

Ambientes de sedimentación actuales de la Alta Guajira (Cabo De La Vela), Salares de Mayapo,
Playas del Tayrona (Playa Cañaveral, Playa Piscinita, Playa Arrecifes y Playa Arenilla) y
Ciénaga Magdalena.

Daniela Alejandra Gutiérrez Granados

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geóloga

Director

Mario García González, Ph.D.

Profesor Titular

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Programa Académico

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A mis padres por apoyarme en este proceso de convertirme en profesional.

A mis hermanas por estar ahí siempre que lo necesito.

A mis sobrinos Mari, Sofi, Juli, Violetta y Samu

A mis gaticos Augita y Asta que los amo con todo mi corazón

A mis amigas Sol, Kath y Juli por estos años tan maravillosos que pasamos juntas.

A los muchachos de “discípulos” por también ser unos amigos increíbles.

A Jose el amor de mi vida, sin él, pase lo que pase nada de esto habría sido posible

y a Dios.

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander, a la Escuela de Geología, al profesor Mario, por guiarme en este proceso, por su paciencia, buena actitud y colaboración, a mis compañeros de Campo 3 por facilitarme las muestras, los informes de campo y demás datos importantes para la realización de este estudio.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	14
1 Objetivos	16
1.1 Objetivo General	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2 Localización	17
2.1 Cabo de la Vela, La Guajira.....	17
2.2 Mayapo, La Guajira	18
2.3 Playas del Parque Tayrona.....	18
2.4 Pueblo Viejo, Magdalena.....	19
3 Marco Teórico.....	19
3.1 Ambientes sedimentarios	19
3.1.1 Ambientes costeros o transicionales	20
3.1.1.1 Depósitos de Playa.....	20
3.1.2 Ambientes marinos	21
3.2 Morfología de las playas.....	21
3.2.1 Playas con perfiles disipativos	21
3.2.2 Playas con perfiles reflectivos	22
3.3 Plataforma Continental y Talud	23
3.3.1 Plataformas Siliciclásticas	23
3.3.2 Plataformas Carbonatadas.....	24
4 Contexto Geológico y Dinámica Costera	25

5	Erosión Costera.....	28
6	Metodología	29
6.1	Etapa 1. Antecedentes del Proyecto:.....	29
6.1.1	Muestreo de los sedimentos	31
6.1.1.1	Cabo de la Vela y Mayapo.....	31
6.1.1.2	Parque Nacional Natural del Tayrona.....	32
6.1.1.3	Pueblo Viejo, Ciénaga-Magdalena.	32
6.2	Etapa 2. Recopilación de datos bibliográficos y digitales:	32
6.3	Etapa 3. Resultados.....	33
6.3.1	Análisis Geomorfológico	34
6.3.2	Análisis multitemporales	34
6.3.3	Análisis Batimétrico.....	35
6.3.4	Análisis granulométrico	35
6.3.5	Análisis de secciones delgadas	36
6.3.6	Análisis de carbono total (TC) y carbono inorgánico total (TOC).....	36
6.3.7	Análisis de secciones delgadas	37
6.4	Análisis de Resultados	37
6.4.1	Transporte de los sedimentos.....	37
6.4.2	Análisis de Procedencia	38
6.4.3	Tasas de erosión y sedimentación.....	38
7	Resultados.....	41
7.1	Geomorfología	41
7.1.1	Unidades geomorfológicas del Cabo de la Vela.....	41

7.1.2	Unidades geomorfológicas de Mayapo.....	43
7.1.3	Unidades geomorfológicas de las playas Arenilla y Arrecifes – Parque Tayrona....	44
7.1.4	Unidades geomorfológicas de las playas Piscinita y Cañaveral – Parque Tayrona..	46
7.1.5	Unidades geomorfológicas de Ciénaga, Magdalena.....	48
7.2	Análisis Batimétrico.....	52
7.3	Análisis Multitemporales	57
7.3.1	Análisis Multitemporal Cabo De La Vela	57
7.3.2	Análisis Multitemporal Mayapo	59
7.3.3	Análisis Multitemporal Playas Del Parque Tayrona.....	60
7.3.4	Análisis Multitemporal Ciénaga Magdalena	63
7.4	Análisis sedimentológico.....	66
7.4.1	Análisis granulométrico	66
7.4.2	Análisis de Secciones Delgadas.....	68
7.4.3	Análisis de Laboratorio.....	76
8	Interpretación de resultados	78
8.1	Transporte de los sedimentos.....	78
8.2	Análisis de procedencia	80
8.3	Tasas de erosión y sedimentación o acreción de la costa	83
9	Discusión de resultados.....	90
9.1	Batimetría.....	90
9.2	Procedencia de los sedimentos.....	92
9.2.1	Cabo de la Vela.....	92
9.2.2	Zona costera entre Riohacha y Manaure (Mayapo).....	93

9.2.3	Sector de Mendihuaca-La Ensenada (Parque Tayrona).....	93
9.2.4	Sistema lagunar deltaico del Magdalena.....	94
9.3	Dinámica costera.....	94
10	Conclusiones	97
	Referencias Bibliográficas	99

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Inventario de Muestras y Análisis realizados</i>	40
Tabla 2 <i>Tipo de Ambiente y depósito de las muestras</i>	51
Tabla 3 <i>Estadísticas granulométricas según software GRADISTAT para las muestras del área de estudio</i>	66
Tabla 4 <i>Rangos para la subclasificación de tamaño de grano, selección, asimetría y curtosis.</i> .	67
Tabla 5 <i>Nomenclatura Composicional</i>	69
Tabla 6 <i>Conteo Cabo de la Vela</i>	69
Tabla 7 <i>Conteo Muestras Mayapo</i>	70
Tabla 8 <i>Conteo Parque Tayrona</i>	70
Tabla 9 <i>Conteo Ciénaga</i>	71
Tabla 10 <i>Clasificación Garzanti, E. (2016)</i>	75
Tabla 11 <i>Resultados de análisis de TC y TOC</i>	77
Tabla 12 <i>Criterios para la Clasificación del Ambiente tectónico de proveniencia</i>	81
Tabla 13 <i>Clasificación Dickinson, W. R. (1985) Muestras de estudio</i>	82
Tabla 14 <i>Características Nivel de amenaza por erosión costera en la costa caribe</i>	95

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Mapa de localización y estaciones de la zona de estudio</i>	17
Figura 2 <i>Bloque Diagrama Ambientes sedimentarios</i>	20
Figura 3 <i>Perfiles Disipativos</i>	22
Figura 4 <i>Perfiles Reflectivos</i>	23
Figura 5 <i>Plataformas continentales sistemas siliciclásticos</i>	24
Figura 6 <i>Plataformas continentales sistema carbonatado</i>	25
Figura 7 <i>Cuenca Guajira</i>	27
Figura 8 <i>Bloque tectónico SNSM</i>	27
Figura 9 <i>Mapa de muestreo de sedimentos Playas Cabo de la Vela, Mayapo, Cañaveral y la Piscinita</i>	29
Figura 10 <i>Mapa de localización Playa Arrecifes, Playa Arenilla y Pueblo Viejo</i>	30
Figura 11 <i>Método de muestreo</i>	30
Figura 12 <i>Zonas de muestreo de la Playa Cañaveral-Parque Tayrona que sirve como ilustración para establecer las zonas de toma de muestras en las diferentes playas.</i>	31
Figura 13 <i>Flujo diagrama de actividades</i>	33
Figura 14 <i>Mapa geomorfológico escala 1:25.000 de Cabo de la Vela</i>	41
Figura 15 <i>Mapa geomorfológico escala 1:25.000 de Mayapo</i>	43
Figura 16 <i>Mapa geomorfológico escala 1:7.500 de playa Arenilla y playa Arrecifes</i>	45
Figura 17 <i>Mapa geomorfológico escala 1:5.000 de playa Piscinita y playa Cañaveral</i>	47
Figura 18 <i>Mapa geomorfológico escala 1:25.000 de Ciénaga</i>	49
Figura 19 <i>Mapa Batimétrico de la zona de estudio</i>	52

Figura 20 <i>Cortes Batimétricos vista 2D</i>	55
Figura 21 <i>Perfiles Batimétricos Cabo de la Vela y Mayapo</i>	56
Figura 22 <i>Perfiles Batimétricos Parque Tayrona y Pueblo Viejo-Ciénaga</i>	57
Figura 23 <i>Análisis multitemporal de la línea de costa y otros aspectos Cabo de la Vela</i>	58
Figura 24 <i>Análisis Multitemporal Línea costa y área lagunar, Mayapo</i>	60
Figura 25 <i>Análisis multitemporal línea costera zona Playa Cañaveral – Playa La Piscinita</i>	61
Figura 26 <i>Análisis multitemporal línea costera zona Playa Arrecifes – Playa Arenilla</i>	62
Figura 27 <i>Análisis multitemporal Combinación de bandas RGB línea costera, Ciénaga</i>	64
Figura 28 <i>Análisis multitemporal línea costera, Ciénaga</i>	65
Figura 29 <i>Secciones delgadas Cabo de la Vela</i>	71
Figura 30 <i>Secciones delgadas Mayapo</i>	72
Figura 31 <i>Secciones delgadas Playa Cañaveral</i>	72
Figura 32 <i>Secciones delgadas Playa Arrecifes</i>	73
Figura 33 <i>Sección delgada DPS 7, Ciénaga</i>	73
Figura 34 <i>Diagrama QFL Clasificación Garzanti, E. (2016)</i>	74
Figura 35 <i>Transporte de los sedimentos Cabo de la Vela y Mayapo</i>	78
Figura 36 <i>Transporte de los sedimentos de los depósitos del Parque Tayrona</i>	79
Figura 37 <i>Transporte de los sedimentos Ciénaga</i>	80
Figura 38 <i>Diagrama QFL Clasificación Bloque Tectónico</i>	81
Figura 39 <i>Perfil de la playa Cabo De La Vela</i>	86
Figura 40 <i>Línea de Costa (2002-2023) Playas Arrecifes y Arenilla</i>	87
Figura 41 <i>Línea de Costa (2003-2023) Playa Cañaveral</i>	88
Figura 42 <i>Principales ríos con aportes en el área de estudio Parque Tayrona</i>	89

Figura 43 *Mapa de las 4 zonas con dinámicas distintas del Caribe Colombiano*..... 90

Resumen

Título: Ambientes de sedimentación actuales de la Alta Guajira (Cabo De La Vela), Salares de Mayapo, Playas del Tayrona (Playa Cañaveral, Playa Piscinita, Playa Arrecifes y Playa Arenilla) y Ciénaga Magdalena *

Autor: Gutiérrez Granados Daniela Alejandra **

Palabras Clave: Ambientes costeros, erosión costera, granulometría, SIG.

Descripción: El litoral del Caribe colombiano está marcado por una geodinámica costera, influenciada por factores como incremento global del nivel del mar, lluvias, mar de leva y huracanes, lo que genera procesos de erosión que amenazan la estabilidad de ecosistemas clave, como estuarios, playas y lagunas, así como la seguridad de las poblaciones cercanas. Este estudio se centró en caracterizar y analizar los ambientes de playas en varias zonas del Caribe colombiano: Cabo de la Vela, Mayapo, Playa Cañaveral, Playa La Piscinita, Playa Arrecifes, Playa Arenilla y Pueblo Viejo, Ciénaga. Se identificaron factores como la granulometría del sedimento, la composición de estos y la morfología de las playas, para comprender los procesos que afectan la erosión costera. Además, se aplicaron análisis multitemporales utilizando imágenes satelitales Landsat 5-9 y Google Earth, con el fin de evaluar la evolución de las playas a lo largo del tiempo. Este enfoque permitió identificar las zonas más vulnerables a la erosión y determinar las áreas de mayor riesgo en la región. Los resultados obtenidos proporcionan información crucial para el diseño de estrategias de manejo costero y conservación ambiental, contribuyendo así a la mitigación de los efectos de la erosión en las zonas costeras del Caribe colombiano.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Francisco Alberto Velandia Patiño, Ph.D.

Abstract

Title: Modern sedimentation environments of Alta Guajira (Cabo De La Vela), Salares de Mayapo, Tayrona Beaches (Cañaveral Beach, Piscinita Beach, Arrecifes Beach and Arenilla Beach) and Ciénaga Magdalena. *

Author(s): Gutiérrez Granados Daniela Alejandra **

Key Words: Coastal Environments, Coastal erosion, Granulometry, GIS.

Description: The Colombian Caribbean coastline is characterized by dynamic coastal factors such as global sea level rise, rainfall, storm surges and hurricanes, which generate erosion processes that threaten the stability of key ecosystems such as estuaries, beaches and lagoons, as well as the safety of nearby populations. This study focused on characterizing and analyzing beach environments in several areas of the Colombian Caribbean: Cabo de la Vela, Mayapo, Cañaveral beach, La Piscinita beach, Arrecifes beach, Arenilla beach and Pueblo Viejo, Ciénaga. Factors such as sediment granulometry, sediment composition and beach morphology were identified to understand the processes affecting coastal erosion. In addition, multitemporal analyses were applied using Landsat 5-9 satellite images and Google Earth to evaluate the evolution of the beaches over time. This approach made it possible to identify the areas most vulnerable to erosion and to determine the areas of greatest risk in the region. The results obtained provide crucial information for the design of coastal management and environmental conservation strategies, thus contributing to the mitigation of the effects of erosion in the coastal areas of the Colombian Caribbean.

* Degree Work

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Francisco Alberto Velandia Patiño, Ph.D.

Introducción

Los ambientes de sedimentación del Caribe colombiano son lugares en donde interactúan dinámicas terrestres y marinas que se encargan de moldear los depósitos costeros, como playas, barras y lagunas costeras (Restrepo, J. D., & López, S. A., 2008; Correa, I. D. & Morton, R. A., 2010). El entendimiento de los factores que influyen la sedimentación en estas zonas es fundamental para establecer fuentes de procedencia de los sedimentos, medios de transporte de los clastos y posibles amenazas como la erosión costera (Cardona, A., et al., 2011; Rangel-Buitrago, N., et al., 2010). Esta última se da debido a la pérdida de sedimentos provocada por el oleaje, reduciendo la capacidad de estos sistemas para actuar como barreras naturales contra fenómenos climáticos extremos (Ricaurte Villota et al., 2018; Posada et al., 2008). Afectando así la estabilidad de los suelos y las fuentes de sedimentación necesarias para la regeneración de las costas (Martínez, M et al., 2007; Nicholls, R. J. & Cazenave, A., 2010).

Esta problemática ha sido objeto de diversos estudios que abordan tanto sus causas como sus efectos en los ambientes sedimentarios. Según el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR, 2010), la erosión costera en el Caribe colombiano está impulsada por factores naturales y actividades humanas, como la deforestación de manglares y la urbanización. La Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD, 2020) señala que los fenómenos climáticos extremos, como las tormentas costeras, también juegan un papel crucial en la aceleración de la erosión, afectando especialmente las playas y los ecosistemas intermareales. Por otro lado, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2015) destaca que la falta de sedimento en algunas zonas costeras de Colombia ha contribuido a la erosión, alterando la dinámica de los ambientes sedimentarios, lo que afecta la regeneración natural de las costas. En

este contexto, se hace urgente la implementación de medidas de protección y restauración para mitigar los efectos de la erosión y conservar los ambientes sedimentarios, que son esenciales para la estabilidad ecológica y económica de la región.

Para la realización de este estudio, se seleccionaron cuatro zonas con dinámicas geológicas y geomorfológicas diferentes a lo largo de la franja del litoral del Caribe colombiano: Cabo de la Vela y la Alta Guajira, Mayapo en la media-alta Guajira, Playa Cañaveral, La Piscinita, Playa Arrecifes y Arenilla en el Parque Tayrona, así como la zona de Ciénaga y Pueblo Viejo. El objetivo de esta selección fue identificar las características de los depósitos de sedimentos de las 4 zonas y los factores que contribuyen a los cambios producidos por la erosión en estos ambientes sedimentarios y analizar la dinámica de la erosión a lo largo del tiempo hasta la actualidad.

Los resultados de este proyecto podrían proporcionar información útil para el diseño de estrategias de manejo sostenible y restauración de las costas, ayudando a mitigar los efectos de la erosión en estas regiones.

1 Objetivos

1.1 Objetivo General

los procesos de sedimentación actuales en los ambientes costeros en las diferentes zonas de estudio, con el fin de determinar mediante análisis históricos de imágenes satelitales, análisis granulométricos y análisis de secciones delgadas, cual es el comportamiento geológico de estas playas y las consecuencias a futuro de la erosión en las zonas de estudio.

1.2 Objetivos Específicos

Analizar la tasa de erosión en las Playas de La Guajira, del Parque Tayrona y de Ciénaga, Magdalena a lo largo de un periodo de tiempo determinado (1990-2023) realizando un análisis multitemporal de las zonas de estudio utilizando imágenes satelitales Landsat 5, Landsat 9 y de Google Earth, comparando los resultados con información bibliográfica obtenida de informes del INVEMAR

Identificar las diferentes composiciones mineralógicas de las 4 zonas de estudio y realizar un análisis de procedencia de las arenas de playa para determinar la fuente y el medio de transporte de los sedimentos.

Caracterizar los factores geológicos y geográficos que influyen en la sedimentación y erosión de estas zonas de La Guajira, el Parque Tayrona y Ciénaga Magdalena. como la topografía costera, la morfología del terreno o la actividad antrópica

2 Localización

Figura 1

Mapa de localización y estaciones de la zona de estudio



2.1 Cabo de la Vela, La Guajira

El Cabo de la Vela está situado en la parte norte de Colombia (Figura 1), en el departamento de La Guajira. Se encuentra aproximadamente en las coordenadas $11^{\circ}54'$ de latitud norte y $71^{\circ}55'$ de longitud oeste, y es un punto geográfico destacado en la región (Rangel-Buitrago, N., et al., 2010). Presenta un clima cálido y seco, con temperaturas que oscilan entre 28°C y 34°C , y precipitaciones anuales que no superan los 500 mm (IDEAM, 2015). Esta región desértica se ve influenciada por vientos constantes del noreste, lo que contribuye a su paisaje árido.

2.2 Mayapo, La Guajira

Mayapo se encuentra en el municipio de Manaure, en el departamento de La Guajira (Figura 1), Colombia, aproximadamente a 11°27' N de latitud y 71°41' W de longitud. Su clima es cálido y seco, con temperaturas que varían entre los 28°C y 34°C, y presenta una baja precipitación anual, lo que la convierte en una zona desértica, caracterizada por su paisaje árido y su cercanía a las dunas de la región (IDEAM, 2015).

2.3 Playas del Parque Tayrona

Las playas de Cañaveral, La Piscinita, Arrecifes y Arenilla se encuentran en el Parque Nacional Natural Tayrona, en el departamento de Magdalena (Figura 1), Colombia. Las coordenadas aproximadas son 10°28'09.4" N, 74°02'08.6" W para Playa Cañaveral; 10°28'31.3" N, 74°02'33.9" W para Playa La Piscinita; 10°27'16.3" N, 74°03'08.7" W para Playa Arrecifes; y 10°28'23.4" N, 74°02'23.6" W para Playa Arenilla (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2018). El clima en esta área es cálido y húmedo, con temperaturas que oscilan entre 26°C y 32°C, y las precipitaciones son más intensas entre mayo y noviembre (IDEAM, 2015). Desde el punto de vista geológico, la región se distingue por una mezcla de formaciones rocosas graníticas y playas de arena dorada, resultado de procesos tectónicos vinculados a la elevación de la Sierra Nevada de Santa Marta (Díaz, J. M. & Gómez, D. I., 2003). Las costas de estas playas están formadas por estructuras rocosas emergentes que interactúan constantemente con el mar, creando un paisaje de acantilados y arrecifes coralinos. Administrativamente, estas playas forman parte del Parque Nacional Natural Tayrona, un área protegida cuyo objetivo es conservar la biodiversidad y los ecosistemas marinos y terrestres (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2018).

2.4 Pueblo Viejo, Magdalena

La zona de Pueblo Viejo, situada en el municipio de Ciénaga, en el departamento de Magdalena (Figura 1), Colombia, se localiza aproximadamente en las coordenadas 10°34'50" N, 74°11'25" W (INVEMAR, 2005). El clima de esta área es cálido y húmedo, con temperaturas que oscilan entre 28°C y 32°C, y una gran cantidad de precipitaciones anuales (IDEAM, 2015). Desde el punto de vista geológico, la región se caracteriza por la interacción de sistemas fluviales y marinos, ya que forma parte de la cuenca del río Magdalena y está cerca de las zonas pantanosas del Ciénaga Grande (Restrepo, J. D. & Kjerfve, D., 2000). Esta área es una planicie deltaica compuesta por sedimentos aluviales, lo que ha propiciado la creación de humedales y marismas. Las costas de Pueblo Viejo cuentan con amplias extensiones de manglares, playas y estuarios, que son esenciales para la biodiversidad local (INVEMAR, 2005).

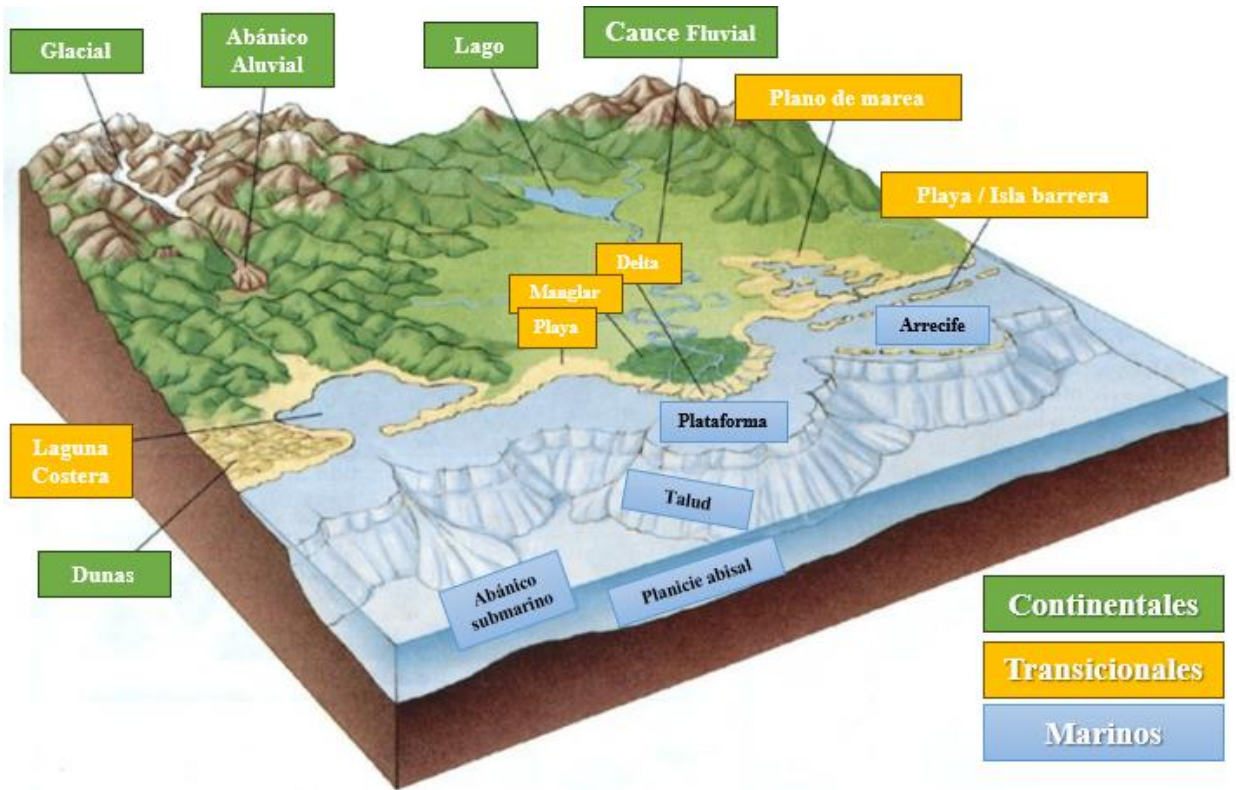
3 Marco Teórico

3.1 Ambientes sedimentarios

Un ambiente sedimentario es un área específica de la superficie terrestre donde se acumulan sedimentos, caracterizada por condiciones físicas, químicas y biológicas particulares que influyen en la formación de rocas sedimentarias (Boggs, S., 2014). Estos ambientes pueden ser continentales, costeros o marinos (Figura 2), y cada uno tiene procesos de sedimentación distintivos (Nichols, G., 2009).

Figura 2

Bloque Diagrama Ambientes sedimentarios



Nota. Adaptado de "Apuntes de geología histórica", por E. Navarrete, 2017.

3.1.1 Ambientes costeros o transicionales

Los ambientes costeros son zonas de transición entre la tierra y el mar, donde los procesos sedimentarios están influenciados por la acción de las olas, las mareas y los ríos (Reading, H. G., 1996). Estos incluyen playas, deltas, estuarios y lagunas costeras. Son áreas dinámicas con alta energía y sedimentación variable (Davis, R. A. & FitzGerald, D., 2004).

3.1.1.1 Depósitos de Playa. Los depósitos de playa son acumulaciones de sedimentos, principalmente arena y grava, que se forman en la zona costera debido a la acción de las olas, las mareas y las corrientes litorales. Estos depósitos están compuestos por materiales bien seleccionados y estratificados, y suelen presentar estructuras sedimentarias como estratificación

cruzada y laminación paralela costera (Davis, R. A. & FitzGerald, D., 2004; Boggs, S., 2014). Estos depósitos son característicos de ambientes de alta energía y son influenciados por factores como el clima, el suministro de sedimentos y la geomorfología costera (Davis, R. A. & FitzGerald, D., 2004; Boggs S., 2014).

3.1.2 *Ambientes marinos*

Los ambientes marinos se encuentran en áreas sumergidas bajo el agua del mar y se dividen en zonas neríticas (plataforma continental) y oceánicas (aguas profundas) (Boggs, S., 2014; Nichols, G., 2009). Estos ambientes están caracterizados por procesos sedimentarios como la sedimentación pelágica (en aguas profundas) y la deposición de sedimentos terrígenos en la plataforma continental (Boggs, S., 2014; Nichols, G., 2009).

3.2 Morfología de las playas

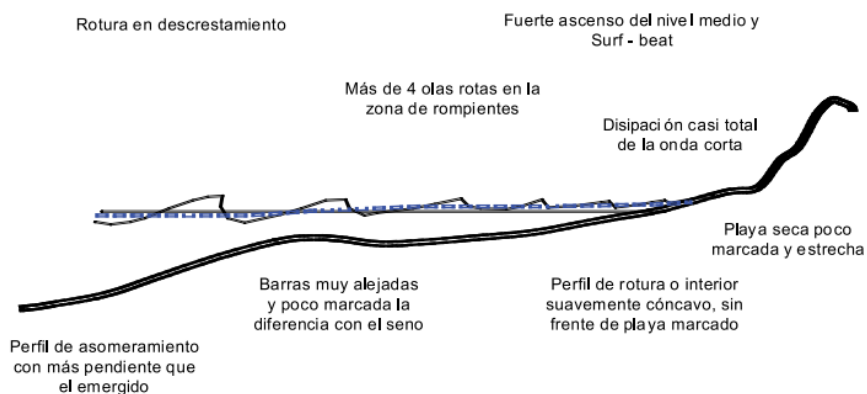
El perfil de las playas cambia constantemente como respuesta a los cambios del transporte transversal de sedimentos que produce la dinámica marina, especialmente el oleaje (MITECO, 2018). Los cambios más notorios son los asociados a los desplazamientos de las barras y al avance o retroceso de la berma oleaje (MITECO, 2018).

3.2.1 *Playas con perfiles disipativos*

El perfil disipativo, característico de playas de arena fina y alta energía, comienza en el pie de la duna o acantilado (Figura 3) (MITECO, 2018). La zona de rompientes es amplia, con un talud cóncavo y pendientes bajas, sin formaciones destacadas (MITECO, 2018).

Figura 3

Perfiles Disipativos



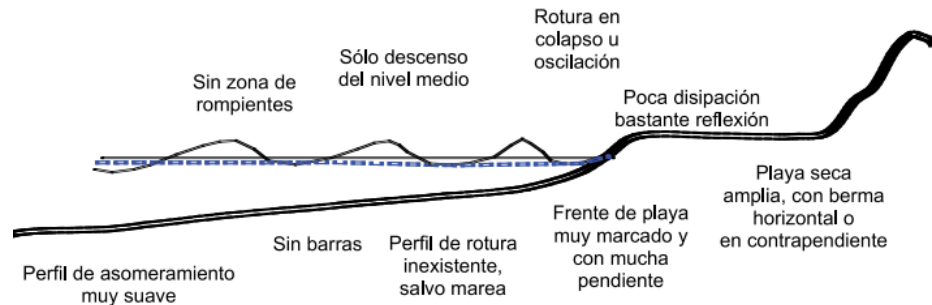
Nota. Tomado de "Capítulo 2: Procesos físicos de las costas", por MITECO, 2018.

3.2.2 Playas con perfiles reflectivos

El perfil reflejante, está presente en playas de arenas medias a gruesas y baja energía, se caracteriza por un borde de berma que marca el inicio del frente de playa (Figura 4) (MITECO, 2018). En la playa seca se pueden ver restos de bermas y escarpes de perfiles más antiguos (MITECO, 2018).

Figura 4

Perfiles Reflectivos



Nota. Tomado de "Capítulo 2: Procesos físicos de las costas", por MITECO, 2018.

3.3 Plataforma Continental y Talud

La plataforma y el talud continental son entornos dinámicos que ofrecen información crucial sobre los procesos ambientales de la Tierra (Nittrouer, Ch., et al., 2007). A lo largo de cientos de miles de años, con el ascenso y descenso del nivel del mar, las plataformas se inundan y se exponen, mientras que los taludes pasan de ser áreas con escasos sedimentos a acumular grandes cantidades de sedimentos fluviales (Nittrouer, Ch., et al., 2007). El límite entre la plataforma y el talud es una zona de transición significativa, donde los sedimentos de ambos lados experimentan procesos distintos (Nittrouer, Ch., et al., 2007).

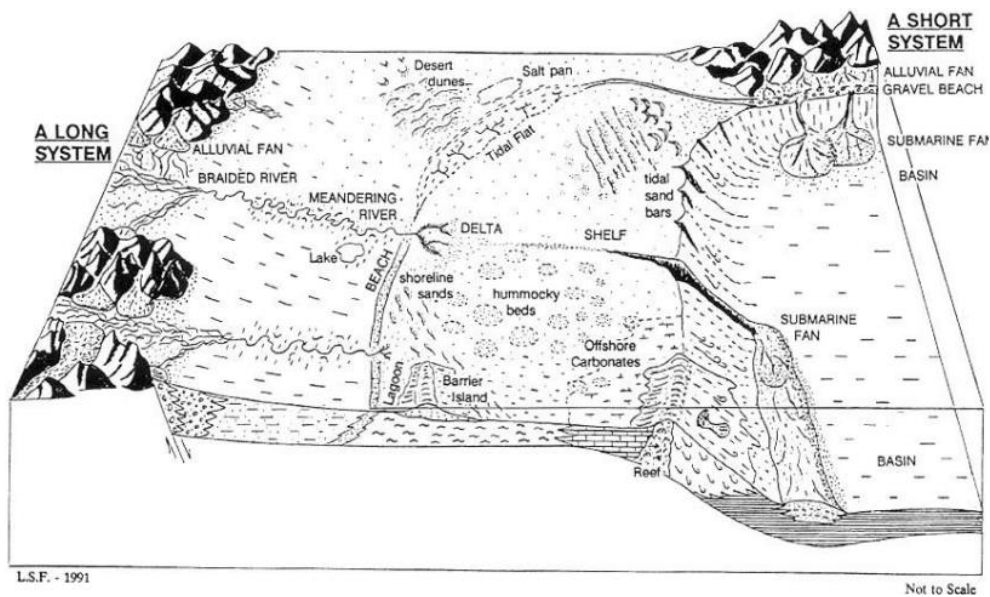
3.3.1 Plataformas Siliciclásticas

Las plataformas siliciclásticas son extensas áreas submarinas, generalmente ubicadas en la plataforma continental, donde se acumulan sedimentos detríticos (siliciclásticos) como arena, limo y arcilla (Reading, H. G., 1996; Nichols, G., 2009). Estos sedimentos son transportados desde los continentes por ríos, corrientes y otros procesos, y se depositan en ambientes de baja a moderada

energía (Figura 5) (Reading, H. G., 1996; Nichols, G., 2009). Las plataformas siliciclásticas están influenciadas por factores como el suministro de sedimentos, el nivel del mar y la tectónica, y pueden presentar una variedad de estructuras sedimentarias, como estratificación cruzada y laminación (Reading, H. G., 1996; Nichols, G., 2009).

Figura 5

Plataformas continentales sistemas siliciclásticos



Nota. Tomado de "Conocimientos 5.1 Ambientes sedimentarios", por R. Monreal, s.f.

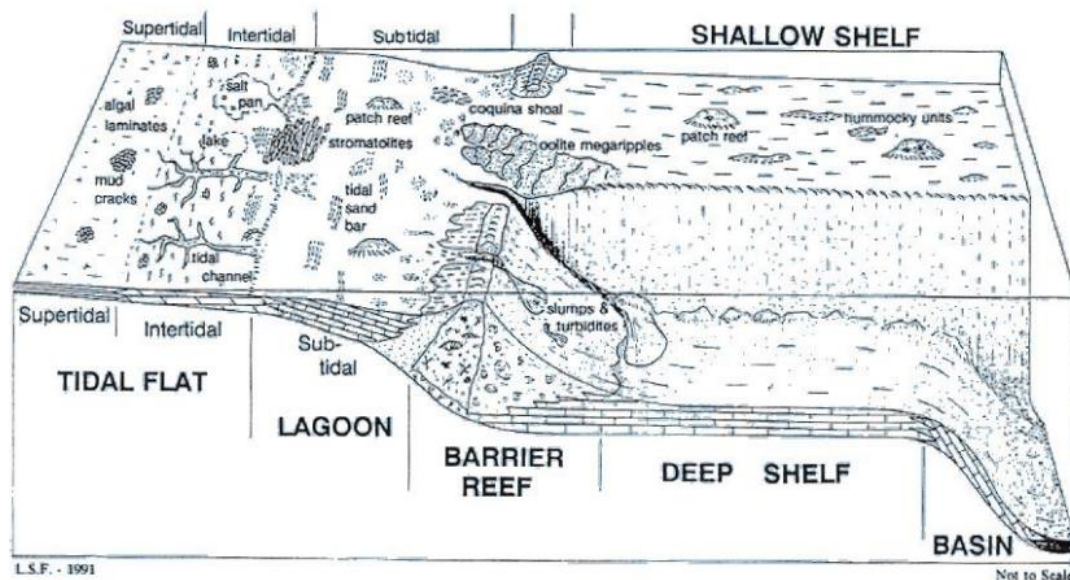
3.3.2 Plataformas Carbonatadas

Las plataformas carbonatadas son extensas áreas submarinas donde predominan los sedimentos carbonatados, formados principalmente por la acumulación de restos de organismos marinos (como corales, moluscos y algas) y procesos químicos como la precipitación de carbonato de calcio Tucker, M. E., & Wright, V. P. (1990). Estas plataformas se desarrollan en aguas tropicales y subtropicales, donde las condiciones son favorables para la producción y acumulación de carbonatos (Figura 6) (Tucker, M. E., & Wright, V. P. (1990); Schlager, W., 2005). Las

plataformas carbonatadas pueden ser de tipo rampa, plataforma somera o arrecifal, y están influenciadas por factores como la luz, la temperatura, la salinidad y el nivel del mar (Tucker, M. E., & Wright, V. P. (1990); Schlager, W., 2005)

Figura 6

Plataformas continentales sistema carbonatado



Nota. Tomado de "Conocimientos 5.1 Ambientes sedimentarios", por R. Monreal, s.f.

4 Contexto Geológico y Dinámica Costera

El Caribe colombiano presenta una geología compleja, situada en un entorno tectónico de compresión, donde las placas Sudamericana, Caribe y Nazca interactúan. Según Giunta, G., et al. (1996), esta interacción ha dado lugar a la formación de arcos magmáticos entre el Jurásico y el Paleógeno (hace 200 a 23 millones de años), la incorporación de fragmentos de corteza oceánica (ofiolitas) del Jurásico-Cretácico (hace 200 a 65 millones de años). Se ha sugerido que la

interacción entre las placas Caribe y Sudamericana podría ser una subducción de bajo ángulo, aunque hay quienes la ven como una colisión, donde una placa se superpone a la otra (Giunta, G., et al., 1996). Además, algunos estudios apuntan a la existencia del Bloque Norandino, que abarca la parte norte de los Andes y el Caribe colombiano, desplazándose hacia el nororiente en relación con Suramérica (Vargas, C.A., 2020).

Localmente, La Cuenca de La Guajira se ubica en el extremo norte de Colombia y tiene una historia geológica compleja debido a la interacción entre las placas tectónicas de Sudamérica y el Caribe (ANH, s.f.). Esto ha generado formaciones estructurales regionales, como las fallas de Oca al sur, que separan la cuenca del Cesar-Ranchería, y la falla de Cuisa al norte, que divide la cuenca en dos sub-cuencas: la Baja Guajira en donde se encuentra la zona de Mayapo (sur) y la Alta Guajira (norte) donde se encuentra el Cabo de la Vela (Figura 7) (ANH, s.f.).

Por otro parte, el terreno de La Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) en donde se localizan las playas del parque Tayrona es un macizo rocoso independiente de la cadena central de los Andes, y está rodeado por las cuencas sedimentarias de Plato-San Jorge al oeste y Cesar-Ranchería al suroeste (Montes, C., et al., 2010). Desde un punto de vista tectónico la SNSM, está limitada por la falla de Oca, la falla de Santa Marta-Bucaramanga y el alineamiento del Cesar (Figura 8) (Montes, C., et al., 2010).

La zona de Ciénaga se encuentra al oeste de la Sierra Nevada de Santa Marta, por lo cual, tectonicamente hace parte de su piedemonte, siendo principalmente afectada por la Falla de Santa Marta- Bucaramanga (Mora, A., et al., 2010).

Figura 7

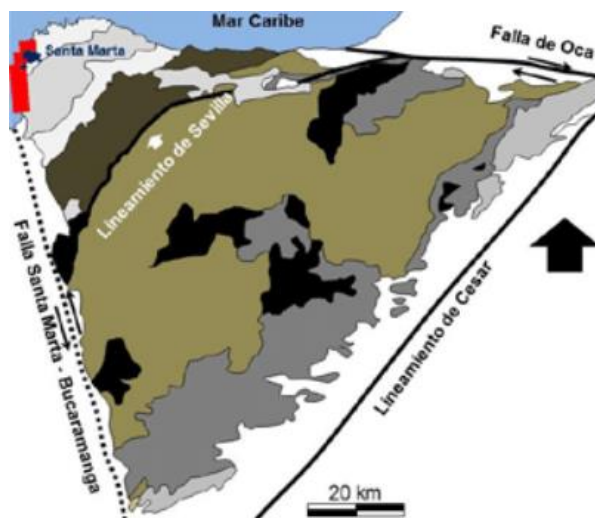
Cuenca Guajira



Nota. Tomado de "Cuenca Guajira: Contrastes entre alta y baja Guajira", por Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), s.f.

Figura 8

Bloque tectónico SNSM



Nota. Tomado de "Itinerario geológico de la franja costera entre el Aeropuerto Internacional Simón Bolívar y la Bahía de Taganga, Provincia Geotectónica de Santa Marta", por J. A. Sáenz-Reyes, et al., 2017, Boletín de Ciencias de la Tierra, 42, 5–24.

5 Erosión Costera

La erosión costera en el Caribe colombiano es un problema ambiental significativo, afectando tanto las playas como los acantilados y otros ecosistemas costeros. Este fenómeno es causado principalmente por la combinación de factores naturales y humanos, como el aumento del nivel del mar, la intensificación de fenómenos climáticos como tormentas y huracanes, y la intervención humana en el uso del suelo y las actividades de construcción (Posada, P., et al., 2008).

Los agentes hidrodinámicos que influyen en los procesos de erosión costera incluyen vientos, tormentas, olas, mareas, corrientes litorales y el aumento del nivel del mar (Posada, P., et al., 2008). Los vientos no solo generan el oleaje en la superficie, sino que también transportan grandes cantidades de material no cohesivo, como limos y arenas, tanto hacia el mar, formando fondos arenosos en la plataforma, como tierra adentro, creando dunas o pequeños depósitos eólicos (Posada, P., et al., 2008). Las tormentas, especialmente durante la temporada invernal o de huracanes en el Caribe, pueden generar olas más grandes que erosionan las playas, dejando escarpes de hasta 50 cm, aunque en muchos casos las playas logran recuperarse (Posada, P., et al., 2008).

La erosión de las zonas costeras ha sido un proceso natural desde siempre, pero parece haberse acelerado desde las décadas de 1970 y 1980 (Restrepo, J. D., 2018). Este incremento en la tasa de erosión se asocia con el rápido crecimiento de las ciudades costeras, especialmente de las del interior del país, como Medellín, Bogotá, Cali y Bucaramanga (Restrepo, J. D., 2018). Este auge urbano generó impactos ambientales significativos en la cuenca del río Magdalena, lo que resultó en cambios notables en el caudal y la descarga de sedimentos, afectando así la dinámica de la erosión costera (Restrepo, J. D., 2018).

6 Metodología

6.1 Etapa 1. Antecedentes del Proyecto:

Se realizó una salida de campo para la asignatura Campo 3 entre el 1 y el 5 de mayo, siguiendo la ruta Bucaramanga – Riohacha – Cabo de la Vela – Mayapo – Camarones – Palomino – Santa Marta – Bucaramanga. Durante esta etapa, se realizaron descripciones geomorfológicas del área, se examinaron las litologías aflorantes, se registraron datos estructurales de las bermas en las playas y se recolectaron muestras de sedimentos distribuidas de la siguiente forma (Figura 9 y Figura 10)

Figura 9

Mapa de muestreo de sedimentos Playas Cabo de la Vela, Mayapo, Cañaveral y la Piscinita

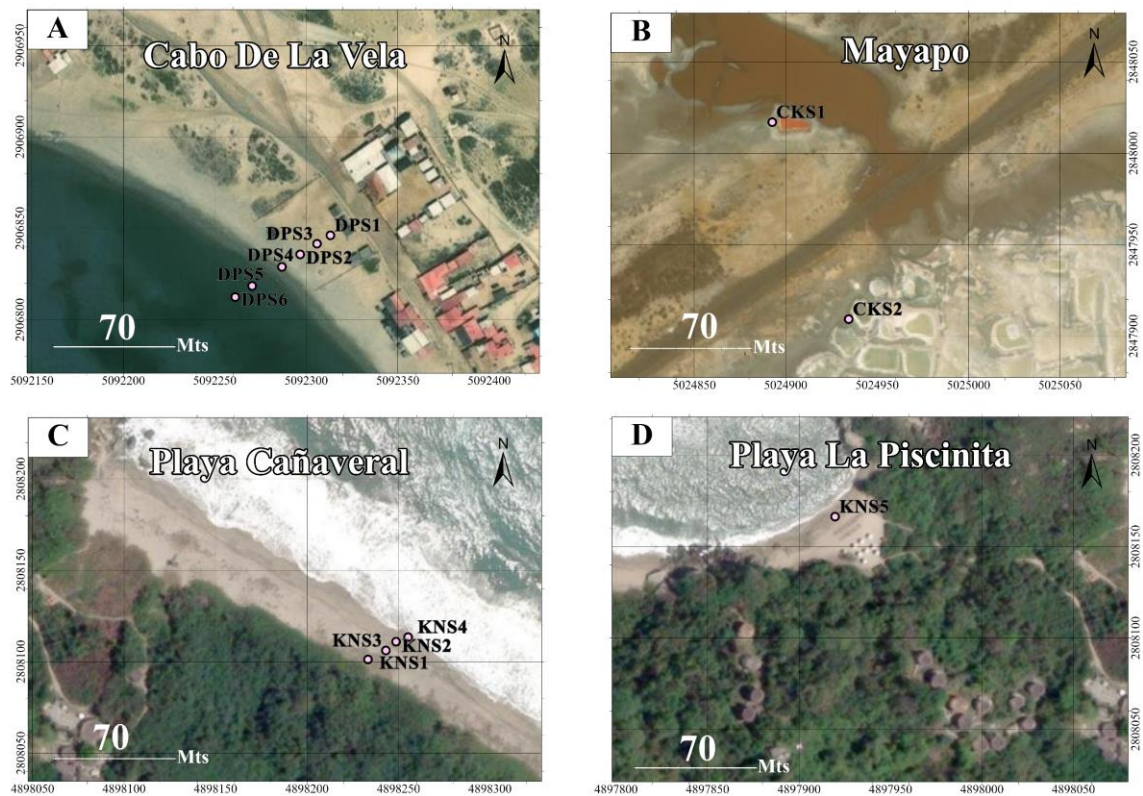
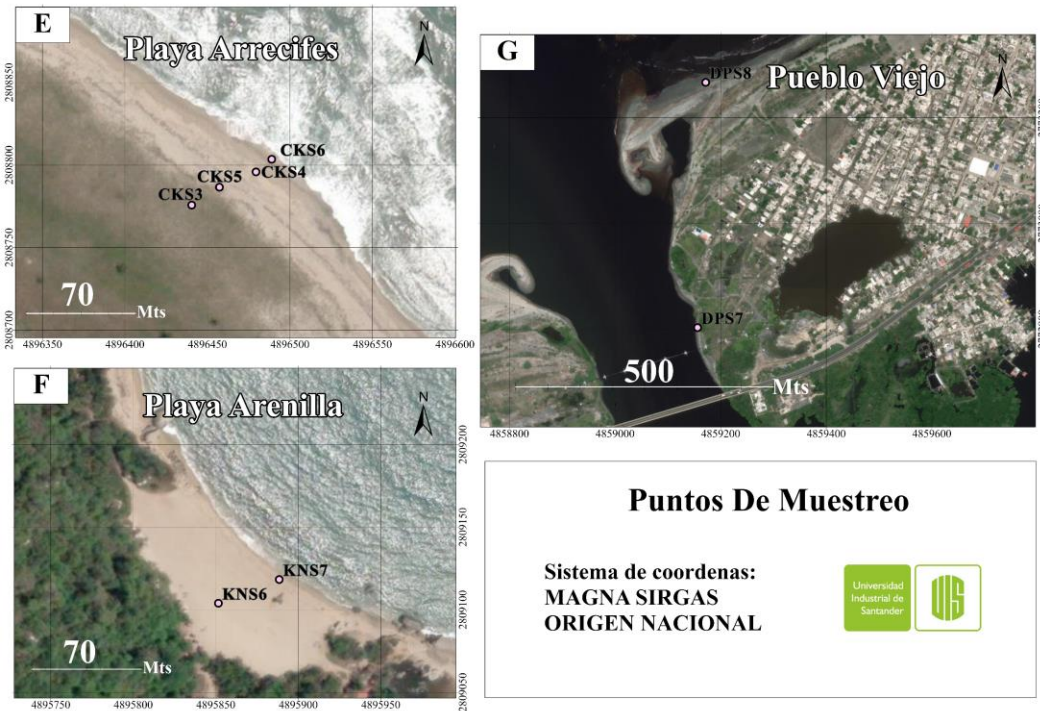


Figura 10

Mapa de localización Playa Arrecifes, Playa Arenilla y Pueblo Viejo



Para la extracción de las muestras de sedimentos se realizaron zanjas de aproximadamente 30 cm de profundidad de las cuales se tomaron las muestras como se observa en las Figura 11 y Figura 12

Figura 11

Método de muestreo



Figura 12

Zonas de muestreo de la Playa Cañaveral-Parque Tayrona que sirve como ilustración para establecer las zonas de toma de muestras en las diferentes playas.



Nota. Tomado de "Informe campo 3: Playa Cañaveral, Playa La Piscinita y Playa Arenilla", por N. S. Aza Jiménez, et al., 2023.

Esta etapa también incluyó la elaboración de las 15 secciones delgadas que posteriormente fueron entregadas para el estudio en la Etapa 2.

Por otro lado, cabe resaltar que las muestras de sedimentos utilizadas para el análisis también fueron entregadas por los estudiantes de campo 3, por lo cual, se tiene en cuenta que estas muestras tanto de sedimento como secciones delgadas cuentan con una previa manipulación y evaluación realizada en la asignatura Campo 3 2023-1.

6.1.1 Muestreo de los sedimentos

6.1.1.1 Cabo de la Vela y Mayapo. Se tomaron un total de seis (6) muestras de arena en el Cabo de la Vela correspondientes a las zonas de Backshore (DPS1), Foreshore (DPS2), Berma (DPS3), Washzone (DPS4), Plataforma Marina 1 (DPS5) y Plataforma Marina 2 (DPS6). En

Mayapo se tomaron un total de dos (2) muestras de sedimentos correspondientes a Salar 1 (CKS1) y Salar 2 (CKS2)

Secciones delgadas: Cabo Backshore (1), Cabo Washzone (2) y Cabo plataforma marina 1 (3), Salar 1 (4) y Salar 2 (5).

6.1.1.2 Parque Nacional Natural del Tayrona. Se tomaron un total de nueve (9) muestras de arena correspondientes a las zonas de Playa Cañaveral Backshore (KNS1), Playa Cañaveral Foreshore (KNS2), Playa Cañaveral Verma (KNS3), Playa Cañaveral Washzone (KNS4), Playa Piscinita Backshore (KNS5), Playa Arrecifes Backshore (CKS3), Playa Arrecifes Foreshore (CKS4), Playa Arrecifes Berma (CKS5) y Playa Arrecifes Washzone (CKS6)

- **Secciones delgadas:** Cañaveral Backshor (6), Cañaveral Foreshore (7), Cañaveral Washzone (8), Piscinita Foreshore (9), Arrecifes BackShore (10), Arrecifes Washzone (11), Arenilla Washzone (12).

6.1.1.3 Pueblo Viejo, Ciénaga-Magdalena. Se tomaron un total de dos (2) muestras de arena correspondientes a las zonas de Ciénaga, Canal de marea (DPS7) y Ciénaga Playa Washzone (DPS8).

- **Secciones delgadas:** Ciénaga Canal de marea (13) y Ciénaga Playa Washzone (14)

6.2 Etapa 2. Recopilación de datos bibliográficos y digitales:

- Organización de la información bibliográfica recopilada para dar una contextualización acertada de la problemática histórica y actual que atraviesa el Caribe Colombiano con el aumento en la tasa de erosión en las últimas décadas y todos los factores que influyen en este fenómeno. Las principales de artículos utilizados proceden del INVEMAR y del SGC.

- Descarga de imágenes satelitales Landsat 5, Landsat 8-9, Sentinel 2 y Airbus para la elaboración de los análisis multitemporales de las zonas de estudio.

Fuente Imágenes Landsat: portal USGS

Fuente Imágenes Sentinel 2: EO Browser

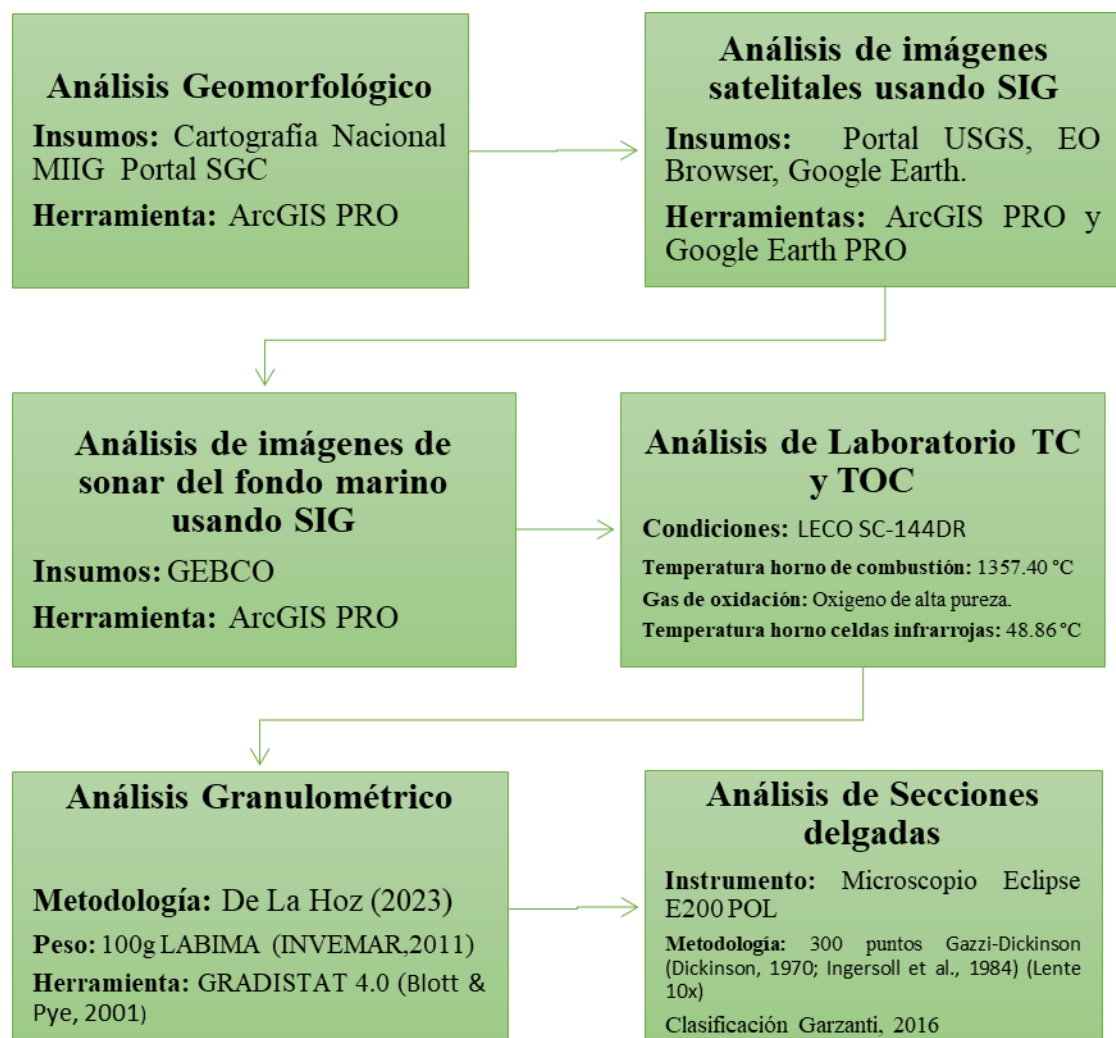
Fuente Imágenes Airbus: Google Earth PRO

6.3 Etapa 3. Resultados

En esta etapa se realizaron las siguientes actividades (Figura 13)

Figura 13

Flujo diagrama de actividades



Para ver el resumen de los estudios realizados diríjase a la Tabla 1

6.3.1 *Análisis Geomorfológico*

Esta paso se centró en la elaboración de mapas geomorfológicos utilizando los insumos proporcionados por el portal MIIG del Servicio Geológico Colombiano. El objetivo principal fue identificar el ambiente sedimentario y el tipo de depósito asociado a las muestras recolectadas. Los datos obtenidos fueron procesados y analizados mediante el software ArcGIS Pro, lo que permitió una caracterización detallada de las áreas de interés y su contexto geomorfológico.

6.3.2 *Análisis multitemporales*

El tratamiento de datos para la elaboración de los mapas e imágenes ilustrativas de los análisis multitemporales de las cuatro zonas (Cabo de la Vela, Mayapo, Playas del Parque Tayrona y Pueblo Viejo, Ciénaga) comenzó con la exportación de las imágenes satelitales Landsat obtenidas del portal USGS al ArcGIS Pro. Se seleccionaron imágenes de Landsat 5 para las décadas de los 90, 2000 y 2010, y de Landsat 8 o 9 para el año 2023, que fue el periodo más reciente y acordó con los estudios sedimentológicos realizados en las muestras recolectadas entre el 1 y 5 de mayo de 2023.

Una vez exportadas las imágenes, se realizaron diversas combinaciones de bandas a diferentes escalas, dependiendo de los cambios que se querían resaltar en las últimas décadas. Para las cuatro zonas, se hizo una comparativa en combinación de bandas en color natural. Adicionalmente, para las zonas de Cabo de la Vela y Mayapo, se aplicó una combinación de bandas específica para resaltar la evolución y aparición de lagunas costeras y salinas, y en Mayapo, también se analizó el área aproximada pérdida de terreno debido a estas formaciones.

En la zona de Ciénaga, se utilizó una combinación de bandas que destacaba la vegetación, permitiendo visualizar la pérdida del ecosistema de manglar en las últimas décadas, así como otra

combinación que mostró la pérdida de terreno por erosión costera en la carretera nacional Troncal del Caribe (Ciénaga-Barranquilla). Se calculó una estimación aproximada de la pérdida de área desde la década de 1990 hasta 2023, utilizando las herramientas disponibles en ArcGIS Pro, para una longitud de carretera de aproximadamente 28 km.

Se emplearon imágenes de Google Earth en áreas que requerían mayor resolución, como la zona urbana de Ciénaga y el Parque Tayrona. Finalmente, para analizar la evolución de la línea costera en las cuatro zonas con esta misma herramienta, trazando las líneas aproximadas de la playa en cada estación y medir su variación a lo largo de los últimos años.

6.3.3 *Análisis Batimétrico*

Para este análisis, se descargó una imagen de sonar del fondo marino correspondiente a la zona de estudio desde la plataforma GEBCO. Esta imagen fue procesada utilizando el software ArcGIS Pro, lo que permitió identificar las distintas estructuras presentes en el fondo marino. Adicionalmente, se realizaron cortes batimétricos para analizar y visualizar el perfil de la plataforma y el talud en cada una de las áreas de interés.

6.3.4 *Análisis granulométrico*

El análisis textural se realizó tomando como referencia la metodología utilizada por De La Hoz, M. E. (2023) en su documento de trabajo de grado “Caracterización y análisis sedimentológico de Playa Salguero, suroccidente de Santa Marta, Magdalena – Colombia” usando la guía de LABIMA INVEMAR (2011) adaptando los parámetros a los equipos disponibles en el Laboratorio de Sedimentología de la Escuela de Geología UIS. Las muestras fueron secadas durante día y medio en el horno para secado de convección forzada del Laboratorio de Preparación de Muestras a 60°C. Tras el secado, se dejó enfriar a temperatura ambiente, se homogenizó y se pesaron 100 g para ser sometidos al proceso de tamizado durante 15 minutos. Este proceso utilizó

un conjunto de 6 tamices con aberturas de malla de tamaño decreciente. (2.0 mm, 1.0 mm, 0.5 mm, 0.25 mm, 0.125 mm y 0.63 mm).

Cabe resaltar que no todas las muestras de sedimento cumplieron con el parámetro establecido del peso de 100g, esto debido a que el tamizaje se realizó en el año 2024 y los grupos de trabajo de la asignatura Campo III 2023-1 usaron parte del material para los análisis de la asignatura como: la elaboración de secciones delgadas y análisis macroscópico en el laboratorio de estereomicroscopía. Adicionalmente se separó aproximadamente 45g de cada bolsa con sedimento para los análisis de TC y TOC, por lo cual se optó por no incluir dichas muestras en el estudio.

Al concluir el tamizado, se pesaron las fracciones separadas y los datos obtenidos fueron procesados con el software GRADISTAT 4.0 (Blott, S. J. & Pye, K. 2001), generando un análisis textural detallado que incluyó parámetros estadísticos como la media, el tipo de selección, el coeficiente de simetría y la curtosis (Folk, R. L. & Ward, W. C., 1957).

6.3.5 Análisis de secciones delgadas

Este análisis se centró en obtener una detallada descripción composicional realizando el método de conteo de 300 siguiendo el método de Dickinson, W. R. (1970); Ingersoll, R. V., et al. (1984) puntos utilizando el lente de 10x el microscopio de luz transmitida Microscopio Eclipse E200 POL del Laboratorio de Microscopia.

6.3.6 Análisis de carbono total (TC) y carbono inorgánico total (TOC)

Para este estudio se enviaron un total de 20 muestras de sedimento al Laboratorio Geoquímica del Petróleo-UIS sede Guatiguará en donde fueron puestas en el analizador de carbono y azufre LECO SC-144DR en las siguientes condiciones:

Temperatura horno de combustión: 1357.40 °C

Gas de oxidación: Oxígeno de alta pureza.

Temperatura horno celdas infrarrojas: 48.86 °C

Esto siguiendo la metodología Análisis de TC y TOC por combustión en un horno de alta temperatura con detección infrarroja no dispersiva DNIR.

6.3.7 Análisis de secciones delgadas

Este análisis se enfocó en obtener una descripción composicional detallada mediante la aplicación del método de conteo de 300 puntos, siguiendo las metodologías propuestas por Dickinson, W. R. (1970) e Ingersoll R. V., et al. (1984). El conteo se realizó utilizando un microscopio de luz transmitida, modelo Eclipse E200 POL, con un lente de 10x, en el Laboratorio de Microscopía. Una vez obtenidos los datos, se recalcularon los porcentajes de feldespatos, líticos y cuarzo para clasificar las muestras, aplicando los criterios establecidos por Garzanti, E. (2016). En el caso de las muestras de Cabo de la Vela, debido a su composición más calcárea, se utilizó la clasificación propuesta por Folk, R. L. (1974).

6.4 Análisis de Resultados

6.4.1 Transporte de los sedimentos

Se presentaron los resultados obtenidos en el análisis granulométrico conforme a los criterios establecidos por Sahu B.K. (1963) para la interpretación los datos estadísticos en los estudios de granulometría para sedimentos no consolidados.

Los resultados obtenidos del análisis realizado con GRADISTAT se complementaron con criterios adicionales para determinar los posibles métodos de transporte de los sedimentos, utilizando ecuaciones específicas.

$$Y_1 = -3.5688M_z + 3.7016\sigma_1^2 - 2.0766Sk_1 + 3.1135K_G$$

$$Y_2 = 15.6534M_z + 65.7091\sigma_1^2 + 18.1071Sk_1 + 18.5043K_G$$

$$Y_3 = 0.2852M_z - 8.7604\sigma_1^2 - 4.8932Sk_1 + 0.0482K_G$$

$$Y_4 = 0.7215M_z - 0.4030\sigma_1^2 + 6.7322Sk_1 + 5.2927K_G$$

Según la ecuación Y_1 , si $Y_1 < -2.741$, el depósito se clasifica como eólico, mientras que si $Y_1 > -2.741$, se clasifica como litoral (playa). Para la ecuación Y_2 , si $Y_2 < 65.3650$, el depósito se clasifica como de playa, mientras que si $Y_2 > 65.3650$, se clasifica como marino somero agitado. En el caso de la ecuación Y_3 , si $Y_3 < -7.419$, el depósito corresponde a un ambiente marino somero, mientras que si $Y_3 > -7.419$, se clasifica como fluvial deltaico. Finalmente, según la ecuación Y_4 , si $Y_4 < 9.8433$, el depósito se clasifica como turbidítico, mientras que si $Y_4 > 9.8433$, se clasifica como fluvial deltaico.

6.4.2 Análisis de Procedencia

Para este análisis, se tomaron las reclasificaciones de cuarzo, feldespato y líticos, y se aplicó la clasificación propuesta por Dickinson, W.R. (1985), la cual permite establecer los ambientes de procedencia de los sedimentos. Este procedimiento se realizó para todas las muestras; sin embargo, debido a su composición, solo se consideraron aquellas provenientes de Mayapo, El Tayrona y Ciénaga, cuyos contenidos de carbonatos eran inferiores al 50%.

6.4.3 Tasas de erosión y sedimentación

La **tasa de erosión costera** se calcula midiendo la línea de material erosionado de la costa durante un período de tiempo determinado, utilizando técnicas como mediciones topográficas (LiDAR o GPS), fotografías aéreas y satelitales, o modelado numérico (Boak, E. & Turner, I. L., 2005; Komar, P. D., 1998). Por otro lado, la **tasa de sedimentación costera** se estima midiendo

el espesor de los sedimentos acumulados y el tiempo de depositación (Masselink, G. & Hughes, M. G., 2003).

En donde se utilizaron las siguientes fórmulas para las mediciones:

$$Erosión = \frac{\text{Retroceso en la línea de costa}}{\text{Tiempo Transcurrido}}$$

$$Sedimentación o Acreción = \frac{\text{Aumento en la línea de costa}}{\text{Tiempo Transcurrido}}$$

Tabla 1

Inventario de Muestras y Análisis realizados

Cód Muestra	Nombre	Estación	Coordenadas de la estación		# Análisis TOC	Sección delgada		# Sección	Análisis Granulométrico		
			Este	Norte		SI	NO		SI	NO	
DPS1	Cabo Backshore	Estación 1	5'092,308.99	2'905,750.83	1	X		1	X		
DPS2	Cabo Foreshore				2		X		NO	X	
DPS3	Cabo Berma				3		X		NO	X	
DPS4	Cabo Washzone				4		X		2	X	
DPS5	Cabo Plataforma 1				5		X		3		X
DPS6	Cabo Plataforma 2				6				X	NO	
CKS1	Salar Mayapo 1	Estación 2	5'032,580.48	2'849,551.96	NO	X		4	X		
CKS2	Salar Mayapo 2				7	X		5			X
KNS1	Cañaveral Backshore	Estación 3	4'917,795.56	2'802,783.71	8	X		6	X		
KNS2	Cañaveral Foreshore				9	X		7	X	X	
KNS3	Cañaveral Berma				10		X		NO	X	
KNS4	Cañaveral Washzone				11	X		8	X		
KNS5	Piscinita Foreshore	Estación 4	4'915,633.21	2'802,317.21	12	X		9	X		
CKS3	Arrecifes Backshore	Estación 5	4'906,505.80	2'803,741.006	13	X		10	X		
CKS4	Arrecifes Foreshore				14		X		11	X	
CKS5	Arrecifes Berma				15		X		X		X
CKS6	Arrecifes Washzone				16	X		NO	X		
KNS 6	Arenilla Backshore	Estación 6	4'906,505.80	2'803,996.74	17		X	12	X		
KNS7	Arenilla Washzone				18	X		X	X	X	
DPS7	Ciénaga Canal de Marea	Estación 7	4'859,344.87	2'772,463.83	19	X		13	X		
DPS8	Ciénaga Washzone				20	X		14	X		

Nota. Sistema de coordenadas MAGNA-SIRGAS Origen Nacional (CTM12)

7 Resultados

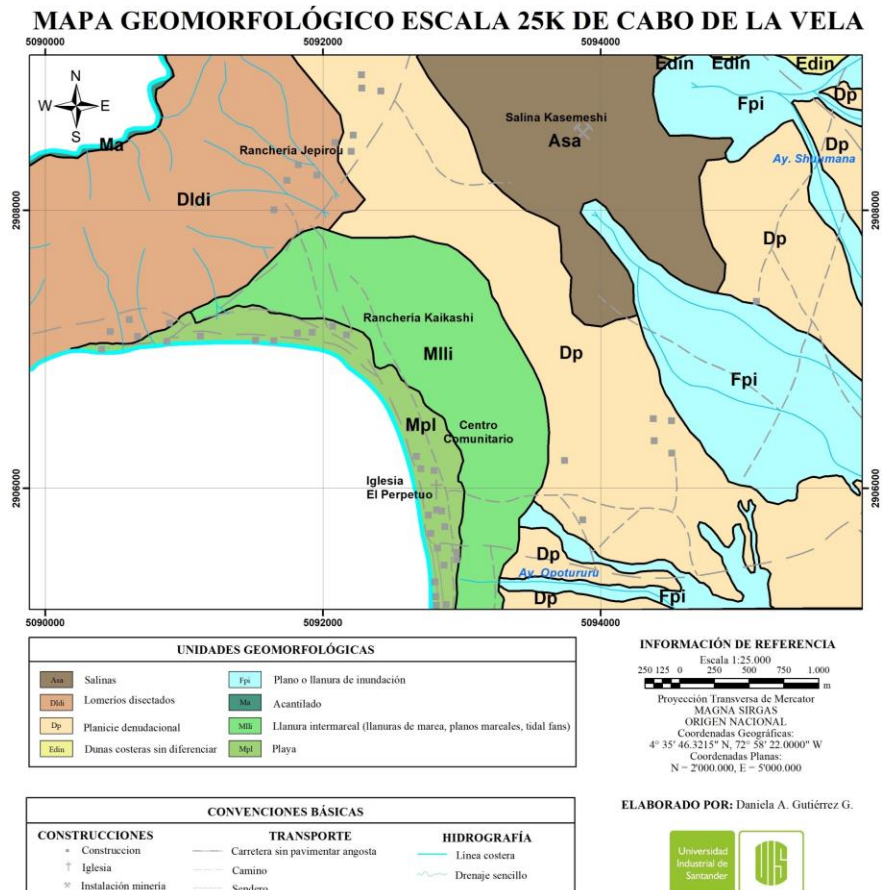
7.1 Geomorfología

7.1.1 Unidades geomorfológicas del Cabo de la Vela

Se identificaron ocho (8) unidades geomorfológicas para el Cabo de la Vela, las cuales se muestran en la Figura 14 y se describen a continuación.

Figura 14

Mapa geomorfológico escala 1:25.000 de Cabo de la Vela



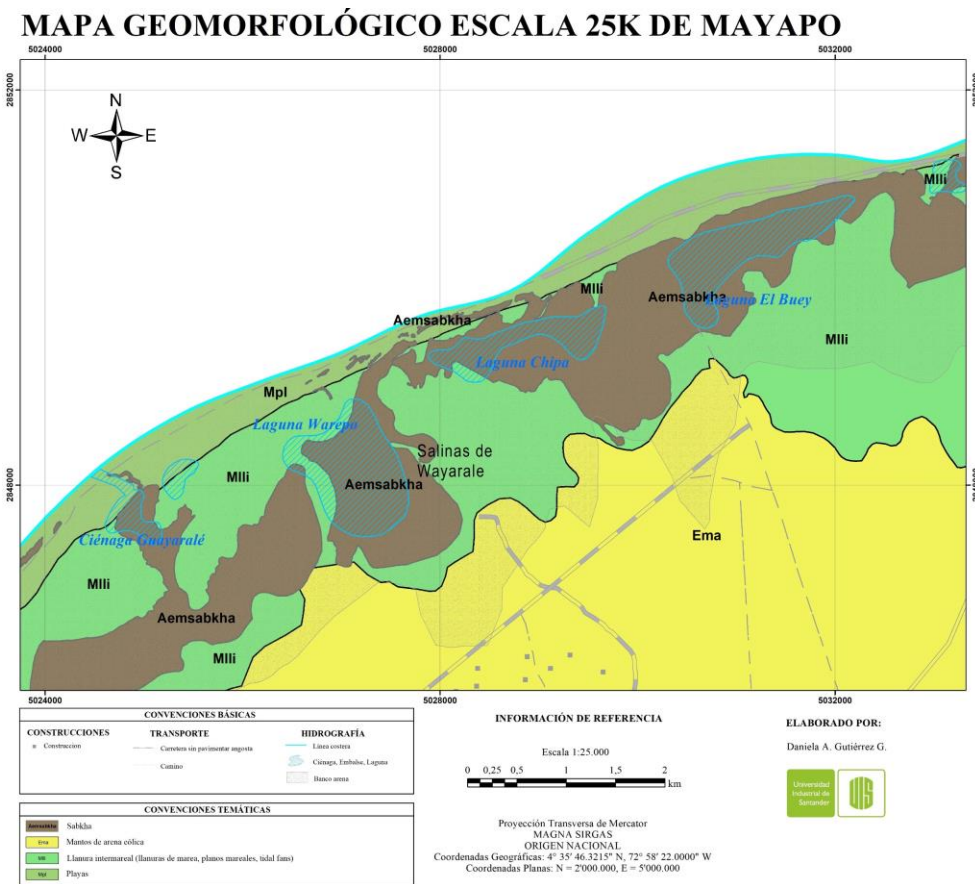
Las salinas (Asa) constituyen depósitos artificiales de agua salada de gran extensión, construidos mediante diques o barreras con el propósito de almacenar agua para la explotación de sal (SGC et al., 2017). Los lomeríos disectados (Dldi) se caracterizan por ser prominencias topográficas de morfología alomada con cimas redondeadas y amplias, presentando laderas cortas a moderadamente largas de formas rectas, cóncavas y convexas, con pendientes muy inclinadas a muy abruptas y un índice de relieve bajo La planicie denudacional (Dp) representa una porción de terreno extensa, plana y no confinada, de posición baja y pendiente plana a suave (generalmente menor a 5°), destacándose por su sistema fluvial complejo con frecuentes difluencias de las corrientes. Las dunas costeras sin diferenciar (Edin) conforman campos de arena de morfología y origen indeterminados, constituidos por depósitos de arena fina a muy fina, muy bien seleccionados y poco a nada consolidados, susceptibles al retrabajamiento por acción del oleaje y corrientes fluviales (SGC et al., 2017). El plano o llanura de inundación (Fpi) presenta una morfología plana, baja a ondulada, eventualmente inundable, que bordea los cauces fluviales y está limitada localmente por escarpes de terraza, incluyendo planos fluviales menores en forma de "V" y conos coluviales menores en valles intramontanos. El acantilado (Ma) se caracteriza por una superficie muy corta a corta, cóncava a convexa, con pendiente abrupta a vertical, originada por procesos de erosión marina y movimientos en masa en materiales de litología variada. La llanura intermareal (Mlli) exhibe una morfología plana a levemente inclinada, desarrollada por la interacción entre las mareas y niveles freáticos altos, compuesta por arena fina a lodosa con vegetación herbácea escasa o ausente (SGC et al., 2017). Finalmente, la playa (Mpl) se identifica como una acumulación de sedimentos depositados y transportados por el oleaje y las corrientes marinas, caracterizada por una vegetación mínima (SGC et al., 2017).

7.1.2 Unidades geomorfológicas de Mayapo

En el área de estudio se identificaron cuatro (4) geformas de diversos ambientes, los cuales se muestran en la Figura 15 y se describen a continuación.

Figura 15

Mapa geomorfológico escala 1:25.000 de Mayapo



La geforma más prominente corresponde a los mantos de arena eólica (Ema), los cuales constituyen acumulaciones sedimentarias de 20 a 30 cm de espesor, transportadas por acción eólica, que generan una morfología plana a suavemente ondulada y en algunos sectores colmatan lagunas costeras (Portilla, M., et al., 2017). En la zona también se desarrollan sabkhas (Aemsabkha), que representa cuerpos de agua salada artificial delimitado por diques o barreras,

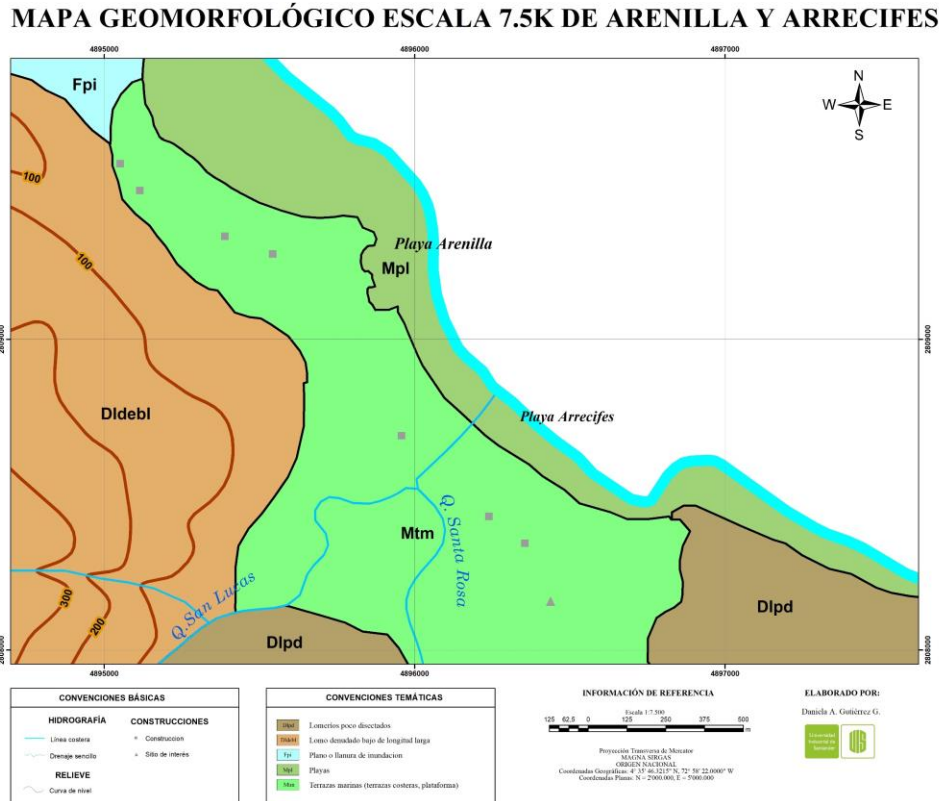
construido con fines de explotación salinera. Se presenta de igual manera la llanura intermareal (Mlli), caracterizada por su morfología plana a levemente inclinada, desarrollada por la interacción entre las mareas y el nivel freático alto, compuesta principalmente por arenas finas a lodos, con vegetación herbácea escasa o ausente; esta geoforma se ubica en zonas protegidas del oleaje marino y bordea las lagunas costeras del área (Portilla, M., et al., 2017). Las playas (Mpl), por su parte, constituyen acumulaciones de arena transportada y depositada por la acción del oleaje y las corrientes marinas, extendiéndose entre 50 y 100 metros desde la línea de costa, donde desarrollan geoformas dunares características (Portilla, M., et al., 2017).

7.1.3 Unidades geomorfológicas de las playas Arenilla y Arrecifes – Parque Tayrona

Se identificaron cinco (5) unidades geomorfológicas de ambientes denudacional, fluvial y marino, los cuales se muestran en la Figura 16 y se describen a continuación.

Figura 16

Mapa geomorfológico escala 1:7.500 de playa Arenilla y playa Arrecifes



La unidad de Lomeríos poco disectados (Dlpd) se caracteriza por una morfología alomada con índice de relieve bajo, presentando cimas alargadas, planas y amplias, con laderas de inclinación muy inclinada a abrupta y longitudes de largas a muy largas, predominantemente convexas (SGC et al., 2015b). Su patrón de drenaje es subparalelo con valles en forma de "V" abierta y fuerte incisión. El Lomo denudado bajo de longitud larga (Dldebl) constituye una prominencia topográfica alomada con índice de relieve bajo entre 200 y 250 metros, caracterizado por toques alargados y amplios, con vertientes muy inclinadas a abruptas y un patrón de drenaje subdendrítico (SGC et al., 2015b). La unidad de Plano o llanura de inundación (Fpi) se presenta

como una franja de terreno plana, de morfología baja y ondulada, con inundación ocasional, bordeando los cauces fluviales principales (SGC et al., 2015b).

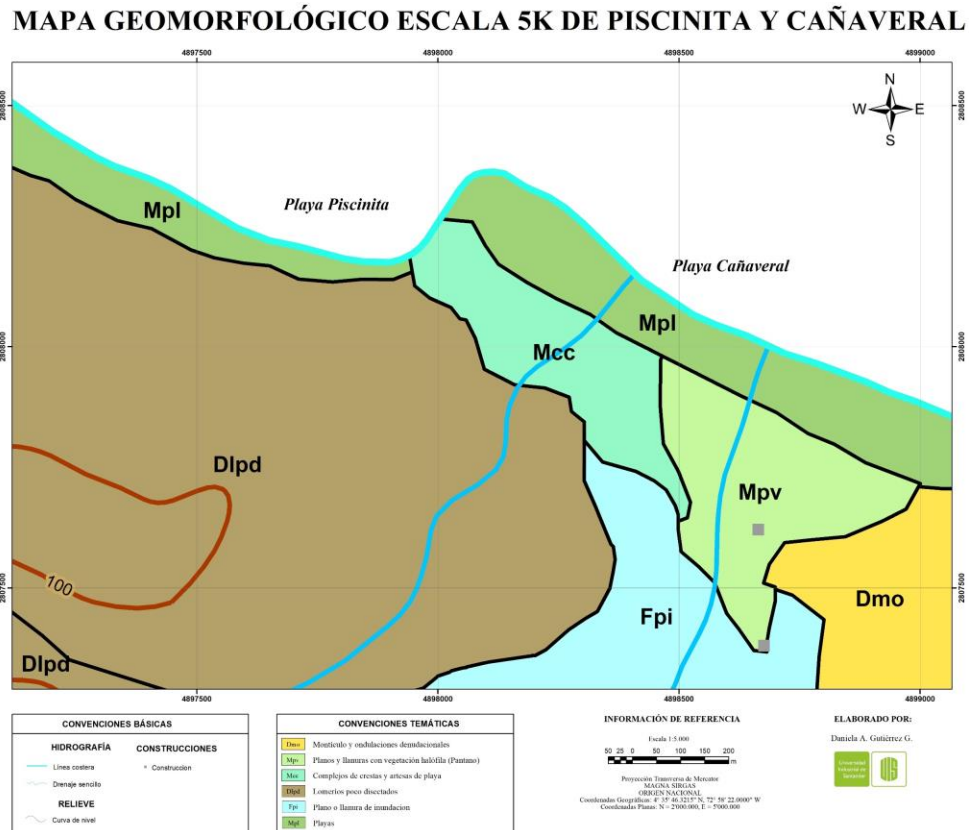
En el ambiente costero, se identifican dos unidades geomorfológicas distintivas: la Playa (Mpl) y las Terrazas marinas (Mtm). La playa se caracteriza por ser una zona de acumulación de sedimentos depositados por el oleaje y las corrientes marinas, formando franjas alargadas paralelas a la línea de costa, con dimensiones que varían desde metros hasta decenas de metros (SGC et al., 2015b). Las terrazas marinas, por su parte, constituyen superficies elevadas horizontales a subhorizontales que presentan un desnivel respecto al nivel del mar, originado por procesos tectónicos o cambios eustáticos. Estas terrazas exhiben un drenaje incipiente a medianamente incisado y muestran una fuerte intervención antrópica que ha modificado significativamente sus características naturales (SGC et al., 2015b).

7.1.4 Unidades geomorfológicas de las playas Piscinita y Cañaveral – Parque Tayrona

Se identificaron seis (6) unidades geomorfológicas de los ambientes denudacional, fluvial y marino, las cuales se muestran en la Figura 17 y se describen a continuación.

Figura 17

Mapa geomorfológico escala 1:5.000 de playa Piscinita y playa Cañaverál



Los Montículos y ondulaciones denudacionales (Dmo) se manifiestan como elevaciones suaves del terreno, exhibiendo una morfología colinada de relieve muy bajo, donde predominan las formas redondeadas a subredondeadas en sus cimas (SGC et al., 2015 a). Sus vertientes se caracterizan por pendientes suaves y extensiones reducidas, desarrollando un característico patrón de drenaje divergente con valles de perfil suave en "U" y escasa incisión (SGC et al., 2015 a). Los Lomeríos poco disectados (Dlpd) se distinguen por su configuración alomada de relieve bajo, presentando cimas extensas y aplanadas con laderas pronunciadas y extensas de geometría convexa, donde se desarrolla un sistema de drenaje subparalelo con valles profundamente

incisados. El Plano o llanura de inundación (Fpi) constituye una superficie de acumulación fluvial que bordea los cauces principales, caracterizada por su topografía plana y su susceptibilidad periódica a inundaciones (SGC et al., 2015a).

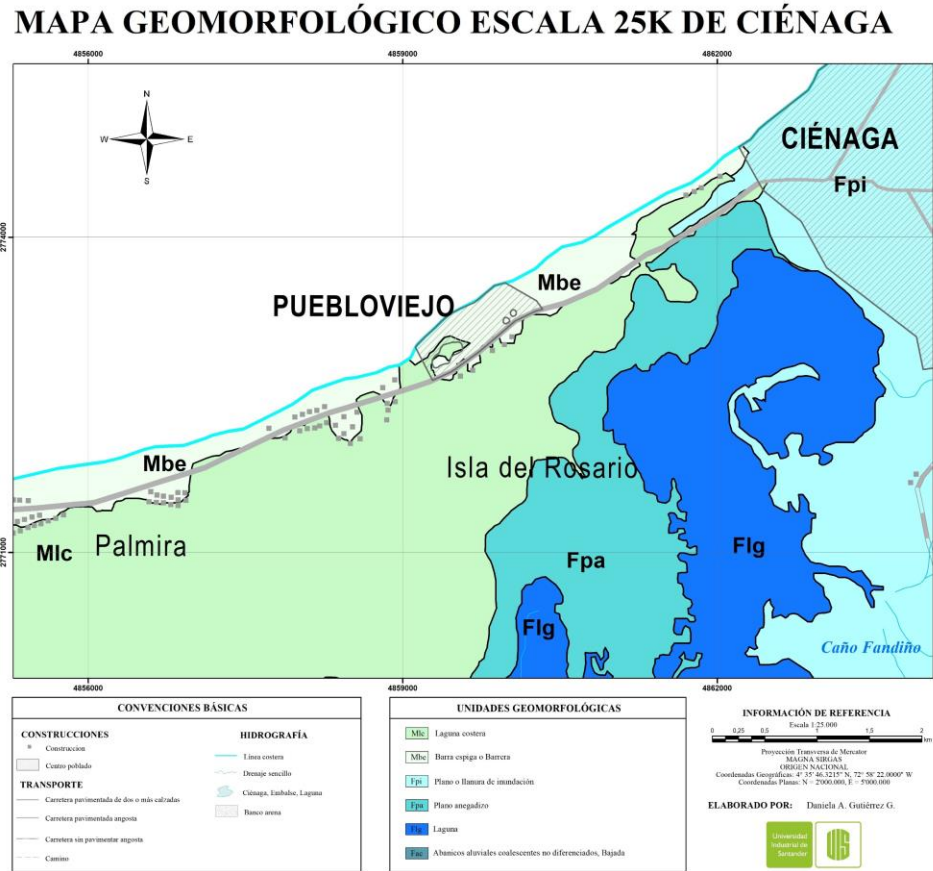
En el dominio costero, se identifican unidades geomorfológicas distintivas que evidencian la dinámica litoral. Los Planos y llanuras con vegetación halófila (Mpv) conforman depresiones topográficas de configuración plano-cóncava, caracterizadas por su elevada tabla de agua y la confluencia de procesos sedimentarios tanto marinos como continentales, proporcionando el sustrato ideal para el desarrollo de comunidades halófitas (SGC et al., 2015a). Los Complejos de crestas y artesas de playa (Mcc) representan un conjunto de paleorrelieves costeros constituidos por sucesiones de elevaciones y depresiones paralelas que evidencian antiguas posiciones de la línea de costa, frecuentemente colonizadas por vegetación pionera. Las Playas actuales (Mpl) se manifiestan como acumulaciones sedimentarias recientes, producto de la dinámica litoral activa, conformando franjas longitudinales paralelas a la costa actual, con anchuras variables que pueden alcanzar decenas de metros (SGC et al., 2015a).

7.1.5 Unidades geomorfológicas de Ciénaga, Magdalena

En la zona de Ciénaga se encuentran seis (6) unidades geomorfológicas, las cuales se exhiben en la Figura 18 y se describen a continuación.

Figura 18

Mapa geomorfológico escala 1:25.000 de Ciénaga



Las lagunas costeras (Mlc) son cuerpos de agua salada permanente situados en depresiones, comunicados periódicamente con el océano a través de una playa o cordón litoral (SGC et al., 2015b). A pesar del acarreo de sedimentos, estas lagunas mantienen profundidades que varían entre los 0.50 y 15 metros. Las barras espigas o barreras (Mbe) son formaciones elongadas y bajas que se disponen paralelamente a la costa, separando cuerpos de agua interiores del mar con tan solo una boca que comunica al mar, y están constituidas por arenas o gravas, con playas en su límite marino (SGC et al., 2015b). Además, el plano o llanura (Fpi) es una superficie plana y de

bajo relieve que se inunda durante lluvias prolongadas, con un drenaje subparalelo de baja incisión, creando pequeños valles en "U"(SGC et al., 2015b).

Otras unidades incluyen el plano anegadizo (Fpa), una superficie en forma de artesa casi plana e irregular, localizada en áreas mal drenadas cerca de ciénagas o lagunas, que se inunda temporalmente debido a lluvias o al ascenso del nivel del mar (SGC et al., 2015b). Los depósitos de lagunas (Flg), más pequeños que los lagos, son formaciones de agua estancada con sedimentos acumulados, cuya profundidad y contornos varían según las estaciones (SGC et al., 2015b). Finalmente, los abanicos aluviales coalescentes no diferenciados (Fac) son superficies onduladas en el piedemonte de la Sierra Nevada de Santa Marta, formadas por la unión de varios abanicos, con drenaje dicotómico y pendientes suaves, abarcando grandes áreas de llanuras deposicionales o "bajadas" (SGC et al., 2015b).

A continuación, se presenta la Tabla 2 en donde se muestra cada uno de los ambientes y depósitos o unidades geomorfológicas de los puntos de donde se extrajeron las muestras de sedimento:

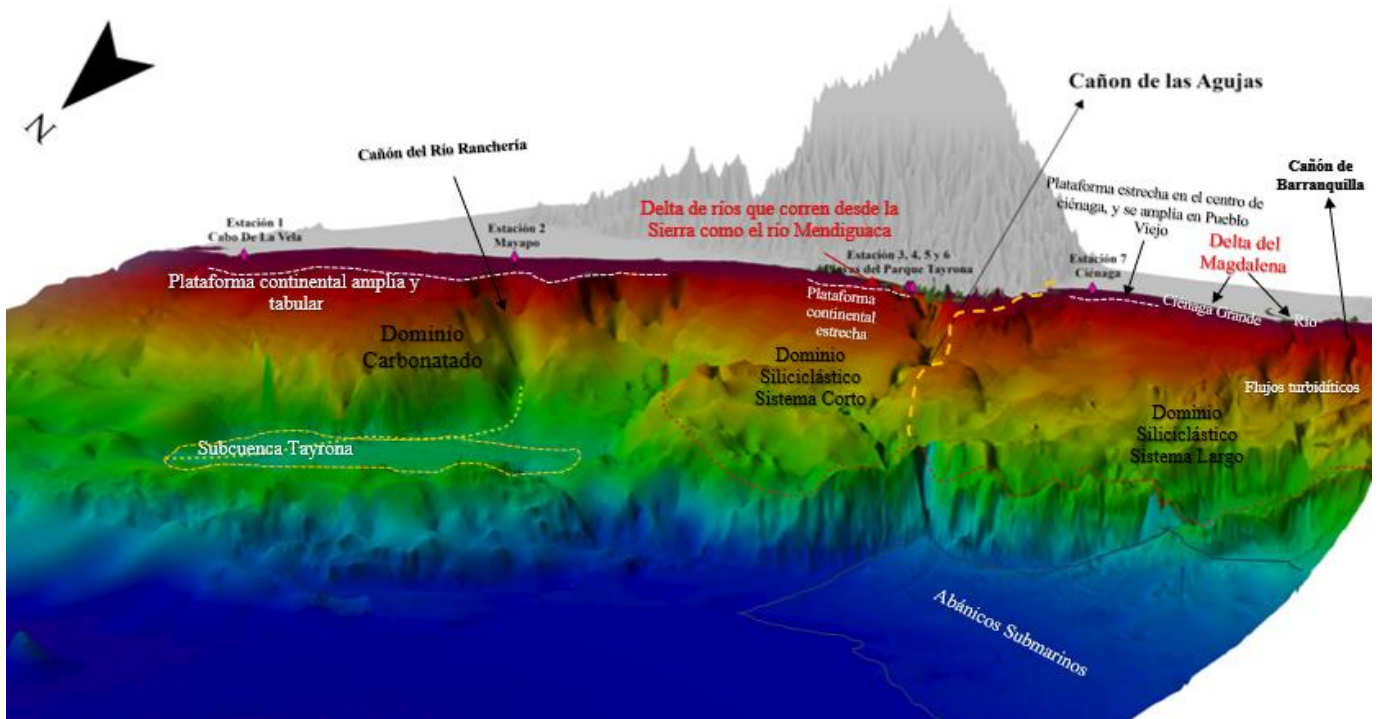
Tabla 2
Tipo de Ambiente y depósito de las muestras

Cód Muestra	Nombre	Ambiente / Depósito
DPS1	Cabo Backshore	
DPS2	Cabo Foreshore	
DPS3	Cabo Berma	Costero / Playa
DPS4	Cabo Washzone	Marino / Plataforma
DPS5	Cabo Plataforma 1	
DPS6	Cabo Plataforma 2	
CKS1	Salar Mayapo 1	Costero / Playa y Laguna
CKS2	Salar Mayapo 2	intermareal
KNS1	Cañaveral Backshore	
KNS2	Cañaveral Foreshore	
KNS3	Cañaveral Berma	Costero / Playa
KNS4	Cañaveral Washzone	
KNS5	Piscinita Foreshore	Costero / Playa
CKS3	Arrecifes Backshore	
CKS4	Arrecifes Foreshore	
CKS5	Arrecifes Berma	Costero / Playa
CKS6	Arrecifes Washzone	
KNS 6	Arenilla Backshore	
KNS7	Arenilla Washzone	Costero / Playa
DPS7	Ciénaga Canal de Marea	Costero / Barrera espiga
DPS8	Ciénaga Washzone	Costero / Playa

7.2 Análisis Batimétrico

Figura 19

Mapa Batimétrico de la zona de estudio



Se identificaron dos sistemas bien diferenciados en el margen continental del Caribe colombiano (Figura 19). En la zona de La Guajira, predomina un sistema carbonatado con una plataforma continental amplia. Entre las geformas más destacadas se encuentra el Cañón del Ranchería, un sistema de cañones submarinos asociado a la desembocadura del río Ranchería en la península de La Guajira (Krause, D. 1971). Este cañón actúa como un conducto principal para el transporte de sedimentos desde la plataforma continental hacia las zonas más profundas del mar Caribe, desempeñando un papel clave en la dinámica sedimentaria de la región (Krause, D. 1971). Su formación está influenciada por procesos tectónicos y erosivos, así como por el aporte

sedimentario del río Ranchería, que drena una cuenca con alta actividad erosiva debido a las condiciones áridas y semiáridas de La Guajira (Krause, D. 1971)

Por otro lado, la Subcuenca Tayrona, ubicada cerca del Parque Nacional Natural Tayrona, es una unidad geológica de gran complejidad tectónica y sedimentaria, influenciada por la interacción entre las placas del Caribe y Suramérica (Cardona, A., Montes, C., & Bayona. (2012). Esta subcuenca presenta una morfología diversa, que incluye plataformas continentales, taludes pronunciados y cañones submarinos, facilitando el transporte de sedimentos siliciclásticos provenientes de la Sierra Nevada de Santa Marta y depósitos carbonatados asociados a arrecifes coralinos (Díaz, J. M. & Gómez, D. I., 2003).

En contraste, en la zona del departamento del Magdalena, predomina un sistema siliciclástico en la plataforma continental, aunque con diferencias marcadas entre el área del Parque Tayrona y la Ciénaga Grande. En la zona de las playas del Parque Tayrona, el sistema siliciclástico es corto y está dominado por la tectónica del bloque de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), aquí la plataforma continental es casi inexistente. La geofoma principal es el Cañón de las Agujas, que forma parte de una red de valles submarinos que conectan la plataforma continental con las zonas más profundas del Caribe. (Rangel- Buitrago, N., et al., 2010).

En la zona de la Ciénaga Grande, que forma parte del sistema deltaico del río Magdalena, se observó una plataforma continental amplia en la zona de Pueblo Viejo, la cual se reduce a menos de 1 km cerca de Barranquilla, donde desemboca el río. Esta zona se caracteriza por ser un sistema continental "largo", ya que transporta sedimentos desde el interior del continente a través del cauce del río Magdalena, que nace en el Parque Nacional Natural Puracé (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2020). A lo largo de sus 1,540 kilómetros, el río Magdalena atraviesa diversas

regiones, como el valle del Magdalena, hasta desembocar en el mar Caribe, cerca de Barranquilla (Restrepo, J. D. & Kjerfve, D., 2000).

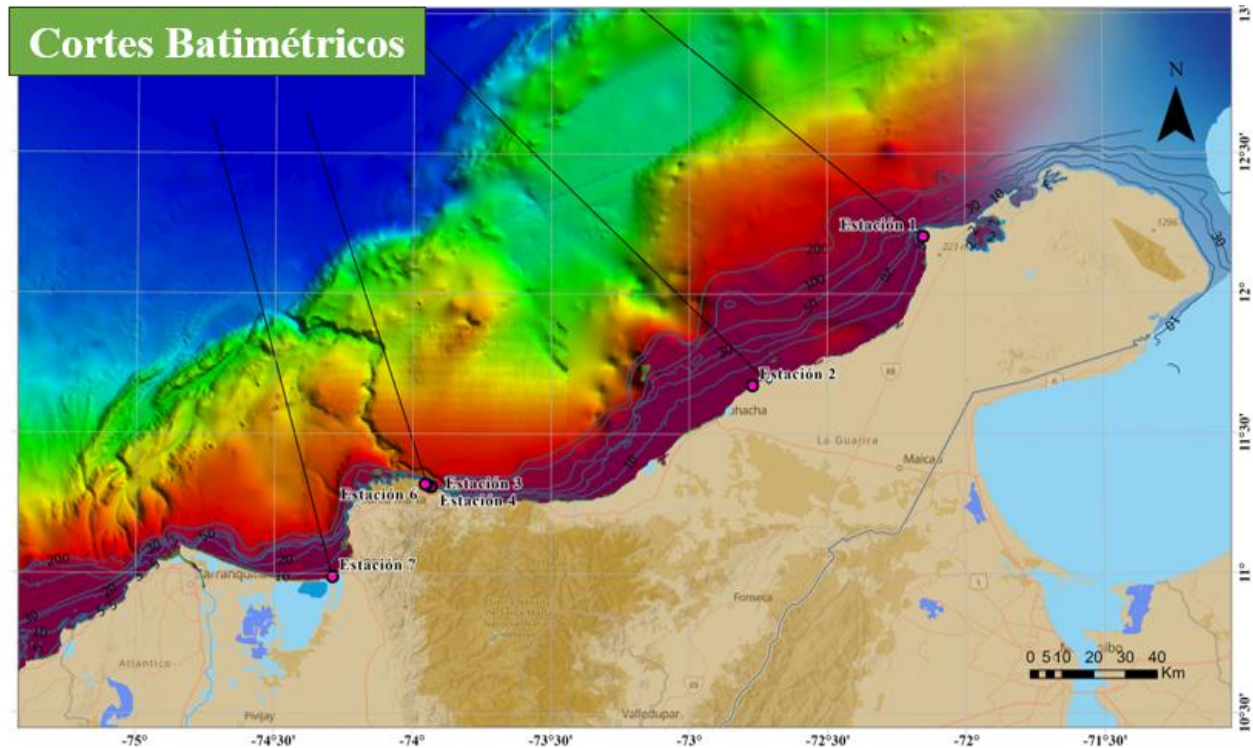
Entre las geoformas más destacadas de esta zona se encuentra el Cañón de Barranquilla o Boca de ceniza, un sistema de cañones submarinos ubicado frente a la desembocadura del río Magdalena. Este cañón es uno de los principales conductos para el transporte de sedimentos desde el continente hacia las zonas más profundas del mar (Restrepo, J. D., & López, S. A. (2008). Morfológicamente, se caracteriza por paredes escarpadas y un fondo estrecho, que facilitan el flujo de corrientes de turbidez y la formación de depósitos sedimentarios en aguas profundas. Su formación está asociada a la intensa actividad sedimentaria del río Magdalena, que aporta grandes volúmenes de sedimentos siliciclásticos al sistema marino (Heezen, B. C., 1956)

Además, las turbiditas del Magdalena se caracterizan por secuencias estratigráficas bien definidas, con capas gruesas de arena y limo intercaladas con lutitas (Heezen, B. C., 1956).

A continuación, se presenta la vista 2D de los cortes batimétricos realizados a las 4 zonas de estudio (Figura 20):

Figura 20

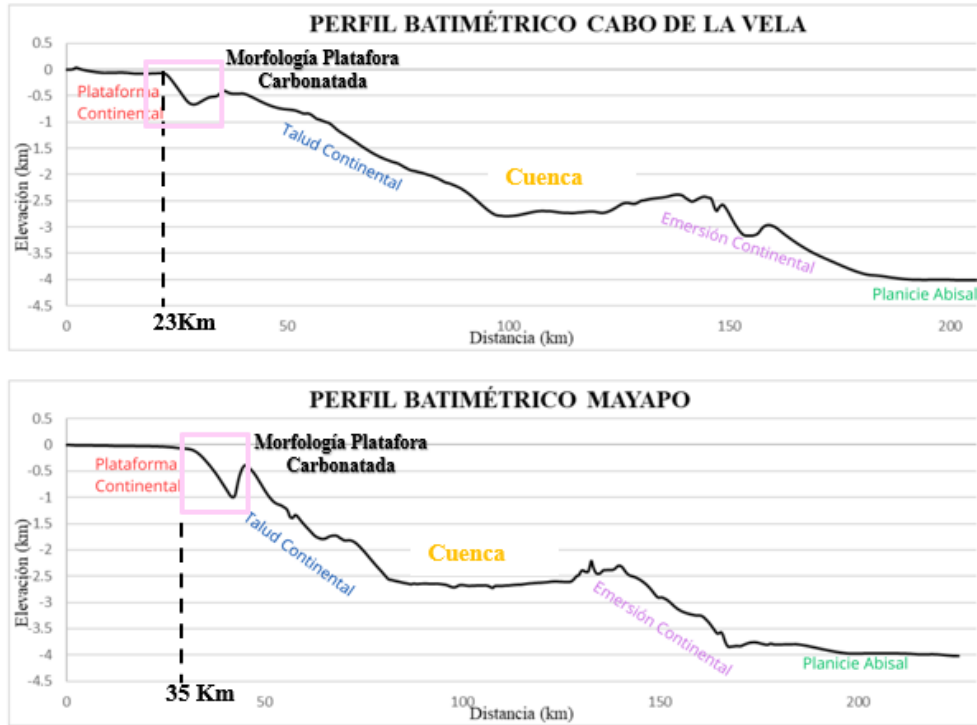
Cortes Batimétricos vista 2D



A partir de estos cortes, se obtuvieron los perfiles batimétricos, los cuales permitieron observar las diferencias entre ambos dominios. En la Estación 1 (Cabo de la Vela), la plataforma continental presenta una longitud de 23 km y alcanza una profundidad de aproximadamente 200 metros (Figura 21). De manera similar, en la Estación 2 (Mayapo), la plataforma también es extensa, con una longitud máxima de 35 km (Figura 21). Estas plataformas carbonatadas son estructuras geológicas formadas por la acumulación de sedimentos de carbonato de calcio, generalmente en ambientes marinos poco profundos (Tucker & Wright, 1990).

Figura 21

Perfiles Batimétricos Cabo de la Vela y Mayapo

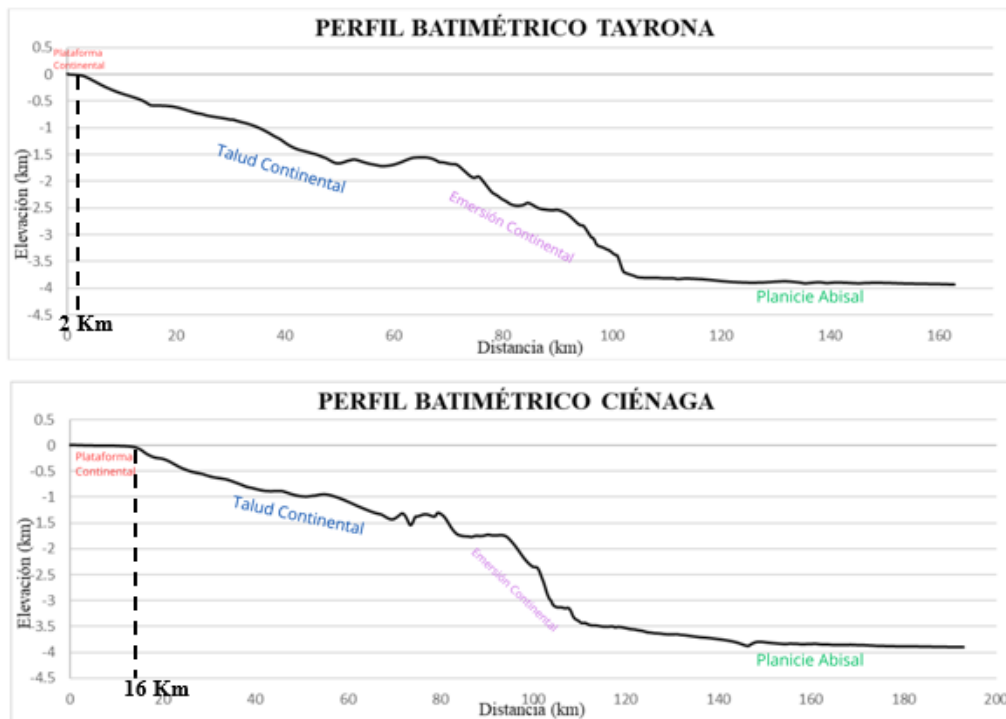


Por otro lado, Las estaciones 3,4,5,6 (Parque Tayrona) y La Estación 7 (Pueblo Viejo Ciénaga) Se caracterizan por una plataforma con una pendiente más gradual y menos pronunciada (Figura 22) en comparación con las plataformas carbonatadas, que pueden presentar bordes más abruptos (Reading, H. G., 1996).

Esta uniformidad es debido a la ausencia de estructuras como arrecifes de coral o bancos de arena que son propias de plataformas carbonatadas (Reading, H. G., 1996).

Figura 22

Perfiles Batimétricos Parque Tayrona y Pueblo Viejo-Ciénaga



7.3 Análisis Multitemporales

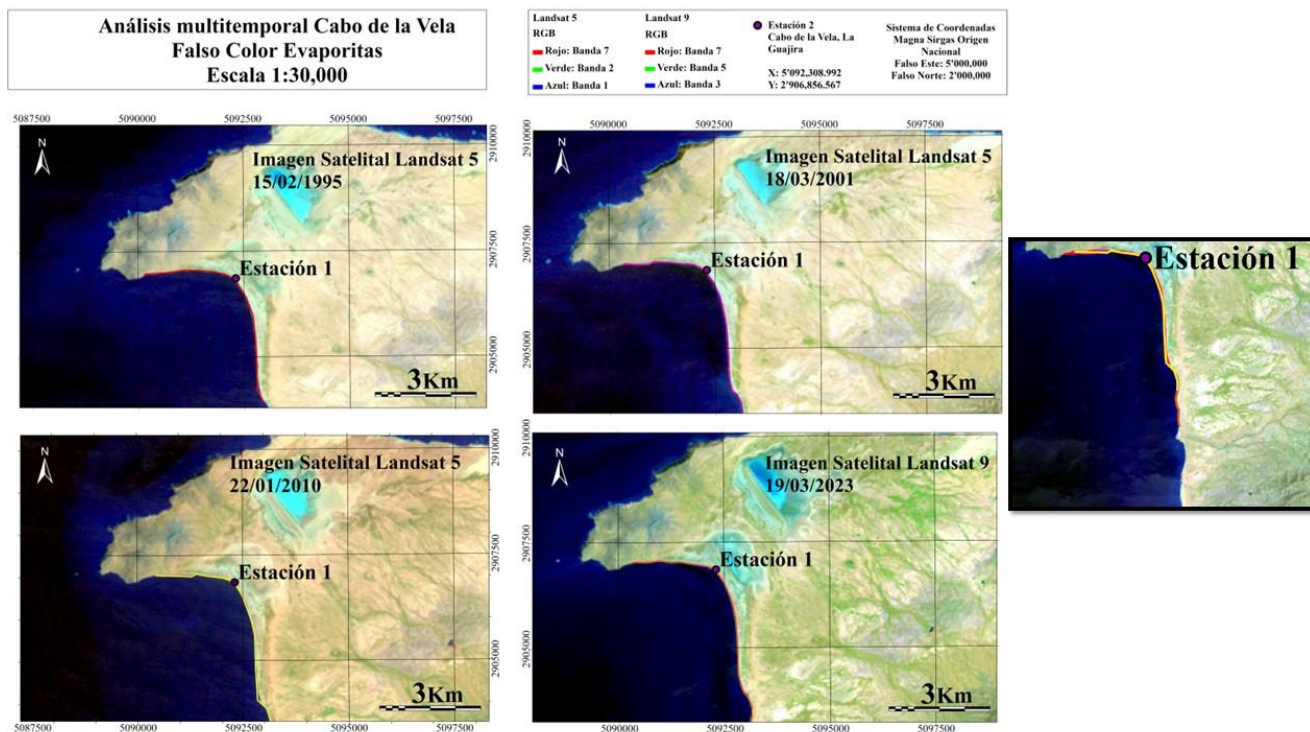
En los análisis multitemporales se identificaron cambios significativos en la línea de costa y área de playa a lo largo del tiempo, desde la década de 1990 hasta la actualidad. A continuación, se presentan los detalles de estas variaciones.

7.3.1 Análisis Multitemporal Cabo De La Vela

En cuanto a la línea de costa en el Cabo de la Vela, no se observan variaciones significativas desde la década de 1990 hasta la actualidad con respecto a la playa, como se muestra en la Figura 23.

Figura 23

Análisis multitemporal de la línea de costa y otros aspectos Cabo de la Vela



Nota. Configuración RGB para Evaporitas tomado de "Ambientes sedimentarios del arroyo Papagayos, piedemonte oriental de las Sierras La Huerta-Imanas, San Juan, Argentina", por S. Malnis, et l., 2018, Andean Geology, 45.

Otro punto importante es el aumento en el área de lagunas evaporíticas en la zona desde la década de los 90's hasta la actualidad.

Las lagunas varían su área según la época del año, llegando incluso a secarse en determinadas temporadas, como se muestra en la Figura 23 la combinación de bandas utilizada para el análisis multitemporal es sensible a los contenidos evaporíticos, los cuales se tiñen de un tono cian. Esto demuestra una aparente tendencia a la proliferación de estas lagunas. Entre 1995 y

2010, se observó la presencia de un solo cuerpo evaporítico. En cambio, la imagen satelital del 2023 muestra un cuerpo evaporítico adicional al observado en décadas pasadas, ubicado a una menor distancia de la playa, justo detrás de las rancherías. A rasgos generales la playa en el Cabo de la Vela ha presentado una estabilidad en los últimos 20 años sin avances o retrocesos importantes, lo que nos indica una erosión mínima.

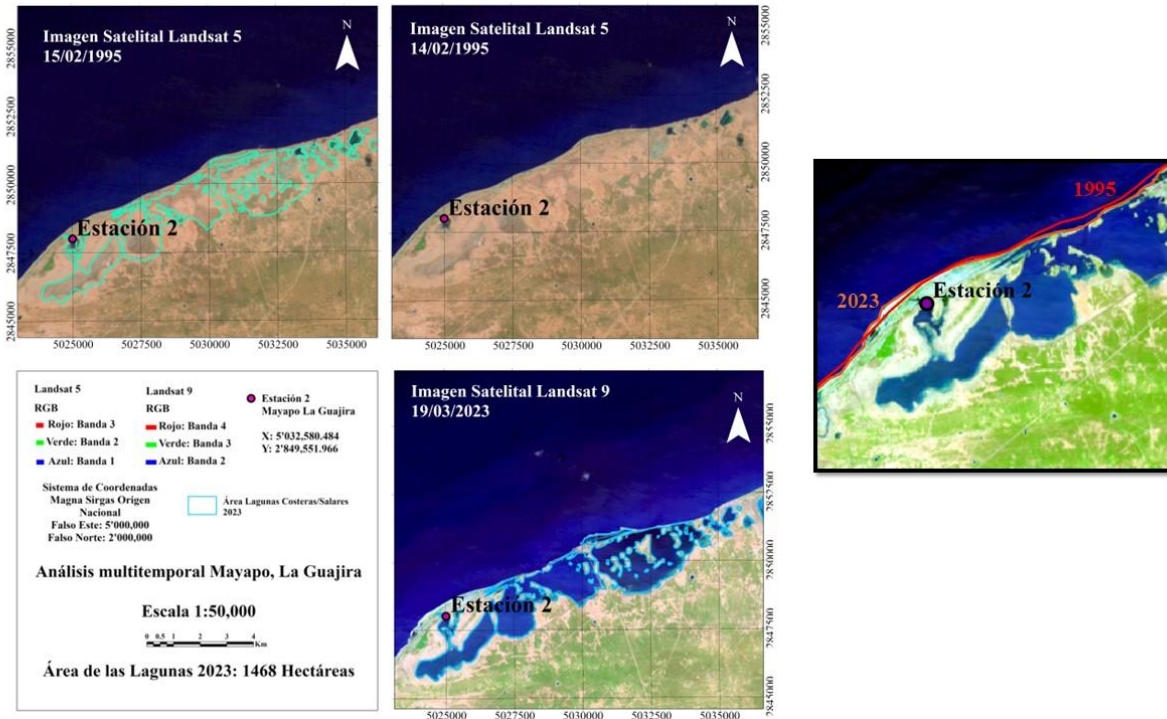
7.3.2 Análisis Multitemporal Mayapo

La zona de Mayapo presenta una erosión notable en la línea de playa, con variaciones significativas cada 500 m aproximadamente. Al oeste de la estación 2, se observa una marcada tendencia a la erosión, donde se han perdido hasta 50 m de playa entre 1995 y 2023 (Por otro lado, en algunas áreas, como las playas que se encuentran perpendicular a la Estación 2, se han registrado ganancias de hasta 200 m en la línea costera en el mismo periodo de tiempo. En general, las zonas donde se da tendencia a la acumulación de sedimento han experimentado un incremento promedio de entre 50 y 65 m durante el mismo periodo. Sin embargo, la franja de costa más cercana a El Pájaro es la más afectada por la erosión, con una pérdida de hasta 150 m de playa.

Por otro lado, se evidenció un aumento significativo en los cuerpos de agua como lagunas costeras, tanto por factores naturales como antrópicos, desde la década de 1990 hasta la actualidad. En la década de 1990, la presencia de estos cuerpos lagunares era poca. Sin embargo, han ido apareciendo de manera progresiva, llegando a ocupar un área aproximada de 1.468 hectáreas, según el análisis (Figura 24).

Figura 24

Análisis Multitemporal Línea costa y área lagunar, Mayapo.



En general, en Mayapo se observó un retroceso de la línea de costa de promedio entre 40-50 m en algunas zonas esta erosión fue mayor llegando hasta más de 100 m, lo que indica que la zona de Mayapo es un área muy vulnerable al fenómeno de la erosión costera, perdiendo anualmente más sedimento en las playas del que se acreciona.

7.3.3 Análisis Multitemporal Playas Del Parque Tayrona

En Playa Cañaveral, entre 2002 y 2013, la zona más cercana a Punta Castillete fue la más afectada, con una pérdida de hasta 16 m de frente de playa (Figura 25). Sin embargo, al analizar el periodo completo de 2002 a 2023, se observa una tendencia general hacia la depositación más que a la erosión, con variaciones promedio de 5 m en la línea de playa. Esta dinámica de depositación es particularmente evidente en la misma área cercana a Punta Castillete, donde se

registraron incrementos de hasta 14 m en ese lapso. En contraste, otras zonas de la playa se mantuvieron relativamente estables a lo largo del periodo estudiado (Figura 25).

Caso contrario ocurre en la playa La Piscinita, donde se ha registrado una erosión progresiva de su superficie, sin considerar factores climáticos y de oleaje (Figura 25). Entre 2002 y 2013, la línea de playa se redujo en promedio 12 m, mientras que entre 2013 y 2023 disminuyó otros 9 m, sumando un total de 21 m de pérdida promedio a lo largo de todo el periodo estudiado.

Figura 25

Análisis multitemporal línea costera zona Playa Cañaveral – Playa La Piscinita

Análisis Multitemporal Playa Cañaveral y Piscinita



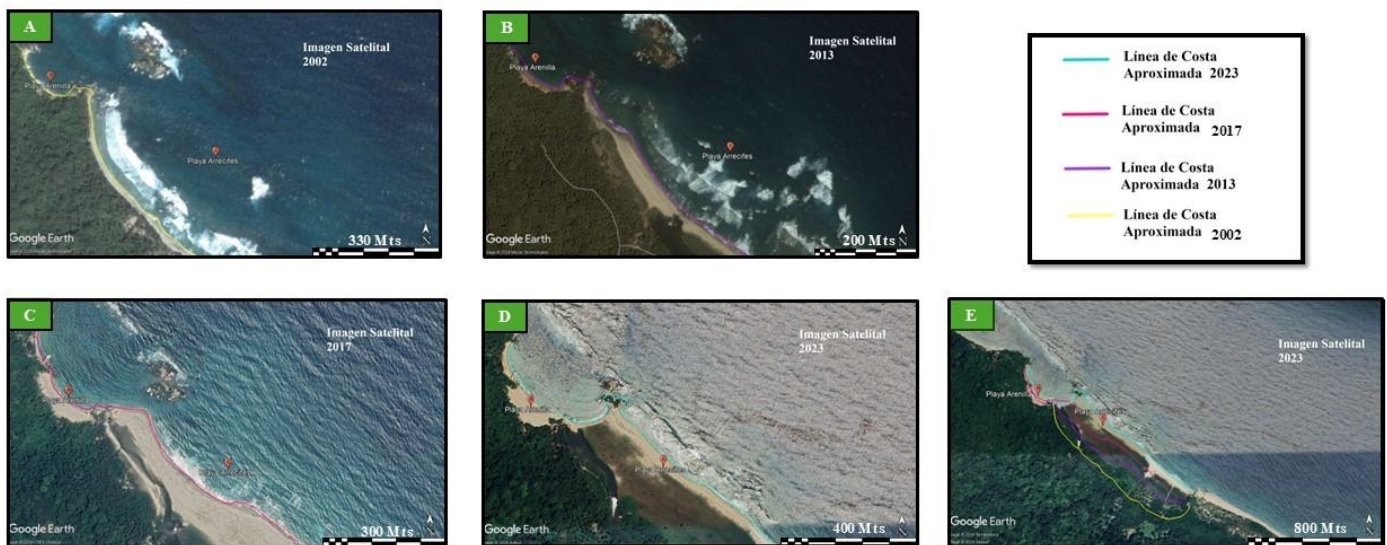
Por otra parte, la dinámica de las playas Arrecifes y Arenilla ha mostrado un cambio notable, con una clara tendencia hacia la deposición (Figura 26). En Arrecifes, entre 2002 y 2013, se observaron sectores con una ganancia de terreno de hasta 130 m, mientras que el promedio

general osciló entre 60 y 100 m. Posteriormente, entre 2013 y 2017, la ganancia promedio se situó entre 80 y 100 m, y de 2017 a 2024, este promedio varió entre 70 y 100 m, dependiendo de la zona.

Figura 26

Análisis multitemporal línea costera zona Playa Arrecifes – Playa Arenilla

Análisis Multitemporal Playa Arrecifes y Arenilla



En la playa Arenilla, durante el periodo completo de estudio (2002-2023), se registró una ganancia total de aproximadamente 40 m en el frente de playa, acompañada de un aumento en su área de extensión. Entre 2002 y 2013, los cambios no fueron tan significativos, con zonas de alrededor de 8 m donde se depositó material. En cambio, en el periodo de 2013 a 2017, se observaron ganancias más notables, que variaron entre 9 y 15 m, dependiendo de la zona, siendo más evidentes cerca del tómbolo. Finalmente, entre 2017 y 2024, se registró un incremento de entre 20 y 35 m, consolidando una tendencia de crecimiento sostenido en esta playa.

Como otra característica importante en este sector se evidenció el cambio en el cauce fluvial que llega a las playas Arrecifes y Arenilla desde el 2002 al 2023. En las imágenes se aprecia como progresivamente modifica su cauce desde más al oriente de la playa Arrecifes (2002) hasta finalmente encontrarse en medio en la intersección entre ambas playas en 2023.

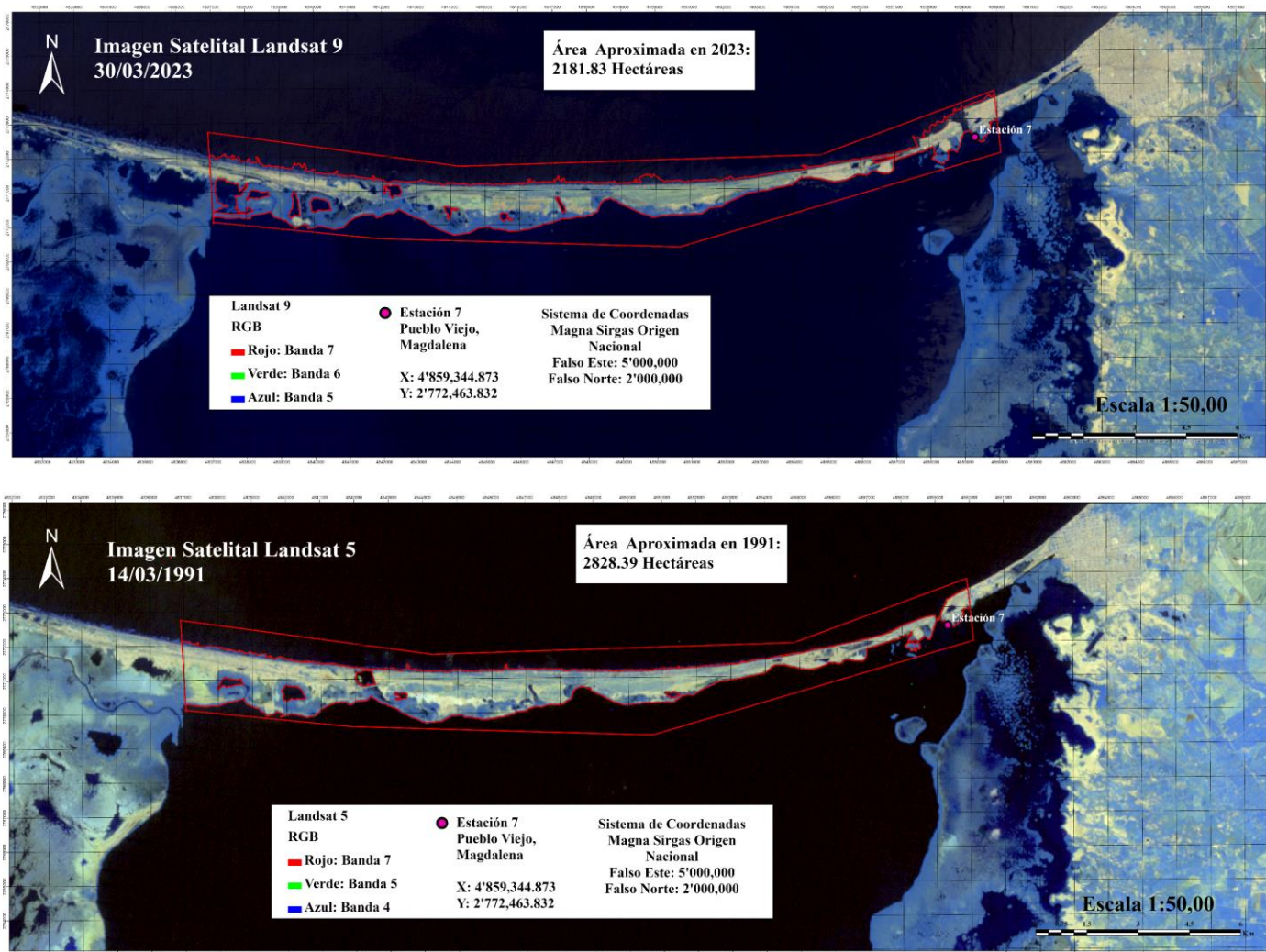
7.3.4 Análisis Multitemporal Ciénaga Magdalena

La zona de Ciénaga, Magdalena, ha experimentado en las últimas décadas una problemática constante debido a la erosión costera, como se evidencia en los análisis realizados. Un rasgo notorio de este fenómeno es la pérdida de terreno en la troncal del Caribe que atraviesa la Ciénaga Grande de Santa Marta, en el trayecto Ciénaga-Barranquilla.

Para evaluar esta situación, se utilizó una combinación de bandas que identifica eficazmente la línea costera y otros elementos, como construcciones y carreteras (componentes del área urbana, ver Figura 27). Se realizó el cálculo del área correspondiente a este tramo de 28 km de carretera en 1991 y 2023, obteniendo que en 1991 esta zona tenía un área de aproximadamente 2.828,39 hectáreas, mientras que en 2023 su área se redujo a 2.181,83 hectáreas. Esto representa una pérdida de 646,56 hectáreas, evidenciando claramente la tendencia erosiva.

Figura 27

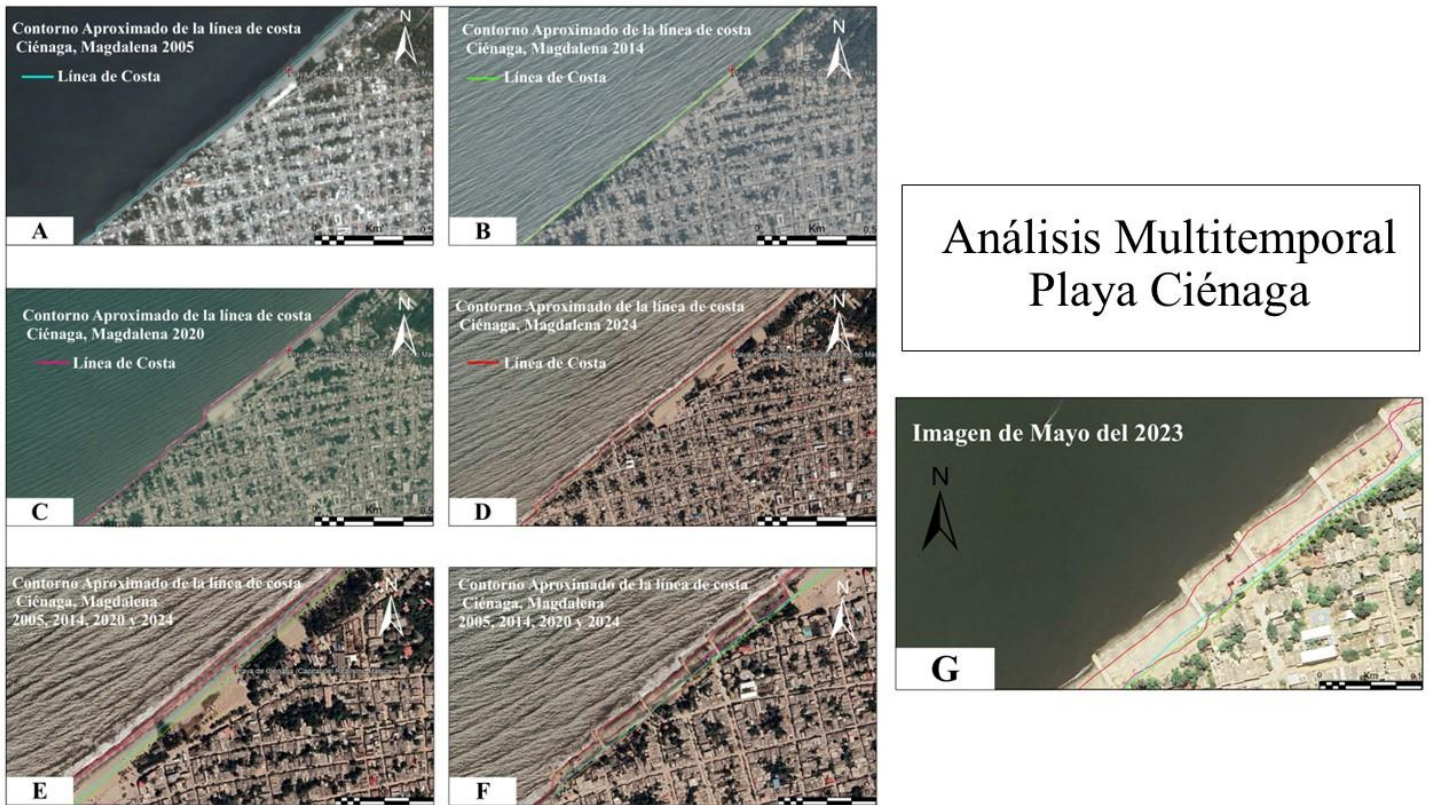
Análisis multitemporal Combinación de bandas RGB línea costera, Ciénaga



El cambio en la línea de playa fue evaluado en el área de la playa de Ciénaga, específicamente en la zona del malecón. En 2005, la línea de costa se encontraba muy cercana al área urbana. La tendencia erosiva se hizo más evidente en 2014, cuando se registró una pérdida promedio de 10 metros de playa en la zona del malecón (Figura 28).

Figura 28

Análisis multitemporal línea costera, Ciénaga



Sin embargo, entre 2014 y 2020, se observó un aumento de 40 metros en la línea de playa del malecón (Figura 28 E), aunque esta recuperación no fue uniforme, ya que al oeste del malecón continuó la tendencia erosiva, con una pérdida promedio de 10 metros. Finalmente, en 2024, se evidenció una tendencia clara hacia la acreción en todas las áreas. En el malecón, la línea de playa aumentó 20 metros en comparación con 2020, y al oeste de este se registraron playas que ganaron en promedio de entre 35 a 50 metros de terreno durante este periodo.

7.4 Análisis sedimentológico

7.4.1 Análisis granulométrico

A continuación, se presentan los datos granulométricos obtenidos con el procesamiento de datos del tamizaje de los sedimentos en la herramienta GRADISTAT (Tabla 3):

Tabla 3

Estadísticas granulométricas según software GRADISTAT para las muestras del área de estudio

Muestra	(M_z) :	(σ_I) :	(Sk_I) :	(K_G) :
DPS1	1.983	0.900	-0.356	1.229
DPS2	2.446	0.406	-0.152	1.060
DPS3	2.423	0.483	-0.226	1.348
DPS4	2.441	0.412	-0.157	1.077
CKS1	0.957	0.893	-0.384	0.171
KNS1	1.069	0.812	-0.002	0.821
KNS2	1.327	0.690	-0.063	1.162
KNS3	1.024	0.958	-0.151	0.945
KNS4	0.139	0.908	0.398	0.825
KNS5	0.843	0.782	-0.043	0.856
CKS3	-0.238	0.483	-0.175	0.621
CKS4	1.020	0.666	-0.033	0.752
CKS5	0.777	0.876	0.098	0.865
KNS6	0.677	0.849	-0.075	0.936
KNS7	1.196	0.802	0.017	0.942
DPS7	2.457	0.383	-0.128	0.991
DPS8	2.429	0.459	-0.206	1.255

Nota. Las métricas en las columnas, de izq. a der., representan mediana, selección, asimetría y kurtosis

Para la interpretación correcta de estos valores obtenidos se siguieron los criterios establecidos

Por Folk, R. L. & Ward, W. C., 1957 (Tabla 4).

Tabla 4

Rangos para la subclasificación de tamaño de grano, selección, asimetría y curtosis.

Término descriptivo		Tamaño de grano	
		Phi (ϕ)	milímetros (mm)
Grava	Fina	-2	4
	Muy fina	-1	2
Arena	Muy gruesa	0	1
	Gruesa	1	0,5
	Media	2	0,25
	Fina	3	0,125
	Muy fina	4	0,0625
Limo	Muy Grueso	5	0,03125
	Grueso	6	0,015625
	Medio	7	0,00781
	Fino	8	0,003906
	Muy fino	9	0,001953
Arcilla		10	0,000977

Selección (σI)	
Muy bien seleccionado	< 0.35 ϕ
Bien seleccionado	0.35 ϕ - 0.50 ϕ
Moderadamente bien seleccionado	0.5 ϕ - 0.70 ϕ
Moderadamente seleccionado	0.70 ϕ - 1.00 ϕ
Pobremente seleccionado	1.00 ϕ - 2.00 ϕ
Muy pobremente seleccionado	2.00 ϕ - 4.00 ϕ
Extremadamente mal seleccionado	> 4.00 ϕ
Asimetría ($SK I$)	
Muy asimétrico hacia los finos	0.3 ϕ a 1.0 ϕ
Asimetría hacia los finos	0.1 ϕ a 0.3 ϕ
Simétrico	0.1 ϕ a -0.1 ϕ
Asimetría hacia los gruesos	-0.1 ϕ a -0.3 ϕ
Muy asimétrico hacia los gruesos	-0.3 ϕ a -0.1 ϕ
Curtosis (KG)	
Muy platicúrtico	< 0.67 ϕ
Platicúrtico	0.67 ϕ - 0.90 ϕ
Mesocúrtico	0.90 ϕ - 1.11 ϕ
Leptocúrtico	1.11 ϕ - 1.50 ϕ
Muy leptocúrtico	1.50 ϕ - 3.00 ϕ
Extremadamente leptocúrtico	> 3.00 ϕ

Nota. Adaptado de "A study of the signification of grain size parameters", por R. L. Folk y W. C. Ward, 1957, Journal of Sedimentary Petrology, 27(1), p. 3-26.

Según los valores obtenidos (Tabla 4), se evidencia que las muestras tienen un tamaño arena que va desde los rangos de arena muy fina a arena muy gruesa, con respecto a la selección se puede afirmar que tienen una clasificación de granos entre buena y moderada. En cuanto a la asimetría, se observaron rangos simétricos en las muestras de Cabo de la Vela, excepto en DPS1, que presenta asimetría hacia los granos finos. En Mayapo, la muestra CKS1 muestra una

asimetría marcada hacia los granos gruesos. Para los sedimentos del Parque Tayrona, se registraron valores predominantemente simétricos, con excepción de las muestras KNS3, cuya distribución es muy asimétrica hacia los granos gruesos, y KNS4 y CKS3, que presentan asimetría muy marcada hacia los granos finos.

Por otra parte, para los valores de curtosis se obtuvieron rangos meso y leptocúrticos para la mayoría de las muestras, para los valores leptocúrticos indica que hay una concentración más alta de partículas cercanas al tamaño medio, pero también una mayor presencia de partículas considerablemente grandes (Blott, S. J., & Pye, K., 2001). Por otra parte, los valores mesocúrticos indican una distribución que se asemeja a una distribución normal, es decir, las partículas están distribuidas de manera más uniforme en torno al tamaño medio y no hay una cantidad excesiva de partículas extremadamente grandes o pequeñas (Blott, S. J., & Pye, K., 2001).

7.4.2 Análisis de Secciones Delgadas

Para facilitar el conteo, se organizó la nomenclatura de los minerales y elementos siguiendo las recomendaciones del método Gazzi-Dickinson (Dickinson, W. R., 1970; Ingersoll, R. V., et al., 1984), como se muestra en la Tabla 5:

Tabla 5
Nomenclatura Composicional

Nom.	Minerales o Componentes
Qp	Cuarzo policristalino
Qm	Cuarzo Monocristalino
P	Plagioclasa
Kfs	Feldespatos Potásicos
Lv	Líticos volcánicos
Lm	Líticos metamórficos
Ls	Líticos sedimentarios
Lp	Líticos plutónicos
M	Filosilicatos: Moscovita (Msc), Biotita (Bt), Clorita (Cl)
DD	Minerales pesados: Magnetita (Mg), Ilmenita (Il)
Ti	Titanita
Hal	Halita
Hbl	Horblenda
Epd	Epidota
Accesorios	Circón (Zr), Topacio (Tp)
Aug	Augita

Nota. Adaptado de "The effect of grain size on detrital modes: A test of the Gazzi-Dickinson point-counting method", por R. V. Ingersoll, et al., 1984, Journal of Sedimentary Petrology, 54(1), p. 103-116.

A continuación, se presentan de manera general las descripciones composicionales de las cuatro zonas de estudio:

Para las muestras de Cabo de la Vela se obtuvieron los siguientes resultados de conteo (Tabla 6), en donde se observa una clara predominancia de los Bioclastos, seguido por el Cuarzo policristalino (Qp) y monocristalino (Qm) y los Líticos (Lm, Ls, Lp) y por último como más "accesorios" minerales como Titanita (Ti) y Opacos (Il) (Figura 29).

Tabla 6
Conteo Cabo de la Vela

Sección	Muestra	Qp	Qm	P	K	Lv	Lm	Ls	Lp	M	DD (Il)	Ti	Bioclastos	Total
1	DPS1	17	40	3	0	0	21	8	13	0	9	12	177	300
2	DPS4	8	46	2	0	0	28	6	9	0	9	6	186	300
3	DPS5	9	30	0	0	0	12	0	15	0	0	0	234	300

Por otra parte, en las muestras de Mayapo, se tiene una mayoría de Bioclastos (Tabla 7), seguido por clastos de Halita, Cuarzo policristalino (Qp) y monocristalino (Qm), los Líticos (Lm, Ls, Lp), Plagioclasa (P), Feldespato potásico (K) y, por último, minerales opacos como la ilmenita (Il) (Figura 30).

Tabla 7

Conteo Muestras Mayapo

Sección	Muestra	Qp	Qm	P	K	Lv	Lm	Ls	Lp	M	DD (Il)	Hal	Bioclastos	Total
4	CKS1	9	21	21	0	0	2	22	0	0	15	102	108	300
5	CKS2	8	52	27	15	0	9	30	0	0	0	30	129	300

La zona del parque Tayrona presenta una composición más variada (Tabla 8) que las de las muestras de la Guajira, como componente principal se presenta el cuarzo monocristalino (Qm), Seguido de los líticos, principalmente de origen plutónico (Lp), los Feldespatos (P y K), los filosilicatos (M) como las micas en especial Biotita (Bt), el anfíbol Hornblenda (Hbl), Líticos metamórficos y sedimentarios (Lm y Ls), elementos opacos como Magnetita o Ilmenita (DD), la Epidota (Epd), los minerales accesorios como el Topacio (Tp) y el Circón (Zr) y por último los Bioclastos los cuales su cantidad es casi despreciable (Figura 31 y Figura 32)

Tabla 8

Conteo Parque Tayrona

Sección	Muestra	Qp	Qm	P	K	Lv	Lm	Ls	Lp	M	DD	Accesorios	Bioclastos	Hbl	Epd	Total
6	KNS1	12	90	36	15	5	9	0	55	33	12	6	3	24	0	300
7	KNS2	18	102	15	15	8	10	3	39	57	5	4	0	15	9	300
8	KNS3	39	78	17	10	4	6	4	46	57	10	7	3	10	5	300
9	KNS4	51	60	12	9	0	15	0	48	63	9	6	0	15	12	300
10	KNS5	69	122	10	14	6	13	4	31	23	0	3	1	4	0	300
11	CKS3	67	83	3	5	11	12	10	40	45	12	2	3	9	4	300
12	CKS6	54	78	33	12	16	19	9	25	32	2	3	5	6	5	300
13	KNS6	18	96	18	12	13	9	6	41	45	0	2	1	39	0	300

Por último, para la zona de Ciénaga se observó una mineralogía y composición muy similar a la de las muestras del parque Tayrona (Tabla 9), con el Cuarzo monocristalino (Qm) como componente principal, seguido por el cuarzo policristalino (Qp), la Horblenda (Hbl), La Plagioclasa (P), los Líticos Plutónicos (Lp), los Líticos metamórficos (Lm), el Feldespato potásico (K), los filosilicatos (M) como la Biotita (Bt) y Moscovita (Msc), la Epidota (Epd), el piroxeno Augita (Aug), los minerales opacos (DD), los Bioclastos y por último minerales accesorios (Figura 33).

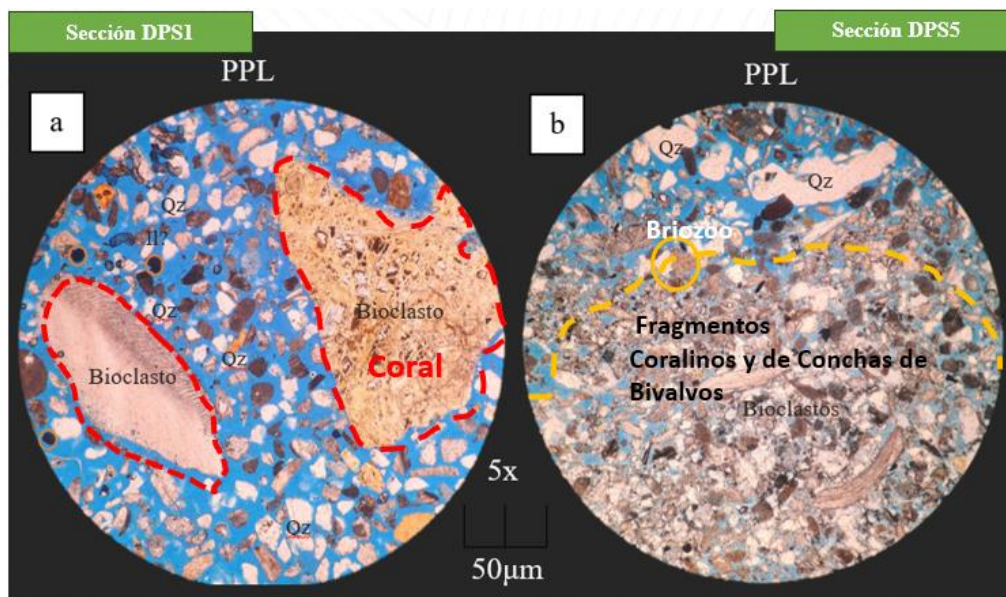
Tabla 9

Conteo Ciénaga

Sección	Muestra	Qp	Qm	P	K	Lv	Lm	Ls	Lp	M	DD	Accesorios	Bioclastos	Hbl	Epd	Aug	Total
14	DPS7	30	54	39	30	9	18	16	26	22	3	2	6	36	0	9	300
15	DPS8	41	85	21	18	11	12	20	43	9	6	3	2	19	10	0	300

Figura 29

Secciones delgadas Cabo de la Vela



Nota. Cuarzo (Qz), Ilmenita (Il)

Figura 30

Secciones delgadas Mayapo

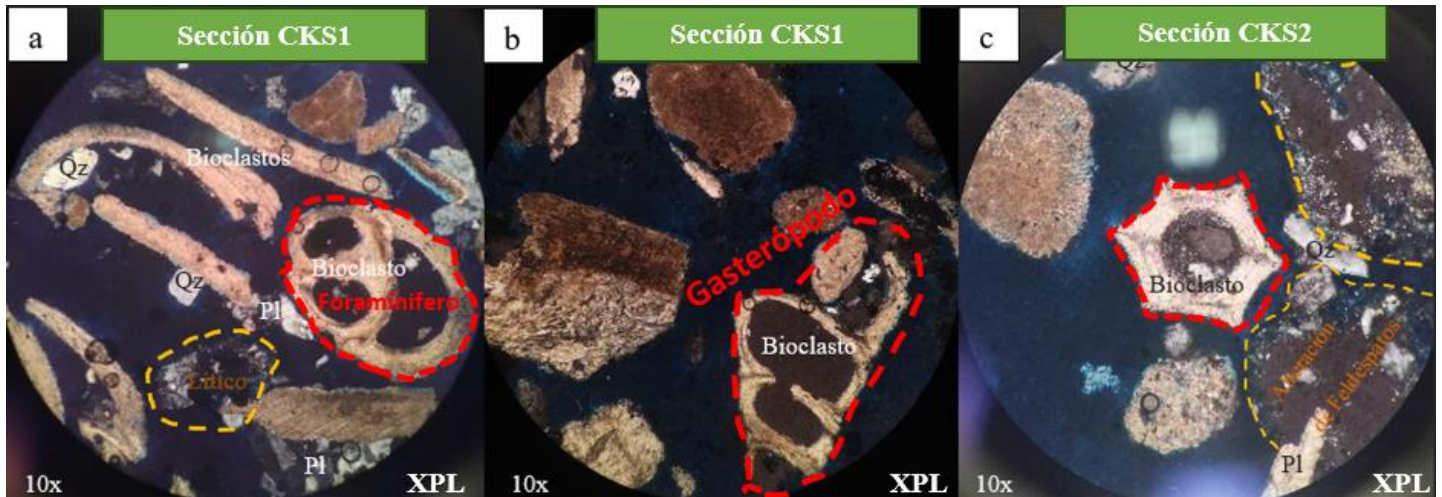
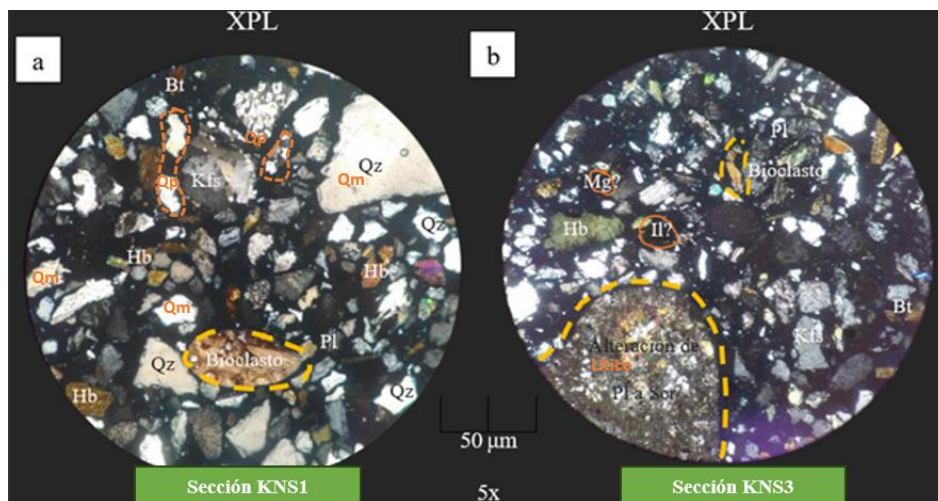


Figura 31

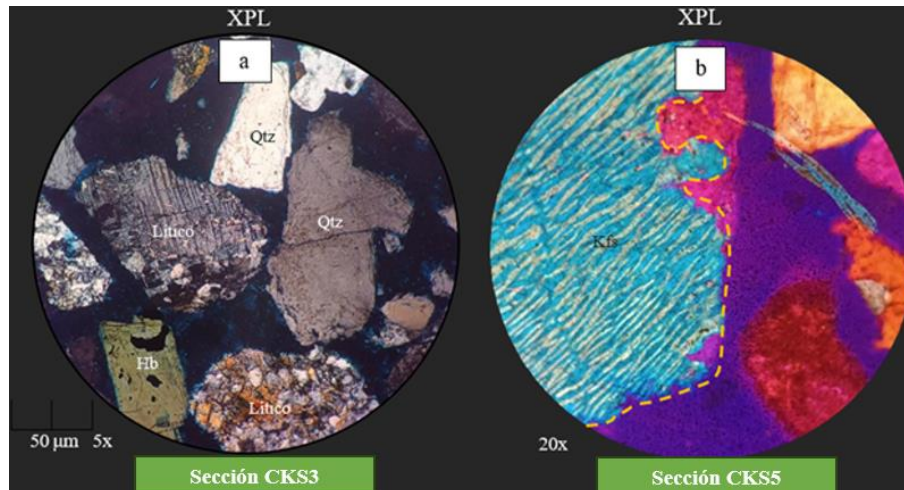
Secciones delgadas Playa Cañaveral



Nota. Cuarzo (Qz) Cuarzo Policristalino (Qp) Cuarzo monocristalino (Qm), Plagioclasa (Pl) Horblenda (Hb), Moscovita (Ms).

Figura 32

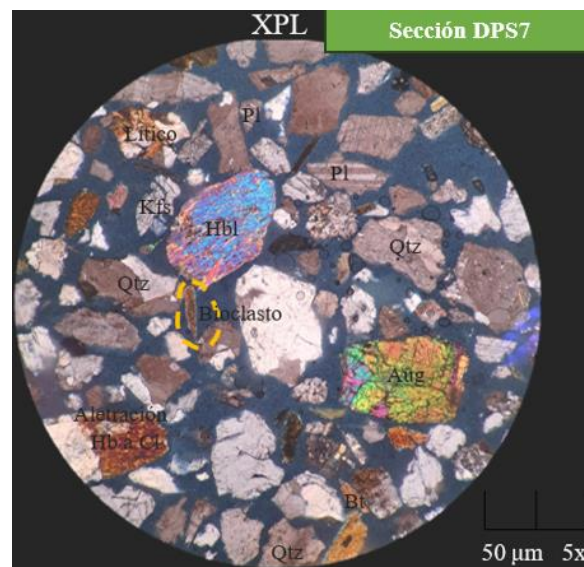
Secciones delgadas Playa Arrecifes



Nota. Cuarzo (Qtz), Feldespato potásico (K) Horblenda (Hb).

Figura 33

Sección delgada DPS 7, Ciénaga

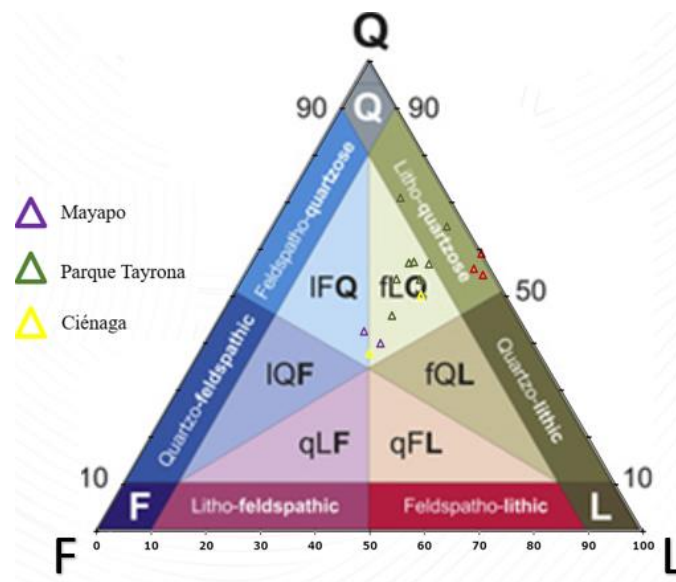


Nota. Cuarzo (Qtz) Plagioclasa (P), Feldespato potásico (Kfs) Horblenda (Hbl), Biotita (Bt) Augita (Aug).

Posterior al conteo, se realizó el recálculo de los componentes principales: Cuarzo total (Q), Feldespatos (P y K) y Líticos totales (Lv, Ls, Lm y Lp). Este procedimiento tuvo como objetivo clasificar las muestras composicionalmente según el esquema propuesto por Garzanti, E. (2016), el cual permite analizar rocas detríticas en función de la proporción de estos componentes. La clasificación se basa en el diagrama triangular (QFL), el cual que ayuda a determinar la procedencia de los sedimentos y a inferir los procesos tectónicos y paleoambientales asociados a su formación. Cabe destacar que esta metodología se aplicó únicamente a aquellas muestras que presentaron menos de la mitad de los componentes biogénicos, ya que el esquema de Garzanti, E. (2016), está diseñado específicamente para rocas con predominio de componentes detríticos (Figura 34).

Figura 34

Diagrama QFL Clasificación Garzanti, E. (2016)



Nota. Adaptado de "From static to dynamic provenance analysis—sedimentary petrology upgraded", por E. Garzanti, 2016, *Sedimentary Geology*, 336, 3-13.

A continuación, se muestran los resultados (Tabla 10) de la clasificación de las muestras de Mayapo, El Parque Tayrona y Ciénaga (Muestras < 50% de componentes carbonatados) en la siguiente tabla:

Tabla 10

Clasificación Garzanti, E. (2016)

Cód Muestra	Nombre	Composición (Garzanti, 2016)
CKS1	Salar Mayapo 1	feldespato-Lítico-Cuarzosa y
CKS2	Salar Mayapo 2	lítico-Feldespato-Cuarzosa
KNS1	Cañaveral Backshore	
KNS2	Cañaveral Foreshore	
KNS3	Cañaveral Berma	
KNS4	Cañaveral Washzone	
KNS5	Piscinita Foreshore	Lito-cuarzosa y feldespato-
CKS3	Arrecifes Backshore	Lítico-Cuarzosa
CKS4	Arrecifes Foreshore	
CKS6	Arrecifes Washzone	
KNS 6	Arenilla Backshore	
DPS7	Ciénaga Canal de Marea	lítico-Feldespato-Cuarzosa y
DPS8	Ciénaga Washzone	feldespato-Lito-Cuarzosa

Una clasificación feldespato-lítico-cuarzosa indica una proporción significativa de feldespatos y líticos, junto con cuarzo. Lo cual, se puede pensar que los sedimentos provienen de áreas fuente con rocas ígneas o metamórficas, como arcos volcánicos o zonas de colisión, donde la erosión de estas rocas es intensa (Garzanti, E., 2016).

Por otro lado, la clasificación lítico-feldespato-cuarzosa muestra un predominio de líticos sobre feldespatos y cuarzo. Esto sugiere una procedencia mixta, con aportes de rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas, típica de ambientes tectónicamente activos, como cinturones montañosos o zonas de subducción (Garzanti, E., 2016).

Finalmente, la clasificación lítico-cuarzosa se caracteriza por un alto contenido de líticos y cuarzo, con escasos feldespatos. Lo que indica que los sedimentos provienen principalmente de rocas sedimentarias o metamórficas ricas en cuarzo, como en cuencas de antepaís o áreas cratónicas (Garzanti, E.,2016).

Por otra parte, las muestras del Cabo de la Vela, que presentaron más del 50% de componentes carbonatados, se realizó una clasificación siguiendo el esquema propuesto por Folk (1974), identificándolas como Arenas calcáreas. Esta clasificación indica que las muestras están compuestas predominantemente por partículas de origen carbonatado.

Las arenas calcáreas suelen formarse en ambientes marinos poco profundos, como plataformas carbonatadas, arrecifes o lagunas costeras, donde organismos como corales, moluscos y algas contribuyen significativamente a la acumulación de carbonatos (Folk, R. L., 1974; Flügel, E., 2010). Además, este tipo de sedimento puede experimentar procesos diagenéticos, como compactación y cementación, que eventualmente dan lugar a la formación de rocas carbonatadas más consolidadas, como calizas o areniscas calcáreas (Tucker, M. E., 2001).

7.4.3 *Análisis de Laboratorio*

A continuación, se presentan los resultados de los análisis de laboratorio TC y TOC en % de masa para las muestras analizadas (Tabla 11).

Tabla 11
Resultados de análisis de TC y TOC

Muestra	Nombre	Estación	# Análisis TOC	TC %	TOC %
DPS1	Cabo Backshore		1	66.78	0.100
DPS2	Cabo Foreshore		2	63.36	0.097
DPS3	Cabo Berma	Estación 1	3	73.19	0.087
DPS4	Cabo Washzone		4	57.82	0.072
DPS5	Cabo Plataforma 1		5	79.3	0.114
DPS6	Cabo Plataforma 2		6	77.06	0.254
CKS1	Salar Mayapo 1	Estación 2	7	44.64	0.153
KNS1	Cañaveral Backshore		8	0.160	0.074
KNS2	Cañaveral Foreshore	Estación 3	9	0.187	0.064
KNS3	Cañaveral Berma		10	0.151	0.058
KNS4	Cañaveral Washzone		11	0.424	0.062
KNS5	Piscinita Foreshore	Estación 4	12	0.225	0.225
CKS3	Arrecifes Backshore		13	0.126	0.063
CKS4	Arrecifes Foreshore	Estación 5	14	0.266	0.060
CKS5	Arrecifes Berma		15	0.064	0.064
CKS6	Arrecifes Washzone		16	0.140	0.062
KNS 6	Arenilla Backshore	Estación 6	17	0.252	0.051
KNS7	Arenilla Washzone		18	0.120	0.120
DPS7	Ciénaga Canal de Marea	Estación 7	19	0.160	0.160
DPS8	Ciénaga Washzone		20	0.116	0.116

Los resultados de los análisis de Carbono Total (TC) realizados en las muestras son consistentes con los hallazgos presentados en la composición de los sedimentos en la sección de análisis de secciones delgadas. En el Cabo de la Vela (muestras DPS1-DPS6), los sedimentos se componen mayoritariamente de materiales carbonatados, lo que también se observa en la muestra de Mayapo (CKS1).

Por el contrario, las muestras provenientes de las zonas del Parque Tayrona y Ciénaga presentan valores de carbono total muy bajos, todos inferiores al 1%, evidenciando que estas arenas se derivan de cuerpos rocosos en sílice y pobres en carbonatados (Tabla 11).

Con respecto a los valores del TOC se observó que todos los sedimentos analizados presentan valores inferiores a 0.6 (Tabla 11) lo que indica un bajo porcentaje de materia orgánica en su composición.

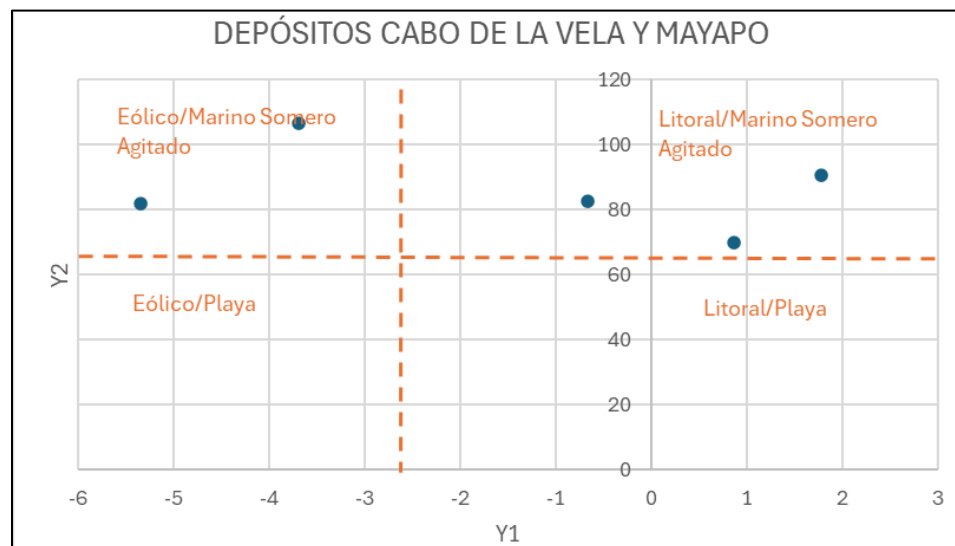
8 Interpretación de resultados

8.1 Transporte de los sedimentos

Para esta interpretación se tomaron los valores del análisis granulométrico y se realizaron los cálculos con las fórmulas según Sahu, B. K. (1963) como se indicó en la Metodología. Se tuvieron en cuenta los factores geomorfológicos y batimétricos de las zonas de estudio descritas para la determinación de las fórmulas a utilizar.

Figura 35

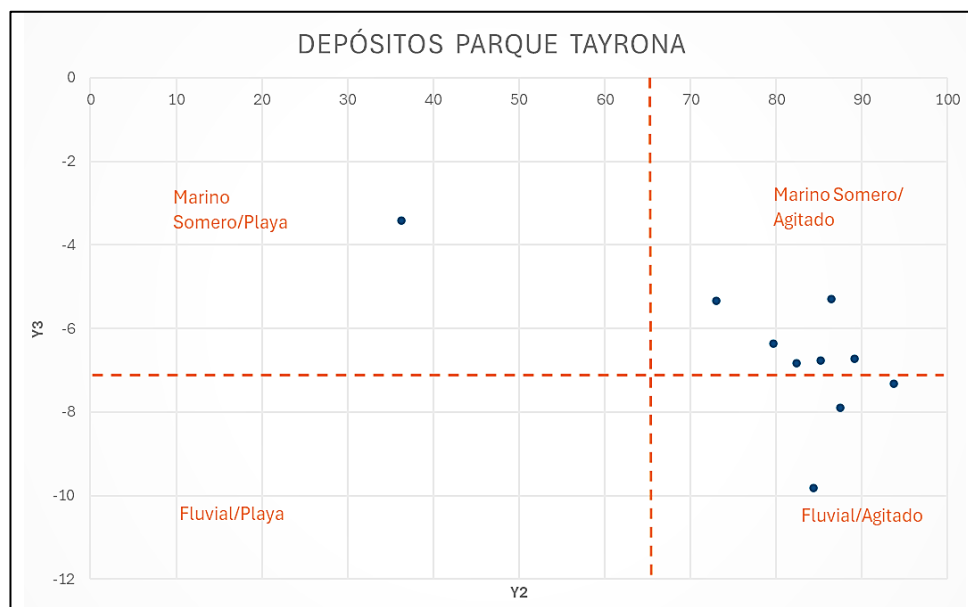
Transporte de los sedimentos Cabo de la Vela y Mayapo



Para Cabo de la Vela, se utilizaron las funciones Y1 y Y2, se evidenció un transporte eólico para Backshore y el Foreshore (DPS1 y DPS2), en combinación con transporte marino-somero. Por otro lado, la Berma y el Washzone (DPS3 y DPS4) se orientaron más hacia procesos marino-someros y litorales (Figura 35). Estas últimas tendencias se presentaron también en Mayapo (CKS1).

Figura 36

Transporte de los sedimentos de los depósitos del Parque Tayrona

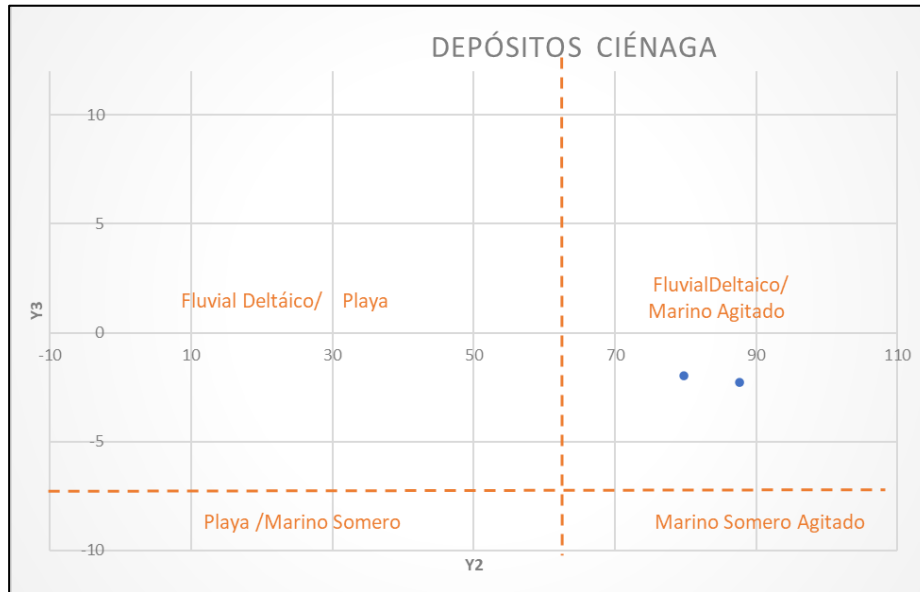


Por otro lado, para las playas del Parque Tayrona se aplicaron las funciones Y₂ y Y₃ (Figura 36), destacándose que la mayoría de los sedimentos son transportados por procesos marino somero-agitados. Sin embargo, se observaron variaciones en algunas muestras, como en el Backshore de Arrecifes (CKS3), en la cual se observan aportes combinados de transporte marino-someros y procesos litorales. Asimismo, las muestras de Arrecifes Foreshore (CKS4), Cañaveral

Backshore (SKN1) y Cañaveral Foreshore (SKN2) presentan una influencia de transporte fluvial-deltaicos junto con procesos marino somero-agitados.

Figura 37

Transporte de los sedimentos Ciénaga



Por último, las muestras de la zona de Pueblo Viejo, Ciénaga, evidenció un transporte fluvial deltaico y de procesos marino somero-agitados (Figura 37), esto podría ser posible a la localización de los puntos donde se recolectaron: Canal de Marea (DPS7) y Playa Cercana al Canal (DPS8).

8.2 Análisis de procedencia

Para el análisis de procedencia, se utilizaron los datos obtenidos del conteo y la reclasificación **QFL** (Cuarzo, Feldespatos, Líticos) (Tabla 12) derivados del análisis de secciones delgadas, siguiendo el esquema composicional propuesto por Garzanti, E. (2016).

Tabla 12

Criterios para la Clasificación del Ambiente tectónico de proveniencia

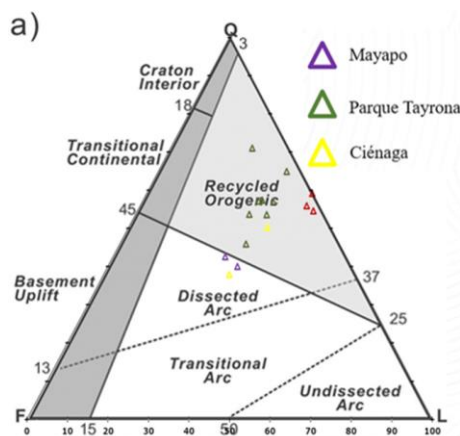
$Q = Q_m + Q_p$	Donde	Q= Total de granos de cuarzo Q _m = Granos de cuarzo monocristalino Q _p = Granos de cuarzo policristalino
$F = P + K$	Donde	F= Granos totales de feldespato P= Granos de feldespato tipo plagioclasa K= Granos de feldespato potásico
$L_t = L + Q_p$	Donde	L _t = Total de granos policristalinos L= Fragmentos Líticos

Nota. Adaptado de "Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones", por W. R. Dickinson, 1985, Geological Society of America Bulletin, 94(2), p. 222-235.

A estos datos se les aplicó la clasificación de Dickinson, W.R. (1985), la cual permite identificar el ambiente tectónico de proveniencia de los clastos. Esta clasificación es una herramienta fundamental para interpretar la procedencia de los sedimentos y determinar el ambiente tectónico de las áreas fuente, como arcos volcánicos, cuencas de antepaís o márgenes continentales (Dickinson, W.R., 1985) (Figura 38).

Figura 38

Diagrama QFL Clasificación Bloque Tectónico



Nota. Adaptado de "Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones", por W. R. Dickinson, 1985, Geological Society of America Bulletin, 94(2), p. 222-235.

A continuación, se presentan en la Tabla 13 los ambientes paleotectónicos de las muestras analizadas:

Tabla 13

Clasificación Dickinson, W. R. (1985) Muestras de estudio

CKS1	Salar Mayapo 1	Arco disectado
CKS2	Salar Mayapo 2	
KNS1	Cañaveral Backshore	Orógeno reciclado
KNS2	Cañaveral Foreshore	
KNS3	Cañaveral Berma	
KNS4	Cañaveral Washzone	
KNS5	Piscinita Foreshore	
CKS3	Arrecifes Backshore	
CKS4	Arrecifes Foreshore	
CKS6	Arrecifes Washzone	
KNS 6	Arenilla Backshore	
DPS7	Ciénaga Canal de Marea	
DPS8	Ciénaga Washzone	Orógeno reciclado

En este estudio, la aplicación de la clasificación de Dickinson evidenció la presencia de sedimentos asociados a arcos disectados en la zona de Mayapo y Ciénaga, caracterizados por un alto contenido de líticos (L) y feldespatos (F), lo que sugiere la erosión de un arco volcánico antiguo (Dickinson, W. R. 1985). Además, se identificaron sedimentos provenientes de orógenos reciclados en el Tayrona y también en la zona de Ciénaga, los cuales se caracterizan por estar dominados por cuarzo (Q) y líticos (L) lo que indica el retrabajamiento de cinturones montañosos o cuencas sedimentarias previas (Dickinson, W. R., 1985).

Por último, hay que recordar que los sedimentos de la estación Cabo de la Vela se clasificaron según Folk, R. L. (1974) como arenas calcareas, las cuales pueden originarse por la

precipitación directa de carbonato de calcio en aguas supersaturadas o mediante la actividad de organismos como corales, moluscos y algas calcáreas, que secretan esqueletos o conchas de carbonato de calcio (Flügel, E., 2010; Tucker, M. E., 2001). Los ambientes típicos de formación incluyen arrecifes coralinos, lagunas costeras y plataformas carbonatadas, donde la acumulación de partículas carbonatadas es favorecida por condiciones de alta productividad biológica y estabilidad química (Flügel, E., 2010). Además, las arenas calcáreas pueden sufrir procesos de fragmentación y transporte, lo que contribuye a su distribución en áreas cercanas a las zonas de origen (Tucker, M. E., 2001).

8.3 Tasas de erosión y sedimentación o acreción de la costa

Estas tasas son fundamentales para entender la dinámica costera, predecir cambios en la línea de costa y diseñar estrategias de manejo costero frente a fenómenos como el aumento del nivel del mar o las tormentas (Moore, L. J., 2000; Murray, A. S., & Olley, J. M., 2002).

Para Mayapo, el promedio de retroceso en la línea de costa fue de 73 m comparando las líneas de playa entre los años 1995 y 2023 el cálculo siguiente resultados:

$$Erosión = \frac{73}{28} = 2,60 \text{ m/año}$$

La erosión costera en Mayapo, ha sido una preocupación creciente en los últimos años. Este fenómeno ha afectado significativamente las playas locales, poniendo en riesgo tanto el ecosistema como las actividades económicas de la región, especialmente el turismo y la pesca (Eliana Mejía; Periódico EL TIEMPO, 2023).

La erosión ha reducido considerablemente la franja de arena entre el mar y las áreas habitadas, acercando las olas a las viviendas y establecimientos comerciales (Eliana Mejía; Periódico EL TIEMPO., 2023). Según informes, las olas han llegado hasta las casas, afectando a más de 5,000

familias que dependen directamente de estas actividades (Eliana Mejía; Periódico EL TIEMPO., 2023)

El aumento en el volumen de las salinas y ciénagas costeras, también se encuentra favorecido por la erosión y el aumento en el nivel del mar, las salinas se forman en ambientes donde la evaporación del agua supera la entrada de agua nueva, permitiendo que se acumulen sales y otros minerales (Warren, J.K., 2006).

De forma que son comunes en áreas cercanas al mar donde el agua salada queda atrapada en depresiones o lagunas aisladas. La evaporación elimina el agua, dejando atrás las sales disueltas. (Warren, J. K., 2006).

En términos geomorfológicos, la línea costera de Mayapo se caracteriza por ser un área muy baja y deprimida, frecuentemente expuesta a los cambios intermareales, es decir, a las variaciones periódicas del nivel del mar durante las mareas altas y bajas, Sumado a la constante erosión costera, especialmente en zonas de litoral, puede aislar lagunas costeras mediante la formación de barras de arena, limitando el ingreso de agua nueva y promoviendo la evaporación.

Por otra parte, en Ciénaga, se estima que entre 1990 y 2023, aproximadamente entre el 60-70% de los manglares en la zona han desaparecido, principalmente debido a la pérdida de hábitat y la alteración de los flujos hídricos debido a la erosión costera (Zamora Quiroga, D., & Patiño Giraldo, J., 2022).

Los valores obtenidos en el análisis en la zona de la playa de ciénaga se estimaron en una pérdida de 10m del año 2005 al 2014:

$$Erosión = \frac{10}{9} = 1,1 \text{ m/año}$$

En la playa de Ciénaga, el uso de escolleras ha sido muy efectivo para prevenir la erosión, al reducir el impacto de las olas y estabilizar el terreno. Estas estructuras han protegido tanto las infraestructuras como los ecosistemas costeros, manteniendo su efectividad a lo largo del tiempo y evitando la pérdida de sedimentos y arena, esto se evidenció al comparar la línea costera entre los años 2014-2017 y 2024 en los Análisis multitemporales.

Por otro lado, en este estudio se evidenció que la erosión costera a lo largo de la Troncal del Caribe se debe a una combinación de factores naturales y actividades humanas. Entre las causas naturales destacan el impacto constante de las olas y corrientes marinas, el aumento del nivel del mar relacionado con el cambio climático, y la disminución del aporte de sedimentos desde ríos como el Magdalena, fundamental para la regeneración de las playas.

En la playa Piscinita en el Parque Tayrona, también se evidenció un fenómeno erosivo en los últimos años, el total de retroceso en la línea de costa de fue 21 m en un periodo de 21 años del 2002 al 2023:

$$Erosión = \frac{21}{21} = 1 \text{ m/año}$$

La erosión en playas de morfología intermedia como La Piscinita se cree según el análisis multitemporal que se debe factores como la deficiencia de sedimentos y las intervenciones humanas, como las infraestructuras costeras, también aceleran este proceso (Short, A., & Jackson, D., 2013).

Las playas que no presentan erosión sino, estabilidad o acreción según lo establecido en el análisis multitemporal son las siguientes: Cabo de la Vela, Cañaveral, Arenilla y Arrecifes.

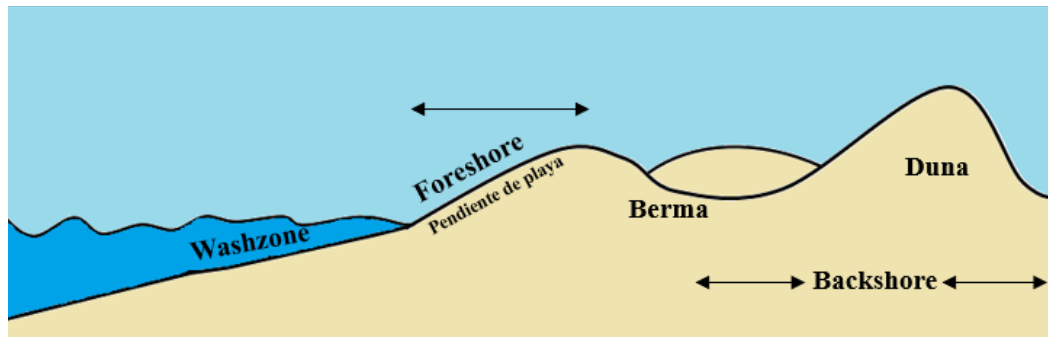
En el Cabo de la Vela en promedio se obtuvo una erosión de 3 metros (m) desde 1995 al 2023, a continuación, el cálculo de la tasa de erosión fue el siguiente:

$$Erosión = \frac{3}{28} = 0,107 \text{ m/año}$$

Se evidenció la estabilidad en esta playa al tener una tasa de erosión de 0,107 m/ año en este periodo de tiempo, siendo casi despreciable este comportamiento erosivo, esto podría tener relación con: los perfiles disipativos son característicos de playas como El Cabo de la Vela, estas Playas están compuestas por arena fina y/o que están expuestas a altos niveles de energía. Normalmente, la berma no es visible, y el perfil comienza prácticamente en la base de la duna o en el acantilado, dependiendo del caso (Figura 39) (MITECO, 2018). Este tipo de perfil presenta una amplia zona de rompientes, con un talud ligeramente cóncavo y pendientes suaves, sin estructuras destacadas (MITECO, 2018).

Figura 39

Perfil de la playa Cabo De La Vela



Nota. Adaptado de "Informe campo 3: Ciénaga y Cabo de la Vela", por D. Gutiérrez, et al., 2023.

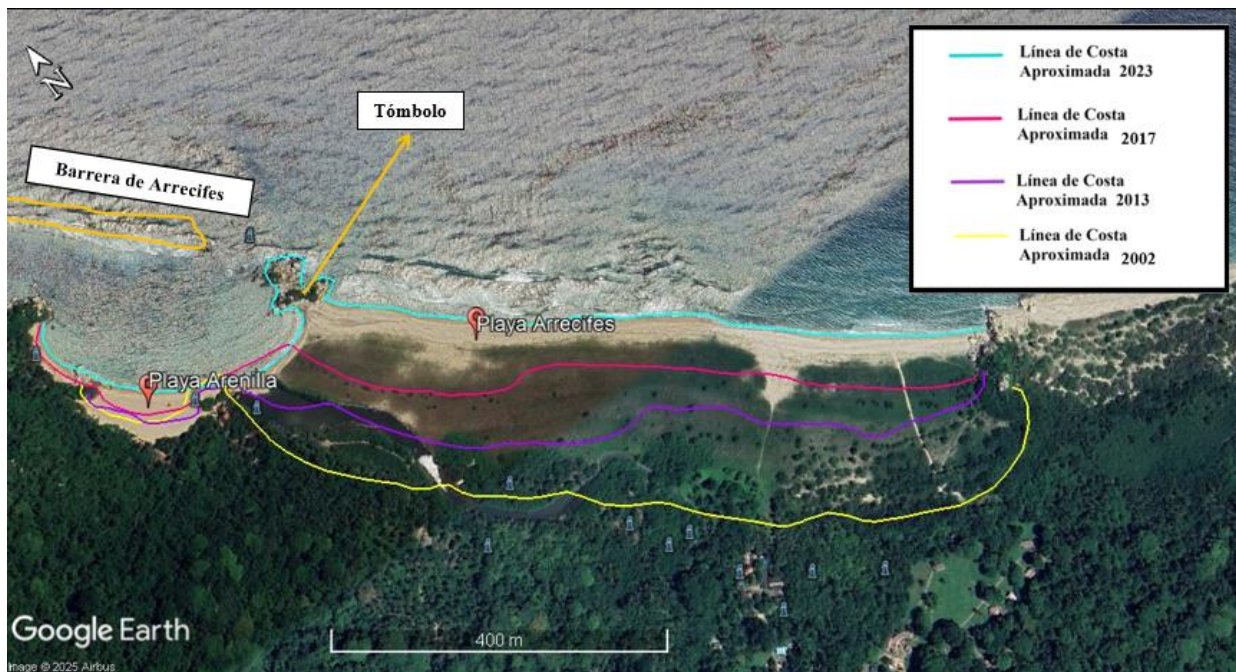
Las dunas en La Playa de Cabo de la Vela actúan como una primera línea de defensa, protegiendo las áreas interiores de la playa y el litoral de la fuerza de las olas y el viento. Al absorber parte de la energía del oleaje, reducen el impacto directo sobre las playas y ayudan a prevenir el retroceso de la línea costera lo que ha permitido la estabilización del litoral (MITECO,2018).

Por otra parte, el comportamiento extensional de las Playas Arenilla y Arrecifes, según el Análisis multitemporal realizado, se debe a la formación de estructuras como un tómbolo (Figura 40). Estas geoformas se crean cuando los sedimentos depositados por las olas y corrientes conectan una isla con la costa (MITECO, 2018).

Además, de la proliferación de una barrera arrecifal (Figura 40). Esta estructura estabiliza la playa al reducir la energía de las olas, disminuyendo la erosión y favoreciendo la acumulación de sedimentos, lo que contribuye a la protección y extensión de las playas (MITECO 2018).

Figura 40

Línea de Costa (2002-2023) Playas Arrecifes y Arenilla



Esto también se evidenció en el cálculo de la tasa de sedimentación desde el 2002 al 2023, el cual se muestra a continuación:

$$\text{Sedimentación o Acreción} = \frac{101}{21} = 4,8 \text{ m/año}$$

La playa Cañaveral, también ha experimentado un proceso de acreción (2013-2023) después de un periodo de erosión (2003-2013).

$$\text{Sedimentación o Acreción} = \frac{10}{10} = 1 \text{ m/año}$$

No se identificó algún factor causante en los análisis multitemporales como la modificación de un cauce fluvial o la formación de alguna estructura de protección natural o artificial (Figura 41).

Sin embargo, se podría sugerir la primera causa (cambio en el cauce fluvial) debido a que del río Cañaveral llega al Backshore de esta Playa (Figura 42) (Manzoli, R. P., et al., 2020).

Figura 41

Línea de Costa (2003-2023) Playa Cañaveral



Figura 42

Principales ríos con aportes en el área de estudio Parque Tayrona



Nota. Tomado de "*Magnitude and causes of beach accretion on the eastern margin of the Tayrona National Natural Park (Colombian Caribbean)*", por R. P. Manzolli, L. et al., 2020, *Journal of Coastal Research*, 299–303.

En general, el mapa elaborado por Manzolli, R. P. et al. (2020) de la cuenca hidrográfica en la zona del Parque Tayrona proporciona un apoyo adicional al estudio realizado. A partir de este mapa, se puede afirmar que el Río 2, mostrado en la Figura 42, corresponde al mismo cauce fluvial identificado en el análisis de las playas Arrecifes y Arenilla. Este río desempeña un papel clave en el transporte de sedimentos hacia la costa, lo que explicaría la tendencia a la sedimentación observada en estas playas durante la última década. Por otro lado, el Río Cañaveral estaría estrechamente relacionado con el aporte constante de sedimentos a la playa Arenilla, lo que ha favorecido el crecimiento de esta playa debido a la acumulación de nuevo material. En contraste,

se evidencia la ausencia de un flujo fluvial significativo hacia la playa La Piscinita, lo que reduce la fuente de sedimentos y contribuye a los procesos de erosión observados en esta zona.

9 Discusión de resultados

9.1 Batimetría

Rangel- Buitrago, N., et al. (2010) sugiere cuatro (4) zonas con dinámicas diferentes para el Caribe colombiano, de las cuales tres (3) de estas se pueden comparar con los resultados obtenidos en el análisis batimétrico realizado (La Guajira, El Tayrona y el Delta del Río Magdalena)

Figura 43

Mapa de las 4 zonas con dinámicas distintas del Caribe Colombiano



Nota. Tomado de "Geología general, morfología submarina y facies sedimentarias en el margen continental y los fondos oceánicos del mar Caribe colombiano", por N. Rangel-Buitrago, et al., 2010, Biodiversidad del Margen Continental del Caribe colombiano (pp. 29-51). INVEMAR.

Se establece que la plataforma continental de La Guajira tiene un ancho que varía entre 8 y 30 km, terminando entre los -90 y -130 m de profundidad, donde su pendiente aumenta gradualmente, formando el talud continental (Rangel- Buitrago, N., et al., 2010).

En la zona comprendida entre Riohacha y Cabo de la Vela es en la que se encuentra la Plataforma continental más extensa, acá los niveles de carbonato de calcio son más elevados y predominan las arenas y lodos bioclásticos (Rangel- Buitrago, N., et al., 2010). En este tramo la plataforma es mayormente plana, pero con una ligera inclinación que se acentúa en la zona del talud. A medida que se aleja de la costa, la plataforma se vuelve más empinada, especialmente hacia el norte, en las proximidades del Cabo de la Vela (Posada, P., et al., 2008).

El área en frente al Tayrona se caracteriza por la ausencia de una verdadera plataforma continental, presentando en su lugar un talud que se encuentra muy cerca de la costa, con pendientes pronunciadas y variables que van de 2° a 18° (Rangel- Buitrago, N., et al., 2010). Este talud está interrumpido por valles angostos y cañones que se orientan tanto de forma oblicua como perpendicular a la costa (INVEMAR, 2010). Uno de los sectores destacados es el Cañón de La Aguja que se extiende desde los -70 m frente al río Mendihuaca a lo largo de 100 km, alcanzando una profundidad de -3500 m (INVEMAR, 2010). La sedimentación en esta área es principalmente terrígena, derivada de los materiales sedimentarios que provienen del macizo montañoso de la Sierra Nevada de Santa Marta y se observa una amplia dominancia de la facie lodo arenolitoblioclástico en la plataforma continental (Rangel- Buitrago, N., et al., 2010).

Por último, en sector del delta del Magdalena presenta una plataforma estrecha en la zona de Barranquilla de menos de 2 km, lo que provoca que gran parte de la carga sedimentaria que transporta el río se deposite directamente sobre el talud continental (Rangel- Buitrago, N., et al.,

2010). En esta zona, predominan los sistemas de flujo, como canales y cañones, que se originan en la plataforma y se extienden hasta la parte inferior del talud, lo que favorece la formación de corrientes turbídicas (INVEMAR, 2010). En cuanto a las características sedimentológicas, los sedimentos que predominan son detríticos, con una mezcla de lodos y arenas finas (Rangel-Buitrago, N., et al., 2010).

En la zona central de la plataforma, frente a la Ciénaga Grande de Santa Marta, se extiende hasta los 16 km en las isóbatas de -20 m y -30 m, se encuentra un área de arenas litobioclásticas y bioclásticas, que están formadas por fragmentos de corales, esponjas, algas, briozoos, poliquetos y balánidos. (INVEMAR, 2010).

9.2 Procedencia de los sedimentos

Los resultados del análisis de procedencia y transporte de sedimentos permitieron establecer las siguientes características para las distintas zonas de estudio:

9.2.1 Cabo de la Vela

La composición de las arenas en el Cabo de la Vela está dominada principalmente por la descomposición y precipitación in situ de material bioclástico, mientras que los sedimentos terrígenos representan una proporción significativamente menor (CIOH, 1999; Rangel-Buitrago, N., et al., 2010). Además, se han identificado aportes de material bioclástico degradado proveniente de profundidades entre 30 y 45 metros en la plataforma continental (Romero, J., 2006). La meteorización de las formaciones rocosas, incluyendo serranías y acantilados expuestos a condiciones climáticas extremas, contribuye a la disponibilidad de sedimentos, los cuales son redistribuidos por la acción del viento y las corrientes marinas, influyendo en la dinámica sedimentaria de la zona (Posada, P., et al., 2008).

9.2.2 Zona costera entre Riohacha y Manaure (Mayapo)

En la zona costera entre Riohacha y Manaure, donde se encuentra Mayapo, las corrientes marinas transportan sedimentos movilizados por olas que pueden alcanzar alturas de hasta 2.8 metros durante la temporada de huracanes (Aqua y Terra, 2006). El río Ranchería, que nace en el cerro La Horqueta de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), desempeña un papel crucial en el aporte de sedimentos terrígenos provenientes del interior del continente (Aqua y Terra, 2006). La SNSM está compuesta principalmente por rocas plutónicas del Cretácico-Paleoceno, asociadas a un antiguo arco magmático, y contiene terrenos alóctonos acrecionados durante el Cretácico y el Paleógeno (Cardona, A., et al., 2011; Weber, M., et al., 2009). Más del 90% de los sedimentos carbonatados en la zona provienen de algas rojas y otras comunidades bióticas que habitan en ambientes costeros, lo que refleja la importancia de los procesos biogénicos en la formación de estos sedimentos (Javelaud, O., 1987; Romero, J., 2006).

9.2.3 Sector de Mendihuaca-La Ensenada (Parque Tayrona)

El sector de Mendihuaca-La Ensenada en el Parque Tayrona está conformado por acantilados de rocas ígneas que pertenecen al Complejo Esmb-cd (Colmenares, F. H., et al., 2008). En esta zona, las playas estrechas ubicadas al pie de los escarpes están sujetas a una constante erosión causada por la acción de las mareas, las cuales transportan los sedimentos erosionados hacia las playas adyacentes (Posada, P., et al., 2008). Además, el desprendimiento de bloques rocosos es favorecido por el alto grado de dislocamiento de las rocas y la escorrentía, lo que sugiere un transporte fluvial y aluvial significativo en la zona (Posada, P., et al., 2008). Geológicamente, la Sierra Nevada de Santa Marta, que influye en la dinámica sedimentaria de la región, está compuesta por rocas plutónicas del Cretácico-Paleoceno asociadas a un antiguo arco magmático

(Cardona, A., et al., 2011). Esta formación también contiene terrenos alóctonos acrecionados durante el Cretácico y el Paleógeno (Weber, M., et al., 2009), lo que indica que se trata de un orógeno reciclado, es decir, una estructura montañosa formada por la erosión y retrabajamiento de materiales preexistentes.

9.2.4 Sistema lagunar deltaico del Magdalena

Los sedimentos del sistema lagunar deltaico del Magdalena son transportados por acción litoral y fluvial desde la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) hasta la Ciénaga Grande, a través del drenaje occidental del sistema montañoso (Restrepo, J. D., 1996). Las principales fuentes de sedimentos incluyen el río Magdalena, la Sierra Nevada de Santa Marta y depósitos cuaternarios marinos. La mineralogía de estos sedimentos indica un origen cercano, con presencia de hornblenda, plagioclasa y minerales metamórficos provenientes de la SNSM, los cuales son aportados principalmente por los ríos Sevilla, Aracataca y Fundación (Restrepo, J. D., 1996). La composición geológica de la SNSM, caracterizada por rocas plutónicas del Cretácico-Paleoceno asociadas a un antiguo arco magmático (Cardona, A., et al., 2011), explica la clasificación de "Arco disectado" en el análisis de procedencia. Además, la presencia de terrenos alóctonos acrecionados durante el Cretácico y el Paleógeno (Weber, M., et al., 2009) está relacionada con "Orógenos reciclados".

9.3 Dinámica costera

Los resultados obtenidos de los cálculos de las tasas de erosión y sedimentación costera se compararon con el estudio "**Amenaza y vulnerabilidad por erosión costera en Colombia: enfoque regional para la gestión del riesgo**" realizado por Ricaurte Villota, et al. (2018) para el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR). Este trabajo evalúa el riesgo de

amenaza por erosión en la línea de costa a nivel departamental, proporcionando una visión regional de los procesos erosivos y su impacto en las zonas costeras. A partir de esta comparación, se sintetizó la información relevante para las áreas de estudio en la Tabla 14, lo que permitió contextualizar los resultados locales dentro de un marco regional y validar las tendencias observadas en las tasas de erosión y sedimentación.

Tabla 14

Características Nivel de amenaza por erosión costera en la costa caribe

Zona	Índice de erosión	Tipo de Oleaje	Ocurrencia de la erosión	Nivel de Amenaza	Tamaño de Grano	Morfología
Ciénaga	0.51-1m/año	Oleaje Directo	Pasado	Media	Arena fina	Reflectiva
Playa Arenilla	< 0.5 m/año	Con obstáculos	Futuro	Media	Arena media	Intermedia
Arrecifes	Estabilidad	Oleaje Directo	Pasado	Media	Arena media	Reflectiva
Cañaveral	< 0.5 m/año	Oleaje Directo	Pasado	Media	Arena media	Reflectiva
Piscinita	< 0.5 m/año	Oleaje Directo	Futuro	Media	Arena media	Intermedia
Mayapo	> 1 m/año	Oleaje Directo	Presente	Alta	Arena fina	Reflectiva
Cabo de la vela	> 1 m/año	Oleaje Indirecto	Pasado	Media	Arena fina	Disipativa

Nota. Tabla elaborada con información de Tomado de "Amenaza y vulnerabilidad por erosión costera en Colombia: enfoque regional para la gestión del riesgo", por Ricaurte Villota, M. E., et al., 2018, INVEMAR.

Ricaurte Villota, et al. (2018) establece un índice de erosión > 1 m/año para Mayapo, indicando una ocurrencia presente y un nivel de amenaza alto. En los resultados obtenidos en este estudio, se calculó una tasa de erosión de 2,60 m/año, la cual confirma que el umbral establecido Ricaurte Villota, et al. (2018). Además, las inundaciones frecuentes y las crecidas constantes del nivel del mar durante fenómenos como el mar de leva representan una amenaza significativa para la población local, lo que refuerza la clasificación de amenaza alta en esta zona.

En la zona de Ciénaga, Ricaurte Villota, et al. (2018) reportan un índice de erosión de 0.5-1 m/año en 2018, con una ocurrencia en el pasado. Los datos obtenidos en este estudio son

consistentes con estos valores, ya que se calculó una tasa de erosión de 1.1 m/año antes de 2018. Posteriormente, esta zona ha experimentado una tendencia hacia la acreción y la sedimentación de material, lo que puede atribuirse a la implementación de mecanismos de mitigación contra la erosión costera, como estructuras de protección y manejo integrado de la zona litoral.

Para la zona de Playa Piscinita, Ricaurte Villota, et al. (2018) establecen una ocurrencia de erosión futura y un índice < 0.5 m/año. Estos datos son congruentes con los resultados obtenidos en este estudio ya que existe el fenómeno erosivo. Sin embargo, se calculó un índice de erosión de 1 m/año en la zona mayor hasta el 2023 el cual es mayor al previsto por el estudio. Este aspecto refuerza la proyección de erosión futura y sugiere que la playa está en riesgo de sufrir procesos erosivos significativos en los próximos años debido a la actividad turística.

Por último, las playas de Cañaveral, Arenilla y Cabo de la Vela presentan, según Ricaurte Villota, et al. (2018), una ocurrencia de erosión en el pasado. Estas dinámicas se reflejaron en el comportamiento actual de las playas: en Cabo de la Vela, se observó una estabilidad con un índice de erosión de 0.107 m/año hasta 2023, mientras que en Cañaveral y Arenilla fue necesario calcular una tasa de sedimentación debido a la estabilidad alcanzada después de 2018, año en que se publicó el estudio de Ricaurte, Villota et al. (2018). Por otro lado, la Playa Arrecifes, descrita por Ricaurte Villota, et al. (2018) como una zona con comportamiento estable, también mostró esta tendencia en el análisis multitemporal realizado y en el cálculo de la tasa de sedimentación, confirmando su estabilidad a lo largo del tiempo.

10 Conclusiones

- Las tasas de erosión calculadas evidencian resultados similares a los reportados por INVEMAR, Ricaurte Villota, et al. (2018).
- Los sedimentos en el Cabo de la Vela (depósitos de playa) corresponden a fuentes bioclásticas, como la plataforma continental, y son transportados por las corrientes marinas y el oleaje.
- En Mayapo (Llanura de inundación y salares artificiales), los sedimentos salinos tienen un origen in situ producto de la formación de evaporitas, los clastos biogénicos están relacionados con ambientes de lagunas y pantanos también in situ y la plataforma continental donde los sedimentos son movilizadados por olas. Existe un componente terrígeno de la SNSM, transportado por el río Ranchería.
- Para las playas del Tayrona y ciénaga (depósitos de playa y barra espiga) la Fuente principal de los sedimentos está relacionado a los acantilados constituidos por el basamento expuesto como el Batolito de Santa Marta, los cuales son erosionados por la acción de las olas y son transportados por procesos litorales. También hay un aporte significativo de clastos de origen metamórfico transportados desde el interior de la SNSM por escorrentía superficial como el río Cañaveral para las playas del Tayrona y como el río Sevilla para ciénaga, además del aporte del río Magdalena desde el interior del continente para la zona de ciénaga que hace parte de su sistema lagunar deltaico.
- La erosión costera en la zona de Mayapo está influenciada por la morfología de las playas y la actividad antrópica. Se espera que las inundaciones de las mareas en periodos como el mar de leva sean cada vez más frecuentes si no se toman medidas para la mitigación de la erosión
- La acreción en las playas del Tayrona en playas como Arrecifes y Arenilla, el cambio en los cauces fluviales y la formación de geoformas como tómbolos han favorecido la acumulación de sedimentos. Además, la barrera arrecifal ha proporcionado una

protección natural contra el oleaje. Por otro lado, en la playa La Piscinita, la ausencia de aportes fluviales y el incremento de estructuras turísticas en su superficie podría acelerar los procesos erosivos.

- En la zona de Ciénaga, la acreción de sedimentos desde 2014 ha estado influenciada principalmente por factores antrópicos, como la instalación de mecanismos de control de erosión, incluyendo gaviones perpendiculares a lo largo de la playa. Estas estructuras han facilitado la sedimentación de clastos transportados por la acción del oleaje, los cauces fluviales y las corrientes marinas. Podría esperarse que estas playas alcancen pronto una estabilidad de la línea costera.

Referencias Bibliográficas

- Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). (s.f.). Cuenca Guajira: Contrastes entre alta y baja Guajira. Recuperado de https://www.anh.gov.co/documents/2777/Cuenca_Guajira_contrastes_entre_alta_y_baja_Guajira.pdf
- Allen, P. A., & Allen, J. R. (2013). Basin analysis: Principles and application to petroleum play assessment (3rd ed.). Wiley-Blackwell.
- Aqua y Terra Consultores Asociados S.A. (2006). Diseño de las obras de protección costera en la franja litoral de 1 kilómetro y medio, colindante con el lado occidental del espolón 1 ubicado en el casco urbano del municipio de Riohacha. Informe técnico, Corporación Minuto de Dios. Riohacha.
- Aza Jiménez, N. S., Sánchez García, S. M., & Zuñiga Guerrero, K. M. (2023). Informe campo 3: Playa Cañaveral, Playa La Piscinita y Playa Arenilla.
- Blott, S. J., & Pye, K. (2001). GRADISTAT: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11), 1237-1248. <https://doi.org/10.1002/esp.261>

- Boak, E. H., & Turner, I. L. (2005). Shoreline definition and detection: A review. *Journal of Coastal Research*, 21(4), 688-703. <https://doi.org/10.2112/03-0071.1>
- Boggs, S. (2014). *Principles of sedimentology and stratigraphy* (5th ed.). Pearson.
- Cardona, A., Montes, C., & Bayona. (2012). Tectonic controls on sedimentation in the Caribbean region of Colombia: Insights from the Tayrona Sub-basin. *Journal of South American Earth Sciences*, 37, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.02.004>
- Cardona, A., Valencia, V., Bayona, G., Duque, J., & Jaramillo, C. (2011). Early-subduction-related orogeny in the northern Andes: Turonian to Eocene magmatic and provenance record in the Santa Marta Massif and Ranchería Basin, northern Colombia. *Terra Nova*, 23(1), 26-34. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2010.00979.x>
- CIOH. (1999). Carta de repartición de facies sedimentarias. Escala 1:300000. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, Cartagena.
- Colmenares, F. H., Mesa, A. M., Roncancio, J. H., Arciniegas, E. G., Pedraza, P. E., Cardona, A., Romero, A. J., Silva, C. A., Alvarado, S. I., Romero, O. A., & Vargas, A. F. (2007). Geología de las planchas 11, 12, 13, 14, 18, 19, 20, 21, 25, 26, 27, 33, 34 y 40. Proyecto: Evolución geohistórica de la Sierra Nevada de Santa Marta. Invemar–Ingeominas–ICP–Ecopetrol–Geosearch Ltda.

Correa, I. D., & Morton, R. A. (2010). Caribbean coast of Colombia. En *Coastal Environments and Global Change* (pp. 237-256). Wiley-Blackwell.

Davis, R. A., & FitzGerald, D. (2004). *Beaches and coasts*. Blackwell Publishing.

De la Hoz, M. E. (2023). Caracterización y análisis sedimentológico de playa Salguero, suroccidente de Santa Marta, Magdalena - Colombia [Tesis de pregrado]. Repositorio Institucional UIS. <https://repositorio.uis.edu.co/handle/123456789/12345>

Dickinson, W. R. (1970). Interpreting detrital modes of graywacke and arkose. *Journal of Sedimentary Petrology*, 40(2), 695-707.

Dickinson, W. R. (1985). Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. *Geological Society of America Bulletin*, 94(2), 222-235.

Díaz, J. M., & Gómez, D. I. (2003). Geología y geomorfología de las islas del Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 32, 7-28. <https://www.invemar.org.co>

Folk, R. L., & Ward, W. C. (1957). A study of the signification of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27(1), 3-26. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/536693682/Folk-and-Ward-1957>

Folk, R. L. (1974). *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill Publishing.

Flügel, E. (2010). *Microfacies of carbonate rocks: Analysis, interpretation and application* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-03796-2>

Garzanti, E. (2016). From static to dynamic provenance analysis—sedimentary petrology upgraded. *Sedimentary Geology*, 336, 3-13.

Giunta, G., Navarro, E., Beccaluva, L., Bellia, S., Comin-Chiaramonti, P., Dengo, G., Montero, W., Urbani, F., & Carnemolla, S. (1996). Geología de los márgenes de la placa del Caribe: Generalidades en Guatemala, Costa Rica, La Española y resultados preliminares del análisis de una transversal en la Cordillera de la Costa de Venezuela. *Revista Geológica de América Central*, 19/20, 7-28.

Gutiérrez, D., Trujillo Guerrero, S., Sebastián Riaño, J., & Rojas Pinzón, P. X. (2023). Informe campo 3: Ciénaga y Cabo de la Vela.

Heezen, B. C. (1956). Estudio de las formaciones submarinas del Caribe colombiano. *Boletín de la Sociedad Geográfica de Colombia*, 14(51-52), 45-60.

IDEAM. (2015). Estudio Nacional del Agua 2014. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Ingersoll, R. V., Bullard, T. F., Ford, R. L., Grimm, J. P., Pickle, J. D., & Sares, S. W. (1984). The effect of grain size on detrital modes: A test of the Gazzi-Dickinson point-counting method. *Journal of Sedimentary Petrology*, 54(1), 103-116.

Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR). (2005). Diagnóstico de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras.

Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR). (2010). Biodiversidad del margen continental colombiano. Recuperado de https://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/8868Version_Final_Libro_Invemar-ANH.pdf

Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR). (2010). Diagnóstico de la erosión costera en el Caribe colombiano. Recuperado de https://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/604620080501_BErosionCaribeContinentalColombia.pdf

Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (2020). Atlas básico de Colombia. <https://www.igac.gov.co>

Javelaud, O. (1987). La sedimentation du plateau continental de la Colombie Caraibe au cours du Quaternaire terminal. Thèse d'Etat, Université de Bordeaux, Bordeaux, 382 p.

Krause, D. 1971. Bathymetry, geomagnetism and tectonics of the Caribbean Sea North of Colombia. *Geological Society of America Memoir.*, 30: 35-54

Komar, P. D. (1998). *Beach processes and sedimentation* (2nd ed.). Prentice Hall.

Malnis, S., Colombi, C., Rodríguez-Posatini, N., Rothis, M., & Limarino, C. (2018). Ambientes sedimentarios del arroyo Papagayos, piedemonte oriental de las Sierras La Huerta-Imanas, San Juan, Argentina. *Andean Geology*, 45. <https://doi.org/10.5027/andgeoV45n2-3022>

Manzoli, R. P., Portz, L., Villate Daza, D. A., Contreras, M. D., Padilla Jimenez, L. C., y Alcántara-carrió, J. (2020). Magnitude and causes of beach accretion on the eastern margin of the Tayrona National Natural Park (Colombian Caribbean). *Journal of Coastal Research*, 299–303. <https://doi.org/10.2112/SI95-058.1>

Martínez, M. L., Intralawan, A., Vázquez, G., Pérez-Maqueo, O., Sutton, P., & Landgrave, R. (2007). The coasts of our world: Ecological, economic and social importance. *Ecological Economics*, 63(2-3), 254-272. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.10.022>

Masselink, G., & Hughes, M. G. (2003). *Introduction to coastal processes and geomorphology*. Hodder Arnold.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Plan Maestro de Erosión Costera en Colombia. Recuperado de <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Resumen-PMEC.pdf>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2018). Capítulo 2: Procesos físicos de las costas. Recuperado de https://www.miteco.gob.es/content/dam/mitesco/es/costas/publicaciones/cap02_procesos_fisicos_tcm30-161385.pdf

Monreal, R. (s.f.). Conocimientos 5.1 Ambientes sedimentarios. Recuperado de <http://marina.geologia.uson.mx/academicos/monreal/CursoEstratigrafiaEnLinea/Conocimientos%205.1AmbSed.pdf>

Montes, C., Guzmán, G., Bayona, G., Cardona, A., Valencia, V., & Jaramillo, C. (2010). Clockwise rotation of the Santa Marta massif and simultaneous Paleogene to Neogene deformation of the Plato-San Jorge and Cesar-Rancheria basins. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(4), 832-848.

Moore, L. J. (2000). Shoreline mapping techniques. *Journal of Coastal Research*, 16(1), 111-124.

Mora, A., Parra, M., Strecker, M. R., Sobel, E. R., Hooghiemstra, H., Torres, V., & Jaramillo, J. V. (2010). Tectonic controls on sedimentation in the Ciénaga Basin, northern Colombia:

Implications for hydrocarbon exploration. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(4), 832-848.

Murray, A. S., & Olley, J. M. (2002). Precision and accuracy in the optically stimulated luminescence dating of sedimentary quartz: A status review. *Geochronometria*, 21, 1-16.

Navarrete, E. (2017). *Apuntes de geología histórica*.

Nicholls, R. J., & Cazenave, A. (2010). Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Science*, 328(5985), 1517-1520. <https://doi.org/10.1126/science.1185782>

Nichols, G. (2009). *Sedimentology and stratigraphy* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.

Nittrouer, Ch., Austin, J., Field, M., Kravitz, J., Syvitski, J., & Wiberg, P. (2007). Writing a Rosetta stone: Insights into continental-margin sedimentary processes and strata. En I. Jarvis (Ed.), *Continental margin sedimentation: From sediment transport to sequence stratigraphy* (pp. 549-574). Special Publication Number 37 of the International Association of Sedimentologists.

Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2018). *Plan de Manejo del Parque Nacional Natural Tayrona*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Portilla, M., Mejía, L. J., Velásquez, L., Sanabria, M., Ruiz, G. L., Barrera, L. A., ... Navarro, S. del R. (2017). Memoria explicativa mapa geomorfológico analítico aplicado a movimientos en masa, escala 1:100 000: plancha 7-8 - Riohacha, departamento de la Guajira (Servicio Geológico Colombiano (SGC) & Universidad Nacional de Colombia (UNAL), Eds.).

<https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=340120101015180332000000000>

Posada, P., Blanca, O., & Henao, W. (2008). Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe colombiano. INVEMAR, Serie Publicaciones Especiales No. 13.

Rangel-Buitrago, N., & Idárraga-García, J. (2010). Geología general, morfología submarina y facies sedimentarias en el margen continental y los fondos oceánicos del mar Caribe colombiano. En Biodiversidad del Margen Continental del Caribe colombiano (pp. 29-51). INVEMAR.

Reading, H. G. (1996). Sedimentary environments: Processes, facies and stratigraphy (3rd ed.). Blackwell Science.

Restrepo, J. D., & López, S. A. (2008). Morphodynamics of the Pacific and Caribbean deltas of Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 25(1), 1-21.
https://mangleblanco.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/08/restrepo-jd-y-lopez-sa-2008-morphodynamics-pacific-and-caribbean-deltas_jsaearthsci.pdf

- Restrepo, J. D. (1996). Origen de los sedimentos en la Ciénaga Grande de Santa Marta. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 25, 133-154. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-97611996000100003
- Restrepo, J. D., & Kjerfve, B. (2000). Water discharge and sediment load from the western slopes of the Colombian Andes with focus on the Río Magdalena. *Journal of South American Earth Sciences*, 13(6), 577-587. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(00\)00042-1](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(00)00042-1)
- Restrepo, J. D. (2018). El impacto de la deforestación en la erosión de la cuenca del río Magdalena (1980-2010). Departamento de Ciencias de la Tierra, Escuela de Ciencias, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.
- Ricaurte Villota, C., González Arteaga, M. E., Coca Dominguez, O., Bejarano Espinosa, H. M., Morales Giraldo, D. F., Correa Rojas, C. X., Briceño Zuluaga, F., Legarda, G. A., & Arteaga, M. E. (2018). Amenaza y vulnerabilidad por erosión costera en Colombia: enfoque regional para la gestión del riesgo / Coastal erosion hazard and vulnerability in Colombia: regional approach to risk management. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andreis (INVEMAR)

- Romero, J. (2006). Estudio sedimentológico de la plataforma continental de La Guajira entre los 10 y 50 m de profundidad [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 94 p.
- Säenz-Reyes, J. A., Ríos-Reyes, C. A., & Castellanos-Alarcón, O. M. (2017). Itinerario geológico de la franja costera entre el Aeropuerto Internacional Simón Bolívar y la Bahía de Taganga, Provincia Geotectónica de Santa Marta. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 42, 5–24. <https://doi.org/10.15446/rbct.n42.44920>
- Sahu, B. K. (1964). Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments. *Journal of Sedimentary Research*, 34(1), 73-83. <https://doi.org/10.1306/74D70FCE-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Schlager, W. (2005). Carbonate sedimentology and sequence stratigraphy. *SEPM Concepts in Sedimentology and Paleontology*, 8, 1-200. <https://doi.org/10.2110/csp.05.08>
- Servicio Geológico Colombiano (SGC), Bedoya, G., & Universidad EAFIT. (2015a). Memoria explicativa mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa, escala 1:100.000 Plancha 18 Ciénaga (Convenio Especial de Cooperación No. 035 de 2013). Servicio Geológico Colombiano (SGC). <https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=2100321050100284990000000000>

Servicio Geológico Colombiano (SGC), Bedoya, G., & Universidad EAFIT. (2015b). Memoria explicativa mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa, escala 1:100.000 Plancha 12 Don Diego (Convenio Especial de Cooperación No. 035 de 2013). Servicio Geológico Colombiano (SGC).
<https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=210032105010028491000000000>

Servicio Geológico Colombiano (SGC), Portilla Gamboa, M., & Universidad Nacional de Colombia (UNAL). (2017). Memoria explicativa del mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa, escala 1:100.000 Plancha 1-2 Cabo de la Vela [Convenio de Cooperación Especial No. 004 de 2017]. Servicio Geológico Colombiano (SGC).
<https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=340120101024260441000000000>

Short, A., & Jackson, D. (2013). Beach morphodynamics. En *Treatise on Geomorphology* (Vol. 10, pp. 106–129). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00275-X>

Tucker, M. E., & Wright, V. P. (1990). *Carbonate sedimentology*. Blackwell Science.

Tucker, M. E. (2001). *Sedimentary petrology: An introduction to the origin of sedimentary rocks* (3rd ed.). Blackwell Science.

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). (2020). *Erosión costera y sus efectos en la infraestructura costera en Colombia*. Recuperado de

<https://www.radionacional.co/actualidad/medio-ambiente/que-es-la-erosion-costera-consecuencias-y-como-prevenirla>

Vargas, C. A. (2020). Subduction geometries in northwestern South America. En J. Gómez & A. O. Pinilla-Pachon (Eds.), *The Geology of Colombia, Volume 4 Quaternary* (pp. 397–422). Servicio Geológico Colombiano, *Publicaciones Geológicas Especiales* 38. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.11>

Warren, J. K. (2006). *Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons*. Springer.

Weber, M., Cardona, A., Paniagua, F., Cordani, U., Sepúlveda, L., & Wilson, R. (2009). Geochronological and isotopic review of pre-Devonian crustal basement of the Colombian Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 27(1), 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2008.08.003>

Zamora Quiroga, D., & Patiño Giraldo, J. (2022). *Manglares de la Ciénaga Grande de Santa Marta*. Pontificia Universidad Javeriana. <https://www.javeriana.edu.co/pesquisa/manglares-de-la-cienaga-grande/>