intensificado la pérdida de playa. De igual modo, los planteamientos de Gomes et al. (2022) sobre la influencia humana en la alteración del equilibrio sedimentario son coherentes con los resultados obtenidos en Dibulla, donde las actividades productivas y urbanas han contribuido al retroceso de la línea costera.

Sin embargo, este estudio presenta hallazgos que lo hacen diferente a la literatura previa. A diferencia de la tendencia erosiva uniforme reportado en otras regiones, en Dibulla se identificaron *zonas con procesos simultáneos de erosión y sedimentación*, especialmente en sectores próximos a las desembocaduras fluviales. Mientras Barrantes y Ortega (2023) señalaron que los aportes fluviales tienden a estabilizar las costas de forma temporal, en Dibulla se evidenció que dichos aportes son irregulares y no compensan la pérdida generalizada del litoral. Esta variabilidad espacial representa un comportamiento distinto al de otros litorales del Caribe, donde la sedimentación suele concentrarse de manera más estable.

Otra diferencia significativa radica en la *precisión metodológica*. Mientras la mayoría de los estudios anteriores se apoyaban en observaciones de campo y mediciones puntuales, esta investigación empleó tecnologías de teledetección y análisis multitemporal con imágenes Landsat y Sentinel, lo que permitió una evaluación más detallada y objetiva de la evolución costera. Este enfoque metodológico mejoró la capacidad de detección de cambios en lapsos cortos y reveló patrones no observados con técnicas tradicionales (en contraste con los resultados de Barrantes y Ortega, 2023).

En síntesis, este trabajo no solo confirma tendencias globales sobre la influencia humana en la erosión costera, sino que aporta evidencia empírica diferenciada sobre la interacción entre los aportes fluviales, la dinámica hidrodinámica y las variaciones locales en la sedimentación. Asimismo, introduce un modelo de análisis multitemporal aplicable a otras zonas costeras de La Guajira, lo que amplía el conocimiento existente y contribuye a una gestión costera basada en información precisa y actualizada.

9. Conclusiones

La finalidad de esta investigación fue analizar la dinámica de erosión y sedimentación costera en el municipio de Dibulla durante el período 2010 a 2024, identificando los cambios en la línea de costa, para lo cual se utilizaron herramientas de SIG y teledetección. Los objetivos específicos incluyeron caracterizar las zonas más afectadas por estos procesos y proponer esquemas de gestión costera, basándose en los resultados obtenidos. Los resultados indican que el retroceso de la línea de costa es más evidente en zonas urbanizadas y de alto desarrollo turístico; por el contrario, las zonas cercanas a desembocaduras fluviales presentan episodios de sedimentación, tal y como se asocia con la intervención humana y los aportes fluviales, los cuales han llegado a alterar la dinámica de los procesos naturales de sedimentación y erosión del litoral de Dibulla.

El análisis multitemporal a partir de las imágenes satelitales ha permitido observar la evolución de la línea de costa a través de los años, evidenciando en todo momento la variabilidad de los procesos de erosión y de sedimentación. De hecho, el uso de SIG ha facilitado la identificación de las zonas más propensas hacia la erosión y ha ayudado a cuantificar el cambio producible en la línea costera, favoreciendo así el entendimiento de la participación de los procesos naturales y humanos como desencadenadores de la dinámica costera. Estos resultados constituyen información relevante para la planificación territorial y la gestión costera en Dibulla, permitiendo de este modo aplicar medidas adaptativas que tiendan a evitar la erosión y la conservación de los ecosistemas litorales.

La transformación de la línea costera de Dibulla durante el periodo 2010 y 2024 se ha caracterizado por un retroceso generalizado en varias áreas, dado principalmente por los fenómenos de erosión. Las áreas donde se ha manifestado en mayor grado este fenómeno antrópico se encuentran en las áreas urbanizadas de alto desarrollo turístico, donde la intervención humana ha modificado los procesos naturales. La construcción de infraestructuras y aumento de actividades humanas en la franja costera han acelerado la erosión, modificando la dinámica de sedimentación y afectando la estabilidad del litoral. Tal retroceso ha sido evidente en las playas cercanas a los centros urbanos, donde la tasa de erosión ha llegado a ser de hasta 6 metros por año en algunos sectores.

La influencia de la urbanización y del turismo en el fenómeno de erosión costera ha sido un hecho constatado a través de todo el municipio, pero especialmente en aquellas áreas donde se han ejecutado infraestructuras turísticas sin una planificación adecuada. Este tipo de obras, junto con aquellas acciones que han ido aumentando la acción del ser humano en el litoral, han alterado los ciclos naturales de sedimentación, provocando una erosión de las costas mucho más rápida. En esos sectores, la erosión se ha visto incrementada por la dificultad de la naturaleza para protegerse, en especial la vegetación costera o bien la conformación de ecosistemas como son los manglares, que pueden hacer de barrera natural ante la erosión. Así, las áreas urbanas y turísticas han visto cómo su línea de costa se ha alterado considerablemente, teniendo en cuenta la modificación en el uso del suelo.

Por el contrario, los territorios que se encuentran en las proximidades de las desembocaduras de los ríos han desarrollado una dinámica de sedimentación. La llegada de sedimentos procedentes de los ríos ha dado lugar a un cierto proceso de estabilización de la línea de costa especialmente en los sectores de estuarios y zonas de influencia de los ríos. Estos tipos de depósitos fluviales alcanzados desde la erosión del río y el abuso del material transportado por los ríos han promovido la sedimentación de nuevas áreas de playa y han ayudado un poco a suavizar la erosión de algunas partes del litoral. En este sentido, estos procesos de sedimentación no han sido suficientes para suavizar la erosión existente en otras zonas de la costa, por lo que se puede observar la desigualdad de la influencia de estos procesos en la costa.

El examen de la temporalidad de los datos también ha permitido constatar que, a pesar de que ciertas áreas han tenido episodios de sedimentación, el retroceso de la línea costera se mantiene como el dominante en el municipio de Dibulla. En las áreas con fuertes intervenciones de los humanos, éstas corresponden a zonas urbanas y turísticas, el aporte de sedimentos no ha sido suficiente para contrarrestar el efecto de la erosión; lo cual deja en evidencia la necesidad de un enfoque de gestión costera que contemple no sólo los deportes naturales, sino también la regulación de las actividades humanas que inciden en la estabilidad de la costa. Las políticas de ordenación del territorio deben contemplar estos aspectos para no acentuar el deterioro de los ecosistemas costeros, así como para llegar a mitigar los efectos que generan la erosión.

En una línea similar la técnica del análisis multitemporal, mediante imágenes satelitales y el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha resultado ser determinante para poder

estudiar la dinámica costera del municipio de Dibulla desde 2010 a 2024. Gracias a las imágenes obtenidas de los satélites se lograron obtener datos bastante precisos y muy descriptivos de la línea costera en un momento del tiempo, lo que permitió identificar de una forma precisa los cambios en la morfología del litoral.

El uso de SIG ayuda al manejo y al análisis de las imágenes obtenidas, constituyendo a una representación integral de las variaciones de la línea de costa y ayudando también a cuantificar de forma objetiva y precisa los procesos de erosión y sedimentación. Todo ello quedó reflejado para la obtención de un conocimiento fundamental de la evolución costera en el espacio analizado o para poder detectar las zonas más sensibles a los efectos de dichos procesos.

La capacidad de las imágenes de satélite para dar una cobertura amplia y continua, junto con la capacidad de los SIG para integrar y analizar grandes cantidades de datos geoespaciales, ha mejorado mucho la precisión del análisis costero. Las herramientas de teledetección han permitido una evaluación detallada de las dinámicas de erosión y sedimentación, superando las limitaciones de los métodos tradicionales basados en trabajo de campo. Este enfoque no solo da una evaluación precisa de la evolución de la línea costera, sino que también permite realizar comparaciones entre diferentes períodos de tiempo, ayudando a la identificación de tendencias y patrones en los procesos costeros. De este modo, el análisis multitemporal con SIG y teledetección se ha mostrado como una herramienta clave para el monitoreo y la gestión sostenible del litoral de Dibulla.

Los resultados de este análisis temporal sobre la erosión y sedimentación costera en Dibulla ofrecen una base firme para la toma de decisiones en la planificación del territorio. La identificación de las áreas más afectadas por estos procesos es clave para priorizar las intervenciones en zonas vulnerables y así hacer un mejor uso de los recursos. Entender cómo ha cambiado la línea costera a lo largo del tiempo permite diseñar estrategias de intervención precisas para cada sector, ajustando las políticas de uso del suelo a las condiciones del litoral. Esto permite una planificación más eficiente que se alinea con las dinámicas naturales del entorno costero.

Los resultados subrayan la importancia de un enfoque flexible en la gestión costera, que contemple tanto los cambios pasados en la costa como las predicciones futuras sobre el cambio climático y la expansión urbana. Las áreas más vulnerables a la erosión, en particular las cercanas a ciudades y sitios turísticos, requieren una regulación más estricta en cuanto a la construcción y el uso del suelo. De forma similar, las áreas de acumulación de sedimentos, que han mostrado mayor

estabilidad, pueden ser protegidas y mejoradas como áreas naturales de resguardo, como manglares y dunas, que asisten a reducir los impactos de la erosión.

En esta línea, los resultados obtenidos pueden orientar la aplicación de acciones preventivas y correctivas para disminuir la vulnerabilidad costera. Las intervenciones deben ajustarse a cada zona, considerando su geomorfología y el grado de erosión. La información de este estudio puede incorporarse en planes de ordenamiento territorial, tanto locales como regionales, apoyando un desarrollo más sostenible y resiliente frente a los eventos naturales. Esto asegurará la protección de la infraestructura y los recursos naturales, así como la conservación de los ecosistemas costeros, que son clave para la biodiversidad y la economía de la región.

A partir de los resultados de este análisis temporal, se sugieren estrategias para la gestión y preservación de la costa de Dibulla, centradas en la recuperación de ecosistemas nativos y el control del desarrollo urbano. La recuperación de áreas como manglares, dunas y praderas marinas puede ser importante para la estabilización de la costa y la protección natural contra la erosión. Estos ecosistemas funcionan como barreras que atenúan el impacto de las olas y las corrientes, y fomentan la biodiversidad local. Es preciso poner en marcha proyectos de reforestación costera que ayuden a restaurar estos hábitats, lo que contribuye a la resistencia de la costa ante fenómenos climáticos extremos.

Para disminuir la presión poblacional en la costa y proteger las áreas vulnerables de la erosión, es clave regular el desarrollo urbano y turístico. Se deben crear zonas protegidas donde se prohíba construir, especialmente en áreas de alto riesgo de erosión. La planificación del territorio debe combinarse con políticas de desarrollo sostenible que limiten la actividad humana en zonas de riesgo y promuevan el turismo ecológico, que tiene un menor impacto en el ambiente. Es importante impulsar un turismo que respete el entorno natural y use estructuras adecuadas a las condiciones de la costa, sin dañar el equilibrio ecológico.

Por último, las estrategias de manejo deben involucrar la supervisión continua de la costa a través de tecnologías como SIG y teledetección, con el fin de rastrear las variaciones en la línea costera y determinar si las acciones tomadas están funcionando. La obtención de datos en tiempo real permitirá una reacción rápida frente a cualquier cambio importante en la erosión o sedimentación. También, es importante impulsar la participación de la comunidad en las decisiones sobre el manejo de la costa, para que los residentes locales se involucren en la conservación y

restauración de su ambiente natural. Esto ayudará a crear conciencia sobre la relevancia de proteger la costa y asegurar el uso sostenible de los recursos costeros a largo plazo.

10. Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación sobre la erosión y sedimentación costera en Dibulla, se abren diversas posibilidades para futuras investigaciones que profundicen en el entendimiento y manejo de los procesos costeros.

I. Una de las primeras recomendaciones es avanzar en el uso de modelos predictivos que integren no solo los datos geoespaciales, sino también aspectos relacionados con el cambio climático. A través de la modelización de escenarios climáticos futuros, se podrían generar proyecciones a largo plazo sobre la erosión y sedimentación costera. Estos modelos permitirían anticiparse a los posibles cambios en la línea costera, lo que sería clave para una planificación territorial más eficaz, especialmente en contextos de variabilidad climática como el que se prevé para el Caribe colombiano.

II. En cuanto a un área complementaria que merece atención y que esta tesis no abordó profundamente es la incorporación de datos más detallados sobre la dinámica submarina. En este sentido, las futuras investigaciones podrían incluir el uso de modelos digitales de elevación (DEM) y estudios batimétricos que permitan obtener una visión más precisa de las variaciones topográficas en el litoral y las áreas submarinas cercanas. Esto no solo enriquecería el análisis de los procesos de erosión, sino que también permitiría un mejor entendimiento de cómo los cambios en el fondo marino interactúan con los procesos sedimentarios.

III. Teniendo en cuenta que este estudio se enfocó principalmente en los aspectos geoespaciales y ambientales, la integración de un enfoque socioeconómico en investigaciones futuras podría ofrecer una visión más completa de los impactos de la erosión costera en las comunidades locales. Aunque se han identificado zonas vulnerables, es importante analizar más a fondo cómo la pérdida de territorio y los daños a la infraestructura afectan directamente la calidad de vida de los habitantes de Dibulla. Este tipo de investigaciones podría ayudar a diseñar estrategias de adaptación que no solo se centren en la protección del medio ambiente, sino también en la mejora de la resiliencia social y económica de las comunidades costeras.

IV. Además, otro camino valioso de investigación sería profundizar en los impactos de la erosión y sedimentación en los ecosistemas costeros, especialmente en los manglares, dunas y pastos marinos, que juegan un papel fundamental en la estabilidad de la línea costera. Aunque en

esta tesis se propuso su restauración, estudios adicionales podrían centrarse en las técnicas más efectivas para restaurar estos hábitats y evaluar cómo su recuperación puede ayudar a mitigar los efectos de la erosión en áreas vulnerables. Asimismo, sería útil explorar el uso de nuevas tecnologías en la restauración, como las soluciones bioinspiradas que se están comenzando a aplicar en otras regiones costeras.

V. El análisis de la actividad humana en relación con la erosión costera también constituye un área prometedora para futuras investigaciones. Aunque esta tesis ha mostrado que la urbanización y las infraestructuras turísticas contribuyen significativamente a la erosión, sería interesante investigar más a fondo cómo diferentes tipos de actividades humanas, como la agricultura o la explotación de recursos naturales, afectan específicamente la dinámica costera. Conocer la influencia exacta de cada actividad permitirá diseñar estrategias de gestión más específicas, adaptadas a las necesidades y características de cada zona afectada.

VI. Otro de los aspectos que podría ser investigado en detalle es la influencia de los factores hidrodinámicos, como el oleaje y las corrientes marinas, en los procesos de erosión y sedimentación. Si bien se ha identificado que estas fuerzas naturales tienen un impacto considerable en la línea costera, estudios más profundos podrían centrarse en cómo varían estos procesos a lo largo del año o en respuesta a fenómenos meteorológicos extremos. De esta manera, se podría prever con mayor precisión cómo la dinámica costera de Dibulla se ve alterada por diferentes condiciones climáticas y cómo esto podría afectar la estabilidad de la costa en el futuro.

VII. La creación de modelos integrales de gestión costera, que consideren tanto los aspectos ecológicos como los económicos y sociales, es otro campo donde esta investigación puede ser ampliada. Con una visión más holística, las futuras investigaciones podrían generar soluciones más adaptativas para la gestión de la erosión costera. Estos modelos podrían integrar las diferentes variables que afectan la costa, como la urbanización, el cambio climático y las dinámicas fluviales, y proporcionar herramientas más eficaces para la toma de decisiones en políticas públicas de ordenamiento territorial y gestión ambiental.

VIII. El uso de tecnologías avanzadas, como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, podría transformar la forma en que monitoreamos y analizamos la erosión costera. Aunque esta tesis ya ha utilizado imágenes satelitales y SIG, las investigaciones futuras podrían incorporar algoritmos de aprendizaje automático para identificar patrones en la dinámica costera

de manera más precisa y eficiente. Estas tecnologías permitirían procesar grandes volúmenes de datos y realizar predicciones más exactas, lo que mejoraría la capacidad de respuesta ante fenómenos naturales y permitiría tomar decisiones informadas en tiempo real.

IX. Por otro lado, no solo es necesario continuar con el monitoreo de la erosión, sino también con la evaluación de los resultados de las medidas de restauración y protección implementadas. En este sentido, futuras investigaciones podrían centrarse en el análisis de la efectividad de las intervenciones, evaluando cómo las estrategias adoptadas para mitigar la erosión, como la restauración de ecosistemas o la construcción de infraestructuras de protección, han funcionado a lo largo del tiempo.

Este tipo de evaluación sería fundamental para mejorar las estrategias de gestión y garantizar que las inversiones realizadas tengan un impacto real en la preservación del litoral. Por último, se recomienda que futuras investigaciones exploren la cooperación entre municipios y regiones vecinas para la gestión costera. La dinámica costera no se detiene en las fronteras municipales, por lo que estudios que promuevan la colaboración regional serían de gran valor. La creación de redes de información y estrategias de gestión conjunta podría optimizar los recursos y permitir una respuesta más coordinada y efectiva frente a los retos de la erosión y sedimentación en el Caribe colombiano.

Referencias

- Aguilar Calderón, P. A. (2021). *Evaluación de la opresión costera en Mazatlán, Sinaloa* [Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional UNAM. <https://ru.dgb.unam.mx/server/api/core/bitstreams/0ccb89d0-0180-4da1-9b99-b395ce52c920/content>
- Andreoli, A. (2024). *Estudio morfodinámico y de las secuencias sismoestratigráficas cuaternarias de la plataforma marina adyacente al estuario de Bahía Blanca* [Tesis doctoral, Universidad Nacional del Sur]. Repositorio Digital UNS. <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/6939>
- Andriolo, U., y Gonçalves, G. (2022). Is coastal erosion a source of marine litter pollution? Evidence of coastal dunes being a reservoir of plastics. *Marine Pollution Bulletin*, 174, 113307. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.113307>
- Apostolopoulos, D., y Nikolakopoulos, K. (2021). A review and meta-analysis of remote sensing data, GIS methods, materials and indices used for monitoring the coastline evolution over the last twenty years. *European Journal of Remote Sensing*, 54(1), 240–265. <https://doi.org/10.1080/22797254.2021.1904293>
- Arriola-Velásquez, A. C., Tejera, A., Alonso, I., Cámara, F., Cantaluppi, M., Alonso, H., Miquel-Armengol, N., Rubiano, J. G., y Martel, P. (2024). Natural radionuclides as tracers of coastal sediment dynamics in El Confital Bay (Spain): Spatial distribution and relationships with sediment characteristics. *CATENA*, 235, 107672. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107672>
- Atkinson, P. M., Stein, A. D., & Jeganathan, C. (2022). *Spatial sampling, data models, spatial scale and ontologies: Interpreting spatial statistics and machine learning applied to satellite optical remote sensing*. *Spatial Statistics*, 50, 100646. <https://doi.org/10.1016/j.spasta.2022.100646>
- Barrantes-Castillo, G., y Ortega-Otárola, K. (2023). Coastal erosion and accretion on the Caribbean coastline of Costa Rica long-term observations. *Journal of South American Earth Sciences*, 127, 104371. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104371>
- Becerra Vega, E. A. (2023). *Caracterización de la ganadería bovina y sus impactos socioambientales en la cuenca del Río Arroyo Seco, municipios de Cihuatlán y Cuautitlán*

- de García Barragán, Jalisco, México* [Tesis de maestría, Universidad de Guadalajara]. Repositorio Institucional Universidad de Guadalajara. <https://riudg.udg.mx/bitstream/20.500.12104/98274/1/MCUCSUR10098FT.pdf>
- Becker, C., Barboza, E. G., y Martins, E. M. (2021). Uma visão política-administrativa e morfológica dos balneários Esplanada e Campo Bom do Município de Jaguaruna, SC. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 22(4). <https://doi.org/10.20502/rbg.v22i4.1806>
- Bergamasco, L., Bovolo, F., y Bruzzone, L. (2023). A Dual-Branch Deep Learning Architecture for Multisensor and Multitemporal Remote Sensing Semantic Segmentation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 16, 2147–2162. <https://doi.org/10.1109/jstars.2023.3243396>
- Briceño de Urbaneja, I. C., Pardo-Pascual, J. E., Cabezas-Rabadán, C., Aguirre, C., Martínez, C., Pérez-Martínez, W., y Palomar-Vázquez, J. (2024). Characterization of Multi-Decadal Beach Changes in Cartagena Bay (Valparaíso, Chile) from Satellite Imagery. *Remote Sensing*, 16(13), 2360. <https://doi.org/10.3390/rs16132360>
- Câmara, I. F. da, Holanda, T. F. de, y Costa, M. B. (2023). Erosão e gestão costeira em praias protegidas por recifes no litoral sul de Pernambuco. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 24(1). <https://doi.org/10.20502/rbg.v24i1.2189>
- Carrera Farro, M. E. (2020). *La erosión costera y su impacto en el desarrollo de proyectos residenciales en el Balneario de Buenos Aires zona norte*. (Tesis de maestría, Universidad César Vallejo). Repositorio Institucional de la Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/42652>
- Chaparría, V. E., Peris, J. S., y González-Escrivá, J. A. (2022). Coastal Monitoring Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for the Management of the Spanish Mediterranean Coast: The Case of Almenara-Sagunto. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(9), 5457. <https://doi.org/10.3390/ijerph19095457>
- Chuvieco, E. (2016). *Fundamentos de teledetección espacial* (5.ª ed.). Rialp
- Coelho, C. (2023). Sediment Dynamics in Artificial Nourishments. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(7), 1433. <https://doi.org/10.3390/jmse11071433>

- Coelho, C., Lima, M., y Ferreira, M. (2022). A Cost–Benefit Approach to Discuss Artificial Nourishments to Mitigate Coastal Erosion. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(12), 1906. <https://doi.org/10.3390/jmse10121906>
- Coelho, C., Narra, P., Marinho, B., y Lima, M. (2020). Coastal Management Software to Support the Decision-Makers to Mitigate Coastal Erosion. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(1), 37. <https://doi.org/10.3390/jmse8010037>
- Congreso de Colombia. (1973). Ley 23 de 1973. Diario Oficial No. 33.803, de 5 de marzo de 1973. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=9018>
- Congreso de Colombia. (1993). Ley 99 de 1993. Diario Oficial No. 41.146, de 22 de diciembre de 1993. http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0099_1993.html
- Da Silveira, I. R. L., Castro, J. W. A., Fernandes, D., Cabral, C. L., Junior, W. C. G., y De Oliveira, D. M. V. (2021). Dinâmica das Dunas Escalonares Transgressivas Sobre a Região do Peró - Cabo Frio, Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 22(4). <https://doi.org/10.20502/rbg.v22i4.2041>
- Daza Brito, O. P. (2022). *Aplicación de modelos matemáticos de transporte de sedimentos para la estimación de cambios morfológicos en las playas de Ciénaga, Magdalena*. <https://hdl.handle.net/10584/10895>
- Díaz Orozco, J. A. (2022). *Análisis de los procesos hidrodinámicos y sedimentológicos en la desembocadura del Río Magdalena a partir de modelación computacional*. Repositorio Institucional Universidad del Atlántico. <http://hdl.handle.net/10584/11645>
- Dissanayake, P., Brown, J., y Yates, M. (2022). Morphodynamic Evolution and Sustainable Development of Coastal Systems. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(5), 647. <https://doi.org/10.3390/jmse10050647>
- Durán Márquez, M. L. (2025). *Análisis geomorfoestructural de los rasgos asociados con el diapirismo de lodo en el talud continental costa afuera de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe colombiano* (Tesis de maestría, Universidad del Norte). Repositorio Institucional Universidad del Norte. <http://hdl.handle.net/10584/13512>
- Dutra, V. C. S., Silva, A. L. C. da, Pinheiro, A. B., Vasconcelos, S. C. de, y Oliveira Filho, S. R. de. (2022). Caracterização morfológica e sedimentar do sistema praia-barreira arenosa e os efeitos das ondas de tempestade no litoral de Jaconé-Saquarema (RJ), Sudeste do Brasil.

- Revista Brasileira de Geomorfologia, 23(2), 1435–1455.
<https://doi.org/10.20502/rbg.v23i2.2092>
- Escamilla Trejo, A. (2023). *Bases para la planeación espacial de la zona costera de los municipios de Guaymas y Empalme, Sonora, México: Enfoque basado en el ecosistema* [Tesis de maestría, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C.]. Repositorio CIBNOR. <http://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1001/2694>
- Escandón-Panchana, J., Elao Vallejo, R., Escandón-Panchana, P., Velastegui-Montoya, A., y Herrera-Franco, G. (2022). Spatial Planning of the Coastal Marine Socioecological System—Case Study: Punta Carnero, Ecuador. *Resources*, 11(8), 74. <https://doi.org/10.3390/resources11080074>
- Espinosa Mateo, D. (2023). *Evaluación geoambiental del litoral de Santa Fe, municipio Playa, La Habana* (Tesis de maestría, Universidad de La Habana). Repositorio Institucional Universidad de La Habana. [https://fototeca.uh.cu/files/original/2191944/Tesis_Daniella_Entregar_\[12.03.23\].pdf](https://fototeca.uh.cu/files/original/2191944/Tesis_Daniella_Entregar_[12.03.23].pdf)
- Feng, X., Zhu, C., Liu, J. P., & Jia, Y. (2023). *Sediment dynamics in coastal and marine environments: Scientific Advances. Water*, 15(7), 1404. <https://doi.org/10.3390/w15071404>
- Galacho-Jiménez, F. B., y Reyes-Corredera, S. (2024). Spatial Analysis Model for the Evaluation of the Territorial Adequacy of the Urban Process in Coastal Areas. *Land*, 13(1), 109. <https://doi.org/10.3390/land13010109>
- Gallego, A., Pellón, E., & Gomes da Silva, P. (2024). SEATool: una toolbox de ArcGIS Pro para el análisis de evolución de líneas de costa. En XII Jornadas de Geomorfología Litoral. Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18659>
- Gao, G., Liu, B., Zhang, X., Jin, X., y Gu, Y. (2022). Multitemporal Intrinsic Image Decomposition With Temporal–Spatial Energy Constraints for Remote Sensing Image Analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1–16. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2021.3078171>
- García Echavarría, L. M. (2021). *Vulnerabilidad costera en cuatro sitios del suroeste del Caribe Colombiano ante el ascenso del nivel del mar* [Tesis de maestría, Universidad de Antioquia]. Repositorio Institucional Universidad de Antioquia. <http://hdl.handle.net/10495/24628>

- García Laiton, L. (2021). *Clima marítimo, procesos de erosión/acreción y amenazas/vulnerabilidades por erosión: caso de estudio de la barrera costera de Puerto Velero, Departamento del Atlántico*. [Tesis de maestría, Universidad del Atlántico]. Repositorio Institucional Universidad del Atlántico. <http://hdl.handle.net/10584/10837>
- Garzo, P. A., Sánchez-Caro, L., y Mojica, M. (2023). Coastal erosion in temperate barriers: an anthropized sandy beach in Buenos Aires, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 128, 104453. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104453>
- Gomes, G. de O., Filho, N. O. H., y Moresco, B. S. (2022). Evidências deposicionais e/ou erosivas em dois setores do arco praial Joaquina - Morro das Pedras, ilha de Santa Catarina, SC, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 23(1). <https://doi.org/10.20502/rbg.v23i1.1970>
- Gouvea Junior, W. C., Fernandes, D., y Castro, J. W. de A. (2022). Análise das variáveis físicas e dinâmicas do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) na enseada da Baía Formosa, Região dos Lagos Fluminense, Estado do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 23(4), 1812–1833. <https://doi.org/10.20502/rbg.v23i4.2144>
- Guerrero Gómez, R. J. (2022). *Análisis de estado de falla geotécnica por acciones hidrodinámicas en el Tajamar Occidental de Bocas de Ceniza, de Barranquilla* [Tesis de maestría, Universidad del Atlántico]. Repositorio Institucional Universidad del Atlántico. <http://hdl.handle.net/10584/10831>
- Hovestad, L. (2024). *Types of research: Descriptive, exploratory and explanatory*. Joww Scriptiecoach. <https://jouwscriptiecoach.nl/en/thesis-tips/types-of-research>
- Hunziker, A., & Blankenagel, M. (2024). *Longitudinal research design*. In *Research Design in Business and Management* (pp. 201-220). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-658-42739-9_11
- Index IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing Vol. 13. (2020). *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 6537–6633. <https://doi.org/10.1109/jstars.2021.3050695>
- Jaramillo Rodríguez, O. (2022). *El turismo frente a los principales efectos del cambio climático durante el siglo XXI. Estudio de caso: municipio de Santa Marta, Colombia* [Tesis de maestría, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia]. Repositorio Institucional

- UPTC. <https://repositorio.uptc.edu.co/server/api/core/bitstreams/89019baa-5fbd-40e2-a5d8-703c6da47c52/content>
- Jaramillo, C., Jara, M. S., González, M., y Medina, R. (2020). A shoreline evolution model considering the temporal variability of the beach profile sediment volume (sediment gain / loss). *Coastal Engineering*, 156, 103612. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.103612>
- Laguna Cruz, M. (2021). *Relación de la comunidad de cangrejos con los procesos erosivos de la playa Puerto Vargas, Parque Nacional Cahuita, Limón, para el planteamiento de acciones de conservación* [Tesis de maestría, Universidad Nacional, Costa Rica]. Repositorio Institucional Universidad Nacional. <http://hdl.handle.net/11056/23478>
- Lämmle, L., Perez Filho, A., Donadio, C., Arienzo, M., Ferrara, L., Santos, C. de J., y Souza, A. O. (2022). Anthropogenic Pressure on Hydrographic Basin and Coastal Erosion in the Delta of Paraíba do Sul River, Southeast Brazil. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(11), 1585. <https://doi.org/10.3390/jmse10111585>
- Lee, J., Smith, D., & Wang, M. (2023). Monitoring coastal-zone change using multi-mission satellite data and geospatial analytics. *International Journal of Remote Sensing*, 44(12), 4325-4348. <https://doi.org/10.1080/01431161.2022.2077890>
- Lima, M., Coelho, C., Veloso-Gomes, F., y Roebeling, P. (2020). An integrated physical and cost-benefit approach to assess groins as a coastal erosion mitigation strategy. *Coastal Engineering*, 156, 103614. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.103614>
- Llanos Dietsch, M. P. (2021). *Impacto de la intervención humana en el flujo de sedimentos de la cuenca del río Yuna y sus efectos en el Parque Nacional Manglares del Bajo Yuna, República Dominicana* [Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. <https://bvearmb.do/handle/123456789/4233>
- Martínez-Capel, F., García-Sánchez, J., & González-del Río, M. (2023). *Predictive modeling of coastal erosion and sediment dynamics under climate variability scenarios*. *Ocean & Coastal Management*, 241, 106746. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106746>
- Meléndez Salazar, G. (2024). *Análisis multitemporal de la dinámica de cobertura del manglar del estero de Puntarenas mediante la teledetección para el período 1974-2024* (Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica). Repositorio Institucional UCR. <https://hdl.handle.net/10669/100112>

- Meléndez Salazar, G. (2024). *Análisis multitemporal de la dinámica de cobertura del manglar del estero de Puntarenas mediante la teledetección para el período 1974-2024* [Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica]. Repositorio Institucional UCR. <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/server/api/core/bitstreams/08838476-c6a5-4128-8a58-8698ae461aa2/content>
- Mohammad Ali, I. (2024). *A guide for the positivist research paradigm: From philosophy to methodology*. *Ideology Journal*, 9(2), 188-197. <https://doi.org/10.24191/idealogy.v9i2.596>
- Molina, R., Manno, G., Lo Re, C., Anfuso, G., y Ciraolo, G. (2020). A Methodological Approach to Determine Sound Response Modalities to Coastal Erosion Processes in Mediterranean Andalusia (Spain). *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(3), 154. <https://doi.org/10.3390/jmse8030154>
- Morelo Muñoz, G. (2024). *Influencia de la energía del oleaje incidente sobre las comunidades bentónicas en la plataforma calcárea de los Bajos de Punta Caribana, Necoclí (Colombia)* [Tesis de maestría, Universidad de Antioquia]. Repositorio Institucional Universidad de Antioquia. <https://hdl.handle.net/10495/43306>
- Naciones Unidas. (2015). *Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>
- Nicu, I. C., Stalsberg, K., Rubensdotter, L., Martens, V. V., y Flyen, A.-C. (2020). Coastal Erosion Affecting Cultural Heritage in Svalbard. A Case Study in Hiorthhamn (Adventfjorden)—An Abandoned Mining Settlement. *Sustainability*, 12(6), 2306. <https://doi.org/10.3390/su12062306>
- Novaes, G. de O., Lobo, F. C., y Ranieri, L. A. (2024). Geindicadores de vulnerabilidade à erosão e risco costeiro em praias estuarinas da costa amazônica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 25(2). <https://doi.org/10.20502/rbgeomorfologia.v25i2.2461>
- Orseau, S., Abascal Zorrilla, N., Huybrechts, N., Lesourd, S., y Gardel, A. (2020). Decadal-scale morphological evolution of a muddy open coast. *Marine Geology*, 420, 106048. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.106048>
- Panagos, P., Matthews, F., Patault, E., De Michele, C., Quaranta, E., Bezak, N., Kaffas, K., Patro, E. R., Auel, C., Schleiss, A. J., Fendrich, A., Liakos, L., Van Eynde, E., Vieira, D., y

- Borrelli, P. (2024). Understanding the cost of soil erosion: An assessment of the sediment removal costs from the reservoirs of the European Union. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140183. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140183>
- Pang, T., Wang, X., Nawaz, R. A., Keefe, G., y Adekanmbi, T. (2023). Coastal erosion and climate change: A review on coastal-change process and modeling. *Ambio*, 52(12), 2034–2052. <https://doi.org/10.1007/s13280-023-01901-9>
- Pazos, R. S. (2021). *Estudio de microplásticos en la columna de agua, sedimento intermareal y biota residente en la costa del estuario del Río de la Plata (Franja Costera Sur)* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata]. Repositorio Institucional Universidad Nacional de La Plata. <https://hdl.handle.net/10584/12020>
- Perktold, J., Seabold, S., Taylor, J., & Statsmodels Developers. (2023). *Statsmodels: Statistical modeling and econometrics in Python*. Statsmodels.
- Perricone, V., Mutalipassi, M., Mele, A., Buono, M., Vicinanza, D., y Contestabile, P. (2023). Nature-based and bioinspired solutions for coastal protection: an overview among key ecosystems and a promising pathway for new functional and sustainable designs. *ICES Journal of Marine Science*, 80(5), 1218–1239. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsad080>
- Pilcher, N., & Cortazzi, M. (2024). ‘Qualitative’ and ‘quantitative’ methods and approaches across subject fields: Implications for research values, assumptions, and practices. *Quality & Quantity*, 58, 2357–2387. <https://doi.org/10.1007/s11135-023-01734-4>
- Pranzini, E., Cinelli, I., Cipriani, L. E., y Anfuso, G. (2020). An Integrated Coastal Sediment Management Plan: The Example of the Tuscany Region (Italy). *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(1), 33. <https://doi.org/10.3390/jmse8010033>
- Quintero Suárez, S. M. (2023). *Análisis hidrológico de una cuenca costera del Río Guachaca del departamento de Magdalena: relación entre su comportamiento y la morfología de sus playas* [Tesis de maestría, Universidad del Norte]. Repositorio Institucional Universidad del Norte. <https://hdl.handle.net/10584/12020>
- Quispe Gonzales, A. A. (2020). *Desvalorización del terreno urbano ocasionada por la erosión costera y su repercusión en el desarrollo inmobiliario del sector playa Acapulco, CP Las Delicias, distrito de Moche, provincia Trujillo, región La Libertad*. (Tesis de maestría,

- Universidad César Vallejo). Repositorio Institucional de la Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/122777>
- Rodriguez, A. B., McKee, B. A., Miller, C. B., Bost, M. C., y Atencio, A. N. (2020). Coastal sedimentation across North America doubled in the 20th century despite river dams. *Nature Communications*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16994-z>
- Rodríguez-Santalla, I., y Navarro, N. (2021). Main Threats in Mediterranean Coastal Wetlands. The Ebro Delta Case. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(11), 1190. <https://doi.org/10.3390/jmse9111190>
- Salmons, J. (2023). *Quantitative research with non-experimental designs*. Sage Research Methods Community. <https://doi.org/10.4135/9781529714364> [o similar]
- Sandoval-Murillo, L., y Barrantes-Castillo, G. (2021). Cambios en la cobertura de la tierra en los puntos calientes de erosión costera en el caribe sur de Costa Rica, durante el periodo 2005 – 2017. *Uniciencia*, 35(2), 1–23. <https://doi.org/10.15359/ru.35-2.6>
- Santamaría Torres, L. (2021). *Identificación y estudio de los minerales contenidos en los placeres marinos de la costa atlántica de Tierra del Fuego, Argentina* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata]. Repositorio Institucional Universidad Nacional de La Plata. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/120847>
- Southworth, J., y Muir, C. (2021). Specialty Grand Challenge: Remote Sensing Time Series Analysis. *Frontiers in Remote Sensing*, 2. <https://doi.org/10.3389/frsen.2021.770431>
- Souza, S. O., Lupinacci, C. M., y De Oliveira, R. C. (2021). A Cartografia Geomorfológica enquanto instrumento para o planejamento em áreas litorâneas: considerações a partir da região Costa das Baleias - Bahia - Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 22(3). <https://doi.org/10.20502/rbg.v22i3.1805>
- Souza, S. O., Lupinacci, C. M., y De Oliveira, R. C. (2021). A Cartografia Geomorfológica enquanto instrumento para o planejamento em áreas litorâneas: considerações a partir da região Costa das Baleias - Bahia - Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 22(3). <https://doi.org/10.20502/rbg.v22i3.1805>
- The Pandas Development Team. (2024a). Pandas: Powerful Python data analysis toolkit. Pandas.
- The Matplotlib Development Team. (2024b). Matplotlib: Visualization with Python. Matplotlib.

- Toffani, M. (2020). estudio morfodinámico de las dunas del campo eólico de bahía creek, río negro, patagonia argentina.
- Truchet, D. M. (2022). *Implementación de indicadores de alerta temprana en programas integrales de estudio de contaminación en ambientes marinos costeros y estuariales* (Tesis doctoral, Universidad Nacional del Sur). Repositorio Digital UNS. <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/6221>
- United Nations (2023). *United Nations Convention on the Law of the Sea at 40: Successes and future prospects*. New York: United Nations.
- Urrutia Rivas, M. Y. (2025). *Evaluación del desempeño de las herramientas hidrológicas HYDROBID Y HEC – HMS en la estimación de caudales máximos mensuales en las regiones del Valle del Cauca y Tolima* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/server/api/core/bitstreams/1b2fb11f-294d-40c5-bf8a-999424e59498/content>
- U.S. Geological Survey [USGS]. (2023). Earth Explorer. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Vallarino Castillo, R., Negro Valdecantos, V., y del Campo, J. M. (2023). Understanding the impact of hydrodynamics on coastal erosion in Latin America: a systematic review. *Frontiers in Environmental Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1267402>
- Vallarino Castillo, R., Negro Valdecantos, V., y Moreno Blasco, L. (2022). Shoreline Change Analysis Using Historical Multispectral Landsat Images of the Pacific Coast of Panama. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(12), 1801. <https://doi.org/10.3390/jmse10121801>
- Vega Bautista, F. (2021). *Granulometría y geoquímica de sedimentos detríticos de las playas Tecolutla y Coatzacoalcos del Golfo de México, México: Implicaciones de contaminación por metales pesados y su procedencia* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional UNAM. <https://ru.dgb.unam.mx/server/api/core/bitstreams/8bee6cac-3401-4115-af62-9dd6afe95535/content>
- Villarreal, M. L. (2024). *Implicancia de los procesos eólicos y lagunares en el modelado del paisaje y su relación con el uso del suelo en la estepa de Tierra del Fuego* [Tesis doctoral,

- Universidad Nacional del Sur]. Repositorio Institucional UNS.
<https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/7067>
- Walter, R. K., O’Leary, J. K., Vitousek, S., Taherkhani, M., Geraghty, C., y Kitajima, A. (2020). Large-scale erosion driven by intertidal eelgrass loss in an estuarine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 243, 106910. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106910>
- Warrick, J. A. (2020). Littoral Sediment From Rivers: Patterns, Rates and Processes of River Mouth Morphodynamics. *Frontiers in Earth Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00355>
- Zhao, L., Fan, X., & Xiao, S. (2025). Remote-sensing indicators and methods for coastal-ecosystem health assessment: A review of progress, challenges, and future directions. *Water*, 17(13), 1971. <https://doi.org/10.3390/w17131971>