



Análisis del cambio morfológico en la línea de costa de la Bahía de Buenaventura (Pacífico Colombiano) a través de sensores remotos de 2016 a 2021

Kevin Andrés Eisinguer Valderrama

Trabajo de grado presentado para optar al título de Oceanógrafo

Asesora

Diana Carolina Niño Pinzón, Magíster (MSc) en Sistemas de Información Geográfica

Asesora

Alba Cecilia Bustamante Caro, Magíster (MSc) en Ciencias Geomorfología y Suelos

Universidad de Antioquia
Corporación Académica Ambiental
Oceanografía
Turbo, Antioquia, Colombia
2023

Cita

(Eisinguer Valderrama, 2023)

Referencia

Estilo APA 7 (2020)

Eisinguer Valderrama, K. (2023). *Análisis del cambio morfológico en la línea de costa de la bahía de Buenaventura (Pacífico Colombiano) a través de sensores remotos de 2016 a 2021*. [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Turbo, Colombia.



Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

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

Dedicatoria

Para ti mamá, gracias por todo, te amo.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes.

Agradezco muy profundamente a mis asesoras Diana Niño y Cecilia Bustamante, por sus palabras, dedicación y paciencia. A mi familia, Xiomara, Ana María y Lander por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, por ser quienes día a día me llenan de voluntad, fuerza y valor para afrontar cada uno de los retos, y a Laura Martínez por siempre creer en mí.

Tabla de contenido

Resumen	10
1. Introducción	11
1.1. Antecedentes	13
2. Justificación	14
2.1. Alcance y limitaciones.	14
3. Objetivos	14
3.1. Objetivo general	14
3.2. Objetivos específicos.....	14
4. Marco teórico	15
4.1. Geomorfología costera.	15
4.2. Morfodinámica de costas: costas bajas y costas altas.	17
4.3. Sistemas de información geográfica (SIG).	17
4.3.1. Estadísticos calculados en DSAS.....	19
5. Área de estudio	20
5.1. Oceanografía y clima.	21
5.2. Geología y geomorfología.....	23
6. Metodología	24
6.1. Toma de datos.	24
6.2. Procesamiento de la información.	25
7. Resultados	29
7.1. Línea de costa.....	29
7.1.1. Zona Norte 1.....	29
7.1.2. Zona norte 2.	34
7.1.3. Bazán-Bocana.....	39

7.1.4.	Zona Este.....	43
7.1.5.	Zona Sur 1.....	44
7.1.6.	Zona sur 2.....	49
7.1.7.	Punta soldado	54
7.2.	Geoformas	59
7.2.1.	Geoformas del litoral.....	59
7.2.1.1.	Unidades Geomorfológicas.....	60
7.2.1.2.	Rasgos geomorfológicos.....	61
7.2.2.	Geoformas sumergidas.....	61
8.	Discusión.....	68
9.	Conclusiones.....	69
10.	Recomendaciones.....	69
	Referencias	71

Lista de tablas

Tabla 1 Imágenes satelitales usadas.	24
Tabla 2. Batimetrías utilizadas.	24
Tabla 3. Clasificación de los procesos de erosión y acreción de la línea costera, con base en estadística EPR.	27
Tabla 4. Resultados de EPR en la LC de la zona norte 1.	29
Tabla 5. Resultados de NSM en la LC de la zona norte 1.	31
Tabla 6. Resultados de LLR en la LC de la zona norte 1.	31
Tabla 7. Resultados de EPR en la LC de la zona norte 2.	35
Tabla 8. Resultados de NSM en la LC de la zona norte 2.	36
Tabla 9. Resultados de LRR en la LC de la zona norte 2.	36
Tabla 10. Resultados de EPR en la LC de Bazán Bocana.	39
Tabla 11. Resultados de NSM en la LC de Bazán Bocana.	40
Tabla 12. Resultados de LRR en la LC de Bazán Bocana.	40
Tabla 13. Resultados de EPR en la LC de la zona sur 1.	44
Tabla 14. Resultados de NSM en la LC de la zona sur 1.	46
Tabla 15. Resultados de LRR en la LC de la zona sur 1.	46
Tabla 16. Resultados de EPR en la LC de la zona sur 2.	50
Tabla 17. Resultados de NSM en la LC de la zona sur 2.	51
Tabla 18. Resultados de LRR en la LC de la zona sur 2.	51
Tabla 19. Resultados de EPR en la LC de Punta Soldado.	55
Tabla 20. Resultados de NSM en la LC de Punta Soldado.	55
Tabla 21. Resultados de LRR en la LC de Punta Soldado.	55
Tabla 22. Extensión de las unidades geomorfológicas de la bahía de Buenaventura.	61

Lista de figuras

Figura 1. Tipos de corrientes generadas por el oleaje cuando este incide oblicuamente sobre la costa.....	16
Figura 2. Bahía de Buenaventura.	20
Figura 3. Precipitación acumulada mensual, promedio de 10 años (2010-2020).	21
Figura 4. TSM promediada hasta el 2018.	22
Figura 5. Régimen mareal de la bahía de Buenaventura.....	22
Figura 6. Criterios para trazado de líneas de costa.....	25
Figura 7. Área de estudio dividida en 3 zonas.	26
Figura 8. Esquema metodológico.....	28
Figura 9. EPR calculado para cada transecto de análisis de las líneas costeras en zona norte 1. .	30
Figura 10. NSM y LRR calculados para cada transecto de análisis de las líneas costeras en la zona norte 1.	32
Figura 11. Procesos de erosión y acreción en la zona norte 1 del área de estudio, fuente: elaboración propia.	33
Figura 12. LC en la zona norte 1.....	34
Figura 13. EPR calculado para cada transecto de análisis de las líneas costeras en la zona norte 2.	35
Figura 14. NSM y LRR calculados para cada transecto de análisis de las líneas costeras en la zona norte 2.	37
Figura 15. Procesos de erosión y acreción en la zona norte 2 del área de estudio.....	38
Figura 16. LC estable y con acreción en la zona norte 2.	38
Figura 17. EPR calculado para cada transecto de análisis de las líneas costeras en el área Bazán-Bocana.	41
Figura 18. NSM y LRR calculados para cada transecto de análisis de las líneas costeras en el área Bazán-Bocana.	42
Figura 19. Procesos de erosión y acreción en Bazán-Bocana, fuente: elaboración propia.	43
Figura 20. EPR calculado para cada transecto de análisis de las líneas costeras en la zona sur 1.	45

Figura 21. NSM y LRR calculado para cada transecto de análisis de las líneas costeras en la zona sur 1.	47
Figura 22. Procesos de erosión y acreción en la zona sur 1, fuente: elaboración propia.	48
Figura 23. LC estable, con erosión y acreción en la zona sur 1.	49
Figura 24. EPR calculado para cada transecto de análisis de las líneas costeras en la zona sur 2.	50
Figura 25. NSM y LRR calculado para cada transecto de análisis de las líneas costeras en la zona sur 2.	52
Figura 26. Procesos de erosión y acreción en la zona sur 2, fuente: elaboración propia.	53
Figura 27. LC estable, y con erosión en la zona sur 2.	54
Figura 28. EPR calculado para cada transecto de análisis de las líneas costeras en Punta Soldado.	56
Figura 29. NSM y LRR calculado para cada transecto de análisis de las líneas de costa en Punta Soldado.	57
Figura 30. Procesos de erosión y acreción en Punta Soldado, fuente: elaboración propia.	58
Figura 31 Unidades y rasgos geomorfológicos de la bahía de Buenaventura.	59
Figura 32. Geoformas de Fondo presentes en la Zona de estudio.	62
Figura 33. Falda.	62
Figura 34. Abanico Submarino.	63
Figura 35. Terraza.	63
Figura 36. Canales.	64
Figura 37. Banco.	65
Figura 38. Lineamientos.	65
Figura 39. Hoya.	66
Figura 40. Cuenca.	67

Siglas, acrónimos y abreviaturas

SIG.	Sistema de Información Geográfica
SR	Sensores Remotos
DSAS	Digital Analysis Shoreline System
DIMAR	Dirección General Marítima
CCCP	Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico
LC	Línea de Costa
EPR	End Point Rate
NSM	Net Shoreline Movement
LRR	Lineal Regression Rate

Resumen

A nivel global, el cambio en la línea de costa se destaca dentro de las principales amenazas de las zonas costeras, Colombia no es la excepción a esta situación agudizada en las últimas décadas y por ello se han llevado a cabo diversos estudios en los litorales Caribe y Pacífico enfocados principalmente en evaluaciones cualitativas y adoleciendo de falta de continuidad, estas características han evidenciado la necesidad de cuantificar los cambios ocurridos en la línea de costa además de implementar monitoreos sistemáticos a mediano y largo plazo.

Esta investigación tuvo como objetivo cuantificar la variación morfológica de línea de costa (LC) de la Bahía de Buenaventura del 2016 al 2021. Para lograr el objetivo se compararon imágenes satelitales de los años mencionados, adicionalmente se identificaron las geoformas emergidas y con las batimetrías suministradas por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP) se generaron modelos batimétricos para las geoformas sumergidas. Uno de los resultados de este proyecto consistió en determinar zonas con mayor vulnerabilidad a la erosión y zonas con mayor estabilidad al interior de la Bahía de Buenaventura.

Palabras clave: Buenaventura, Geoformas, Línea de costa, DSAS

1. Introducción

Las costas son ambientes naturales que comprenden la franja de influencia entre el mar y el continente, allí se dan procesos geológicos, geomorfológicos, climáticos, biológicos y antrópicos que les dan configuraciones específicas (Robin Davidson-Arnott, 2010), transformadas a su vez por las interacciones demográficas, sociales y económicas de las comunidades allí asentadas (Vivas et al., 2014).

Son entornos altamente susceptibles a los cambios generados por fenómenos naturales y/o por actividad humana a diferentes escalas espaciales y temporales (Del Río et al., 2013) que afectan directa o indirectamente a las poblaciones cuya economía y sustento proviene de los bienes y servicios del entorno costero: pesca, turismo, navegación, desarrollo portuario, explotación minera, entre otros. Por tanto, es fundamental caracterizar sus cambios morfológicos para velar por un desarrollo sostenible, protección y aprovechamiento de sus recursos (Kumar et al., 2010).

A nivel global, el retroceso o pérdida de línea de costa es una amenaza sobre los litorales y está relacionado con el ascenso del nivel del mar como una de las consecuencias del cambio climático, el deshielo de los casquetes glaciares aumenta el volumen de agua en las cuencas oceánicas y el espacio de ocupación para el agua adicional está sobre el continente, siendo las zonas costeras los sitios más cercanos para compensar ese ascenso, adicionalmente la densidad poblacional y las infraestructuras sobre las zonas costeras han aumentado desde el siglo pasado y esto ha alterado su dinámica natural (Duncan et al., 2008).

Los litorales Pacífico y Caribe de Colombia no son ajenos a esta situación y ya registran retrocesos de su línea de costa a partir de la década de 1950, procesos que según Correa & Vernet, (2004), INVEMAR-GEO, (2015), Meza & Pastrana, (2020), Paniagua, (2013), Vernet et al., (2012), Castañeda (2017), se han agudizado en las tres últimas décadas, convirtiéndose en un problema que se traduce en pérdida de playas, acantilados y otras geoformas costeras (Posada et al., 2009). En aras de preservar y/o generar ganancias de terreno, se construyen obras de protección y recreación sin los estudios pertinentes, con consecuencias incalculables y con efectos contrarios a los deseados. Por otro lado, la contaminación costera es otro factor de deterioro y sus principales forzantes son la falta de planificación y control para la disposición de los residuos de minería, industriales y de uso cotidiano de la población.

En un esfuerzo por entender la dinámica de las afectaciones naturales y antrópicas a los litorales se han promovido diversos estudios, pero el uso de metodologías de medición del movimiento o corrimiento de la línea de costa se ha implementado desde hace poco: golfo de Morrosquillo (Anaya, 2021), Punta Rey – La Rada en Córdoba (Meza & Pastrana, 2020), litoral antioqueño (Gob. ANT et al., 2021) y en la zona del Pacífico, específicamente Buenaventura Castañeda, (2017), Cifuentes et al., (2017). Los anteriores estudios han caracterizado la evolución de la línea de costa y los impactos de los forzantes sobre la morfodinámica del litoral de manera cualitativa y cuantitativa, a la actualidad apenas se comienza a implementar monitoreos sistemáticos con mediciones de variables oceanográficas y costeras para generar líneas base y modelos que permitan ordenar el territorio de cara a las consecuencias del cambio climático en las costas de Colombia.

Dentro de las herramientas para llevar a cabo los monitoreos están los sensores remotos (SR), eficaces en los análisis espaciotemporales de la línea litoral (Kumar et al., 2010) porque minimizan el tiempo en campo, ya que al usar fuentes de datos históricos y actuales como mapas, fotografías aéreas e imágenes satelitales se analizan en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y se procesan de manera más eficiente y detallada las superficies terrestres y los ambientes marinos (Kratzer et al., 2014).

La investigación presente tuvo como principal objetivo caracterizar el avance y retroceso en la línea de costa, así como en la identificación de las geformas litorales subáreas y submareales del estuario de la Bahía de Buenaventura con fotografías aéreas, imágenes satelitales y datos batimétricos desde 2016 al 2021.

Lo anterior es un insumo esencial para tener herramientas de ordenamiento territorial debido a la importancia del estuario, ya que este es uno de los puertos más importantes de Colombia y está afectado por procesos de erosión y sedimentación a lo largo de su franja costera, provocando alteraciones en la dinámica litoral, que según Coca & Ricaurte (2019) afectan directamente a la población que en respuesta han tenido cambios significativos en su estilo de vida como la reubicación de sus viviendas, zonas comunes y economía portuaria.

1.1. Antecedentes

El comportamiento y dinámica del litoral colombiano se ha abordado en las últimas décadas por varios autores, entre los que destacan Cardona (2018), Castañeda (2017), Coca & Ricaurte (2019), Coca & Ricaurte-Villota (2022), Correa et al. (2007), Correa & Vernet (2004), Ferrucho-Maloof et al. (2022), González & Correa (2001), Paniagua (2013), Posada et al. (2009), Zambrano & Andrade (2011). El objetivo principal de algunos de estos estudios son los procesos erosivos por el alto impacto que tienen en los ecosistemas y asentamientos humanos, y se ha evaluado su efecto en ámbitos socioeconómicos y ambientales, como lo expuesto por Coca & Ricaurte, (2019) donde se determinan la vulnerabilidad de las poblaciones a la erosión costera.

Los estudios de morfodinámica costera han usado imágenes aéreas antiguas para tratar de cuantificar la evolución de línea de costa, lográndolo de forma cualitativa, porque en general las imágenes antiguas carecen de información relevante como puntos para georreferenciación, baja resolución, escala espacial, fecha y condiciones de captura de la imagen, tal que no es posible cuantificar los estadísticos de tasas de cambio (Castañeda, 2017); actualmente con el desarrollo de la tecnología (imágenes satelitales multiespectrales, drones, dgps y otros), la evolución de línea de costa y la cuantificación de sus cambios es más precisa a través de las ortofotografías e imágenes satelitales

Cardona (2018) y Ferrucho-Maloof et al (2022) encontraron que el monitoreo multianual tiene un alto potencial como método de estudio para entender los procesos naturales y antrópicos que influyen en la evolución de acantilados y demás geoformas presentes en los litorales, adicionalmente Coca & Ricaurte-Villota (2022) y Zambrano & Andrade (2011) concuerdan en que el uso de herramientas como *DSAS* facilitan el cálculo de parámetros estadísticos que indican el estado y los cambios en períodos específicos para cada monitoreo.

Si bien estos estudios han demostrado que el método es efectivo, los autores concuerdan en que aún falta un monitoreo sistemático con escalas temporales amplias para poder obtener series de tiempo y cuantificar las tasas de erosión y acreción y obtener modelos de evolución de los litorales.

2. Justificación

El estuario de la Bahía de Buenaventura es una zona muy susceptible a cambios debido a sus condiciones geológicas, geomorfológicas y ecológicas, por esto es necesario cuantificar la evolución de la línea de costa, traducida en terrenos ganados o perdidos por procesos de acreción y erosión. Esta información es básica para generar herramientas de decisión por parte de los entes ordenadores del territorio frente a los escenarios presentes y futuros causados por el cambio climático e intervenciones antrópicas.

2.1. Alcance y limitaciones.

Cuantificar el cambio en la línea de costa del 2016 al 2021 al interior de la bahía, identificar geoformas litorales subáreas y submareales en la bahía, determinar sitios con mayor retroceso y/o acumulación, además de sitios con mayor estabilidad. Se debe resaltar que no se llegara a gran detalle local en algunos sectores por la resolución de las imágenes y la irregularidad en la información con respecto a cobertura espacial y temporal de la base de datos.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Caracterizar la variación morfológica de la Bahía de Buenaventura a través del análisis de la línea de costa desde 2016 hasta el 2021 por medio de fotogrametría e imágenes satelitales.

3.2. Objetivos específicos

- Determinar los sitios de retroceso o ganancia de línea de costa en la Bahía de Buenaventura.
- Calcular la tasa de cambio de la línea de costa, a partir del programa DSAS.
- Identificar las geoformas subaéreas y submareales en litoral de la Bahía de Buenaventura.

4. Marco teórico

4.1. Geomorfología costera.

La geomorfología es el estudio de las características físicas y superficiales del paisaje, además de los forzantes que lo modifican. El análisis del paisaje se hace con base a su estructura física, biológica y tasas de cambio, y por lo general, las tasas de cambio en ambientes costeros son extremadamente más altas cuando se comparan con la de otros ambientes, debido a la interacción de los procesos climáticos, oceanográficos, geológicos y antrópicos (Hugguett, 2011).

La línea de costa se entiende como la interfaz física entre el continente y el océano, su posición cambia a través del tiempo a escalas desde segundos hasta milenios, debido al transporte de sedimentos, procesos geológicos, cambios globales y locales en el nivel del mar y fenómenos climáticos, entre otros Boak & Turner, (2005), Gómez et al., 2012).

Por tanto, es muy importante determinar el espacio físico de la línea de costa, pues ella determina los ambientes marinos, continentales o transicionales y el dominio de los forzantes que modelan sus geoformas: olas, mareas, agua subterránea, tormenta, etc. (Pajak & Leatherman, 2002).

Algunos de los criterios usados para delimitar la línea de costa son componentes geomorfológicos (Boak & Turner, 2005):

- El escarpe de la playa.
- La base de acantilados.
- La línea de vegetación más próxima al océano.
- La línea media de pleamar en zonas de playa.

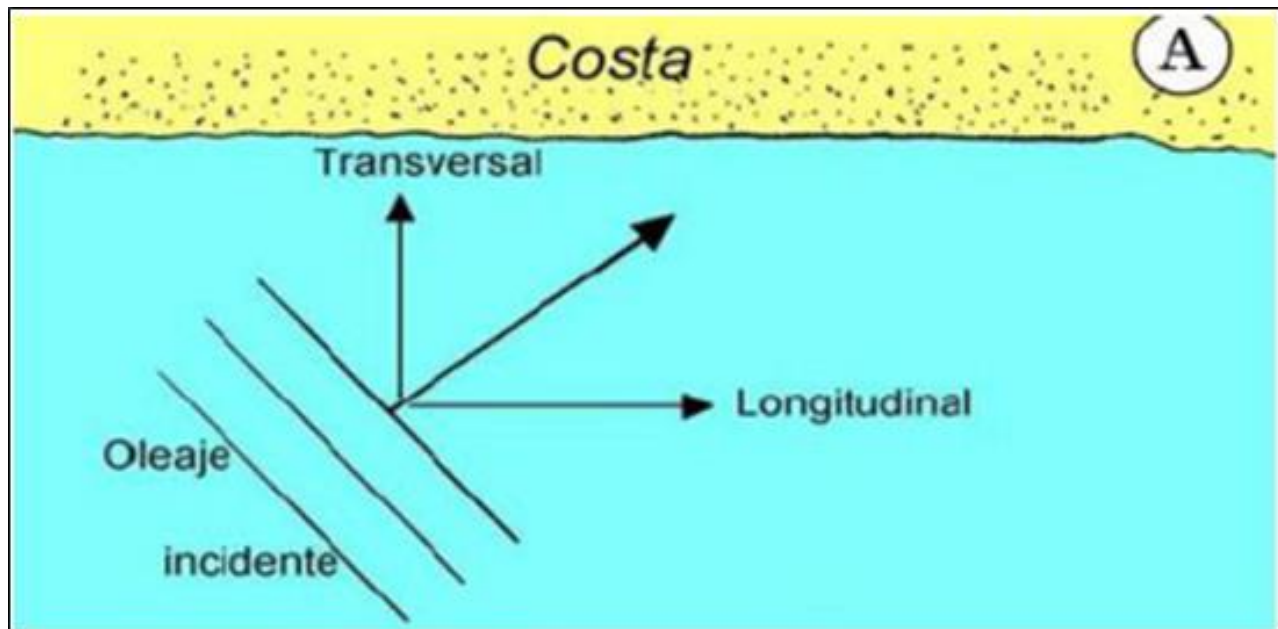
La evolución de la línea de costa involucra cambios que ocurren a través del tiempo, traducidos en procesos de acreción (ambientes de depósito) y/o erosión (ambientes denudativos) en diferentes escalas temporales, que determinan la magnitud y velocidad de los cambios de las geoformas litorales (Castañeda, 2017; Kelletat, 1996). La acreción es la acumulación de sedimentos y/o ganancia de terrenos y ocurre generalmente por depósito ya sea marino, fluvial, eólico, glacial, por regresión marina o por producto de las actividades humanas. La erosión es la pérdida o retiro de material de la línea de costa, ya sean depósitos arenosos, gravas o rocas, por

retroceso de acantilados y colinas, retroceso de la línea de vegetación y ocurre por la incidencia del oleaje, la ausencia de una fuente de sedimentos, subsidencia del terreno, trasgresiones marinas o acciones antrópicas entre ellas la urbanización y construcción de obras sin conocimiento de la dinámica litoral.

Los sedimentos son, el punto crucial de los procesos de acreción y erosión y estos entran al sistema y se transportan en las corrientes litorales (Giraldo & Lonin, 1997), para contribuir en la configuración de la LC. Cuando el oleaje incide oblicuamente sobre la costa genera dos tipos de corrientes, una longitudinal, paralela a la línea de costa y otra transversal perpendicular a la línea de costa (Figura 1). Esta corriente longitudinal tiene una capacidad considerable de transporte, puesto que se forma en una zona turbulenta con abundante sedimento en suspensión (Peña, 2007).

Figura 1.

Tipos de corrientes generadas por el oleaje cuando este incide oblicuamente sobre la costa



Nota. Fuente: (Peña, 2007).

De esta manera, en condiciones de acreción, la línea de costa desarrollará a través del tiempo geformas características como playas, dunas, llanuras costeras y otras morfologías de depósito. Por el contrario, en costas erosivas, se presentarían escarpes, acantilados y dunas escindidas como geformas representativas (Lam et al., 2014; Silva et al., 2014).

Tradicionalmente, la caracterización de la línea de costa según (Gómez et al., 2012) ha sido realizada a partir de su evolución y composición, criterios desarrollados especialmente para evaluar la vulnerabilidad ante derrames de petróleo permitiendo identificar los sectores más susceptibles y poder establecer planes de contingencia ante un eventual derrame.

4.2. Morfodinámica de costas: costas bajas y costas altas.

Costas bajas: son ambientes de depósitos extensos, llanos, arenosos y con poca altitud. En ellas se encuentran una gran variedad de geoformas asociadas a los procesos acumulativos dependiendo del agente formador (ríos, mareas u oleaje) entre las que se identifican playas, islas, isla barrera, lagunas costeras, planos de inundación, planicies y llanuras con vegetación halófila, plataformas intermareales no vegetadas, espigas y tómbolos (Bermudez et al., 2014; Masselink et al., 2011; Posada et al., 2009; Prüssmann, 2012).

Costas altas: ambientes asociados a costas rocosas erosionables por procesos de oleaje y/o subáereos; las geoformas comunes son colinas, acantilados, terrazas emergidas y sumergidas, islotes o peñascos rocosos y domos diapiricos (Prüssmann, 2012). Los procesos erosivos predominan en las costas altas, aunque también puede haber procesos de depósito de menor magnitud y extensión que en las costas bajas.

El transporte y depósito de sedimentos en estos ambientes está condicionado en diferentes escalas de tiempo e intensidad, características y fuente del sedimento y por los factores hidrodinámicos que actúan sobre ellos (ríos, oleaje, mareas, vientos) (Kroon et al., 2008).

El hombre con sus actividades también afecta significativamente el aporte y pérdida de sedimentos en el litoral mediante la urbanización de playas, extracción de arenas, desvío del cauce de ríos, cambios en el uso del suelo en las cuencas que drenan sus aguas al mar, deforestación y otras acciones que alteran el suministro de sedimentos al litoral (Restrepo, 2006).

4.3. Sistemas de información geográfica (SIG).

Los SIG son la unión de la información sobre un elemento en la superficie de la tierra y las herramientas informáticas (programa o software) para su análisis (Tomlinson, 2003). Este sistema

de hardware, software, datos, personas, organizaciones y convenios institucionales según Peña, (2006) tiene 3 principales aplicaciones, que son:

- Ciencia: ciencias medioambientales y relacionadas con el espacio, desarrollo de modelos empíricos, modelización cartográfica, modelos dinámicos y teledetección.
- Gestión: cartografía automática, información pública, catastro, planificación fiscal, ordenamiento territorial, planificación urbana, estudios de impacto ambiental, evaluación de recursos y seguimiento de actuaciones.
- Empresarial: marketing, estrategias de distribución, planificación de transportes y localización óptima.

La importancia de los SIG tiene que ver con el “dónde”, ya que es vital conocer donde ocurre un fenómeno por si es necesario llegar hasta él o bien solo obtener información del lugar de los hechos (Lantada & Nuñez, 2002), por medio del análisis de insumos geográficos como, por ejemplo, imágenes satelitales, ortofotografías, datos de campo, etc.

Las imágenes satelitales según Rodríguez & Arredondo, (2005) son la representación visual de la información captada por los sensores instalados en un satélite artificial. Las imágenes ofrecen una perspectiva única de la Tierra, sus recursos y el impacto que sobre ella ejercen los seres humanos. La teledetección por satélite ha demostrado ser una fuente de valiosa información para numerosas aplicaciones, entre las que cabe destacar el monitoreo de la morfología de vastas extensiones de terreno, gestión de cultivos, prospección petrolífera, exploración minera y muchas otras. Por otro lado, una ortofoto es según el manual de procedimientos del instituto nacional de estadística, geografía e informática de México (INEGI, 2003) una fotografía aérea en la que han sido corregidos, mediante procesos fotogramétricos, los desplazamientos que se presentan en la imagen como consecuencia de: El relieve del terreno, curvatura terrestre, inclinación del eje de la cámara, entre otros. Dejando un alto porcentaje de los elementos presentes en una escala homogénea, en teoría libre de errores y deformaciones, y aproximadamente con la misma validez de un plano cartográfico, en el aspecto de precisión.

La digitalización y determinación del cambio en la línea de costa es fundamental para cumplir los objetivos de esta investigación. Esto se puede llevar a cabo por medio de diferentes métodos que van desde los perfiles topográficos, hasta la fotogrametría que incluye imágenes aéreas e imágenes satelitales, y análisis de imágenes multispectrales (King *et al.*, 2017).

4.3.1. Estadísticos calculados en DSAS.

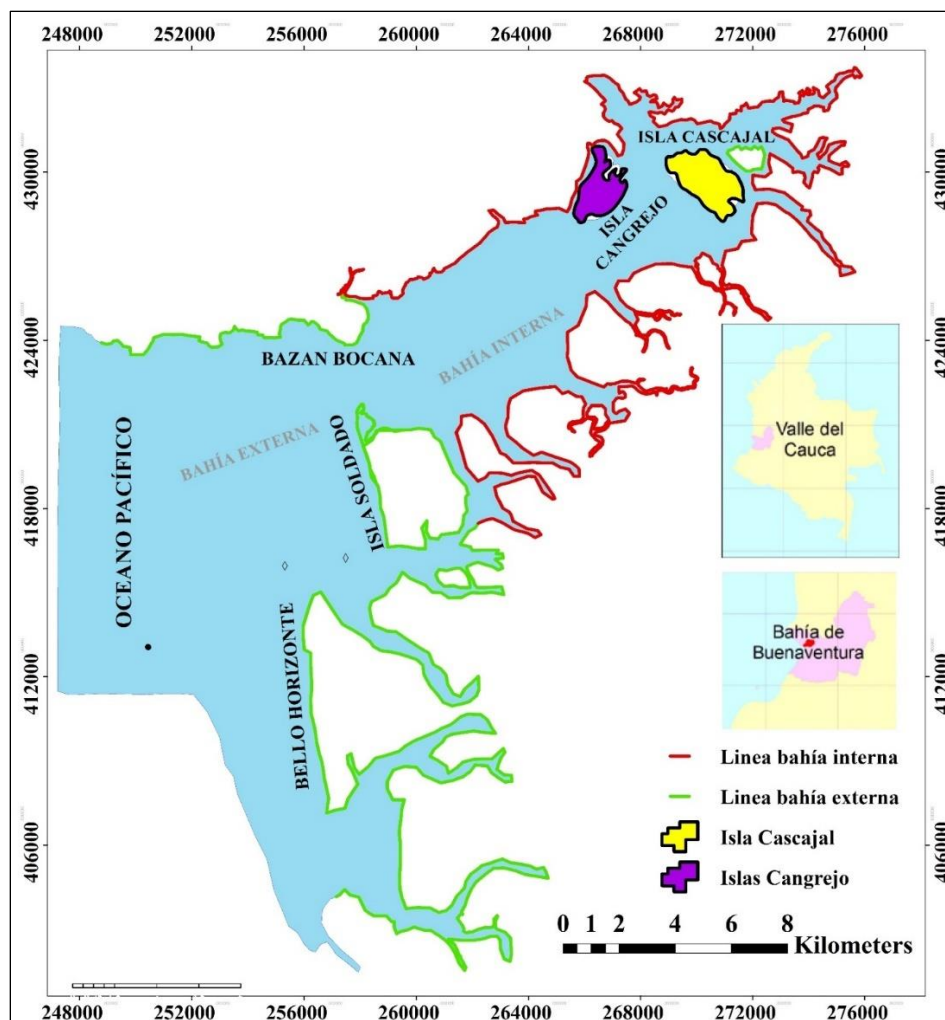
El método DSAS calcula las tasas de cambio de la LC en función de las diferencias medidas entre las posiciones de la LC asociadas a periodos de tiempo específicos (Himmelstoss et al., 2021). Se tuvieron en cuenta las siguientes medidas estadísticas:

- **NSM (*Net Shoreline Movement*):** es el movimiento neto de la costa y muestra la separación en longitud entre la LC más antigua y la más actual., determina la variabilidad de la línea de costa en longitudes de retroceso (negativas) o de progradación (positivas) permitiendo cuantificar la dinámica de movimiento de la LC (Himmelstoss et al., 2021).
- **EPR (*End Point Rate*):** es la tasa de punto final, se obtiene del cociente entre la NSM y el tiempo transcurrido entre la línea de costa más antigua y la más reciente. Las principales ventajas del EPR son la facilidad de cálculo y el requisito mínimo de solo dos fechas en la LC (Himmelstoss et al., 2021).
- **LRR (*Lineal Regression Rate*):** es la tasa de regresión lineal, se determina ajustando una línea de regresión de mínimos cuadrados a todos los puntos de la LC para un transecto dado. La línea de regresión se coloca de modo que la suma de los cuadrados de los residuos se minimiza. La tasa de regresión lineal es la pendiente de la línea (Himmelstoss et al., 2021).

5. Área de estudio

La Bahía de Buenaventura se encuentra en el litoral Pacífico de Colombia (03°57'08" N, 77°00'51" W), departamento del Valle del Cauca (Figura 2), con un área aproximada de 250 km², limita al norte con el departamento del Chocó, al sur con el Cauca, al oriente con los municipios Calima, Dagua, Cali y Jamundí, y en el oriente con el océano Pacífico (Otero, 2004). Por las características oceanográficas que la influyen permanentemente, se diferencian dos áreas en la bahía: una interna y otra externa, la parte interna es un estuario bien mezclado dominado por el flujo de la escorrentía de los ríos que allí desembocan, mientras que la bahía externa tiene mayor influencia del océano Pacífico (Otero, 2005).

Figura 2. Bahía de Buenaventura.

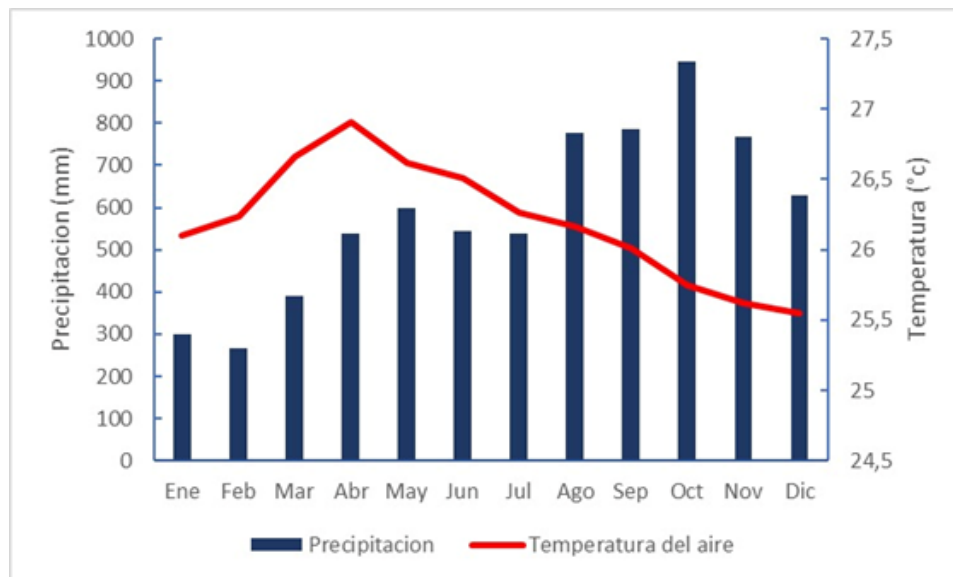


Fuente: Elaboración propia, 2023.

5.1. Oceanografía y clima.

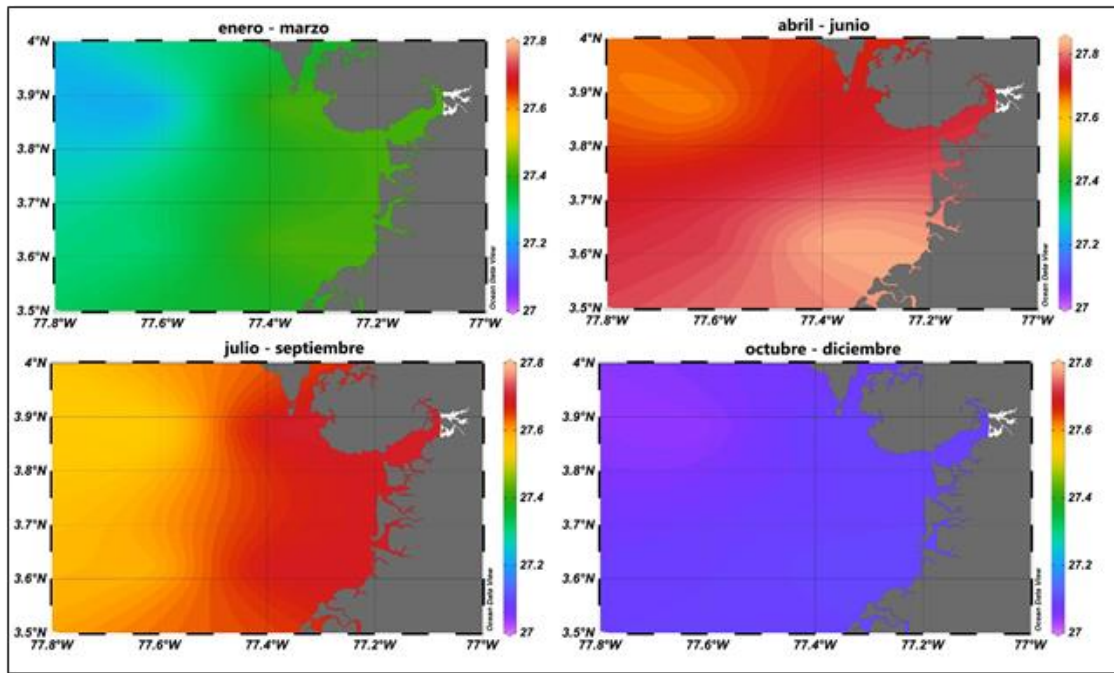
El clima en la Bahía presenta una distribución mono modal, con un régimen de lluvias menor a 400 mm en los primeros meses del año (enero a marzo), cuando la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) está al sur del Pacífico (Guzmán et al., 2014) y valores máximos, hasta 900 mm de precipitación para los meses de agosto a noviembre (Figura 3).

Figura 3. *Precipitación acumulada mensual, promedio de 10 años (2010-2020).*



Nota. Fuente: Estación Meteorológica Aeropuerto Buenaventura (IDEAM)

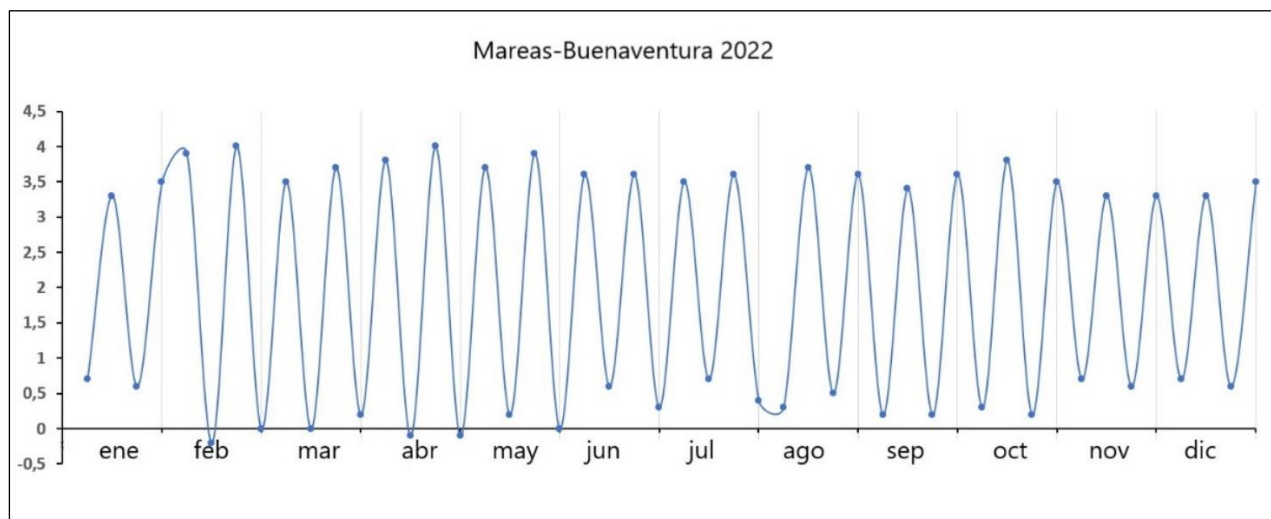
Sin embargo, la influencia de la ZCIT varía debido los fenómenos del ENSO, el Chorro del Chocó y las condiciones de relieve, altitud y corrientes marinas de la región; en condiciones normales las aguas del Pacífico colombiano son cálidas, con temperaturas que oscilan entre 25 °C y 26 °C (Figura 4) y bajo la influencia de la Oscilación del Sur (ENSO) presentan anomalías en la temperatura superficial del mar de hasta 3,5 °C por encima de la media y aumentando el nivel medio del mar hasta 40 cm, ocasionando mayores inundaciones durante las pleamares e inundando las áreas continentales adyacentes a la LC lo que afecta directamente los asentamientos humanos (IDEAM, 2019; Posada et al., 2009; Ruiz & Pabón, 2013; Duncan et al., 2008).

Figura 4. TSM promediada hasta el 2018.

Nota. Tomado de la climatología WOA18. (Locarnini et al., 2019)

El régimen de mareas es de tipo semidiurno (dos pleamares y dos bajamares cada día) con períodos de 12,25 horas y con un rango meso mareal promedio de 4 m (

Figura 5) (IDEAM, 2019).

Figura 5. Régimen mareal de la bahía de Buenaventura

Fuente. Elaboración propia con datos de DIMAR CCCP, (2023)

5.2. Geología y geomorfología

Los límites entre las divisiones geológicas y fisiográficas del litoral Pacífico están determinados principalmente por las perturbaciones que afectan las plataformas y áreas continentales como el sistema de fallas del Chocó y Baudó que coincide tanto con el límite norte como con el Oeste de la costa Pacífica (Posada et al., 2009). En la zona costera del Pacífico colombiano, desde la frontera con Panamá hasta Cabo Corrientes en el departamento del Chocó, la LC de costa es el flanco occidental de la serranía del Baudó (600 m de altura), compuesta por rocas de corteza oceánica: basaltos, diabasas, cherts y radiolaritas, el relieve tiene control estructural, con fracturamiento denso y fallamiento en dirección preferencial NNE-SSE y N60°E- N30°W controlando la dirección general de los valles y serranías. Al sur de la serranía del Baudó, entre Cabo Corrientes y la Bahía de Buenaventura predomina el relieve colinado (20-100 m de altura) y las terrazas (20-30 m de altura), modeladas en secuencias sedimentarias del Paleógeno y depósito del Plio-Cuaternario del piedemonte de la cordillera occidental (González JL & Correa ID, 2001) igualmente aparecen prismas deltaicos y estrechas franjas de depósitos del Holoceno que forman islas barreras, pantanos de manglar interconectados por canales intermareales y planicies intermareales (González JL & Correa ID, 2001).

El litoral Pacífico colombiano está sobre el borde de placas convergentes Nazca – Suramérica (Velasco & López, 2016), la actividad sísmica es alta y han ocurrido sismos de gran magnitud (1906, 1979 y 1992) que han afectado al litoral; los sismos de 1906 y de 1979 produjeron Tsunamis con altura de ola de 2,5 m afectando las áreas costeras de Ecuador y Colombia y dejando más de 3500 muertes, ambos sismos también produjeron subsidencias del litoral de hasta 1,5 m entre Buenaventura y el delta del río Patía, igualmente fueron acompañados de licuefacción del suelo y extensos movimientos en masa que represaron los ríos de la vertiente pacífica (González JL & Correa ID, 2001).

Las costas de la Bahía de Buenaventura se encuentran enmarcadas dentro de lo que se conoce como la llanura costera del Pacífico, caracterizada por un relieve casi plano, formado por grandes llanuras deltaicas y extensos complejos de marismas de mangle, alineados paralelamente a la línea de costa, generados bajo un régimen meso mareal (Ortiz & Valencia, 2013; Oviedo-Barrero et al., 2020).

6. Metodología

6.1. Toma de datos.

La extracción y análisis de la LC se hizo mediante el uso de imágenes Landsat, Sentinel y ortofotos suministradas por DIMAR. En la Tabla 1 se relaciona cada imagen con su resolución, año, cobertura de nubes y sensor del satélite.

Tabla 1. *Imágenes satelitales usadas.*

Año de Captura	Sensor	Resolución (m)	% de Cobertura de Nubes
2016	WV03	0,5	0,188179
2017	GE01	0,5	0,105965
2018	WV01	0,5	0,282264
2018	WV01	0,4	0,001
2018	WV04	0,3	0,258727
2019	WV03	0,5	0,462885
2019	WV01	0,5	0,361419
2019	WV01	0,5	0,29061
2019	WV01	0,31	0,001
2021	WV03	0,3	0,001

fuelle: Dimar, 2022

Para identificar y analizar las geoformas submareales de la Bahía de Buenaventura se usaron batimetrías proporcionadas por DIMAR-CCCP del año 2017 (

Tabla 2), Los archivos XYZ de las batimetrías corresponden a sondas multihaz y sonda monohaz, con proyección WGS 84 / UTM 18 Norte, escala 1:15000 y coordenadas planas. Para la identificación de las geoformas subaéreas se utilizó un DEM (modelo digital de elevación) adquirido en la página de Earth Data de la NASA.

Tabla 2. *Batimetrías utilizadas.*

Año	Haz
2017	Multihaz
2017	Monohaz

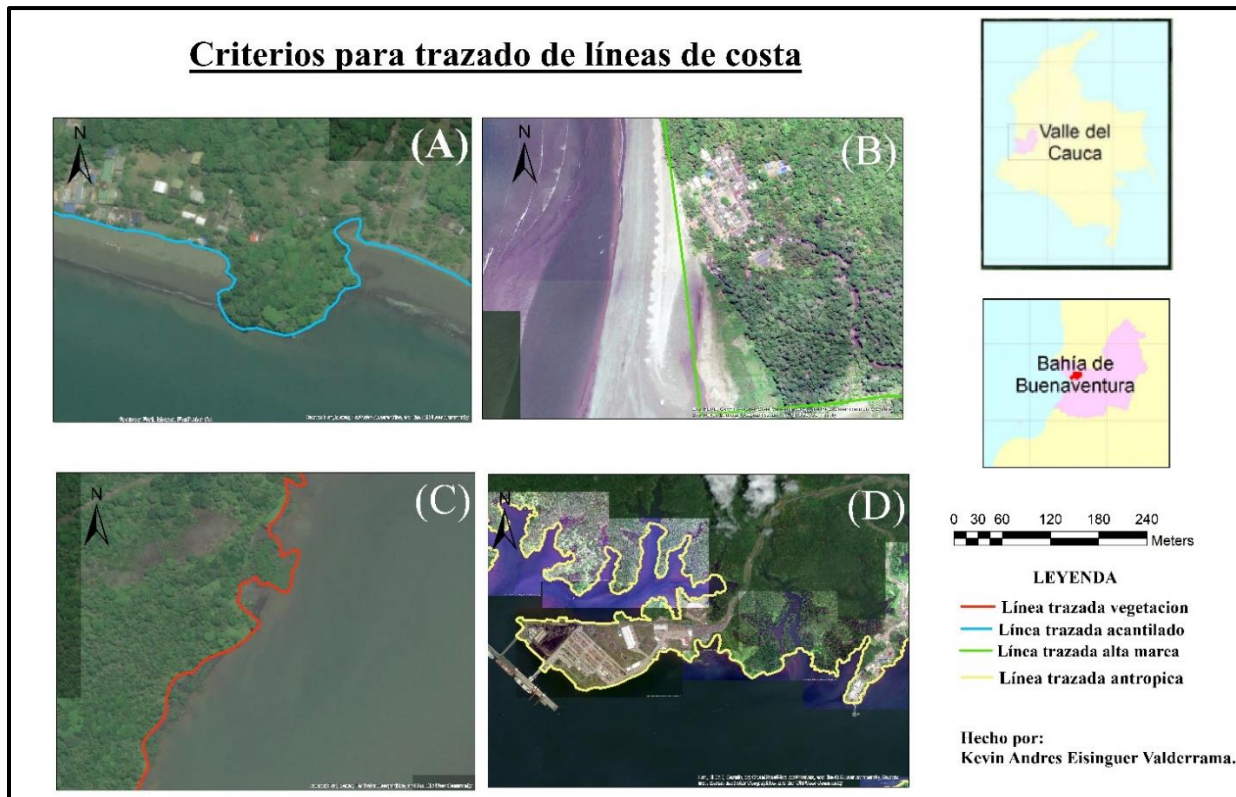
fuelle: Dimar, 2022

6.2. Procesamiento de la información.

En las imágenes satelitales y ortofotos a escala 1:1000 y 1:2000 se digitalizó y definió la LC mediante los siguientes criterios determinados por el autor y los asesores:

- Para la zona de acantilados (costa alta): la base del acantilado (
- Las líneas costeras así definidas se analizaron con *ArcMap versión 10.4*. Debido a la gran extensión de la LC (aproximadamente 250 km) se dividió el área de estudio en 3 zonas: norte, sur y este (
- Figura 7) y cada una de ellas en 3 sub-zonas. (A)).
- Para la costa baja con playa: el límite entre agua-tierra determinado por la línea de humedad (
- Las líneas costeras así definidas se analizaron con *ArcMap versión 10.4*. Debido a la gran extensión de la LC (aproximadamente 250 km) se dividió el área de estudio en 3 zonas: norte, sur y este (
- Figura 7) y cada una de ellas en 3 sub-zonas.(B).
- Para los planos intermareales vegetados: la línea de vegetación estable (
- Las líneas costeras así definidas se analizaron con *ArcMap versión 10.4*. Debido a la gran extensión de la LC (aproximadamente 250 km) se dividió el área de estudio en 3 zonas: norte, sur y este (
- Figura 7) y cada una de ellas en 3 sub-zonas.(C)).
- Para las zonas construidas (puerto): el borde de la estructura (
- Las líneas costeras así definidas se analizaron con *ArcMap versión 10.4*. Debido a la gran extensión de la LC (aproximadamente 250 km) se dividió el área de estudio en 3 zonas: norte, sur y este (
- Figura 7) y cada una de ellas en 3 sub-zonas. (D)).

Figura 6. Criterios para trazado de líneas de costa.

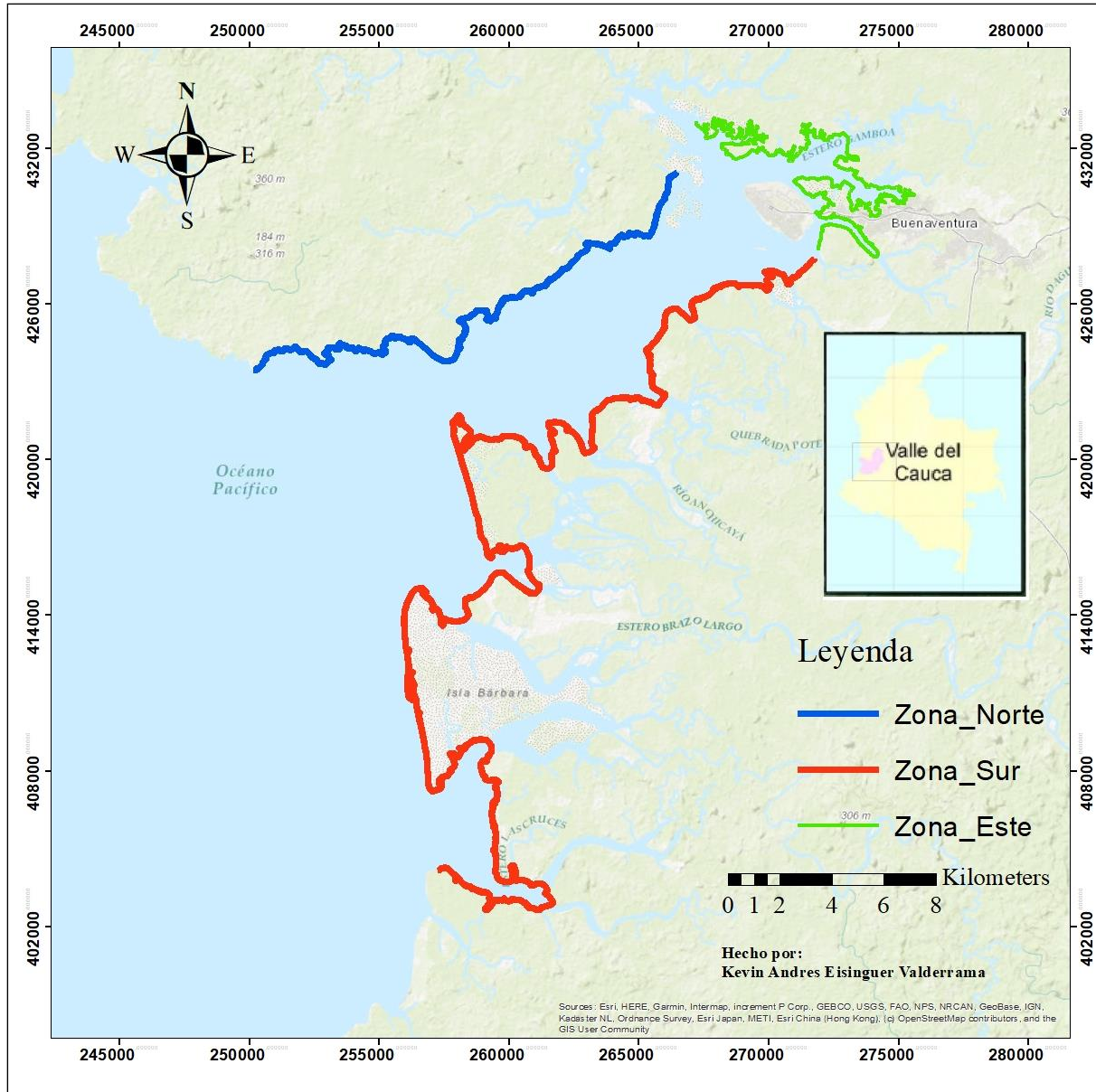


Fuente: elaboración propia, 2022.

Las líneas costeras así definidas se analizaron con *ArcMap versión 10.4*. Debido a la gran extensión de la LC (aproximadamente 250 km) se dividió el área de estudio en 3 zonas: norte, sur y este (

Figura 7) y cada una de ellas en 3 sub-zonas.

Figura 7. Área de estudio dividida en 3 zonas.



Fuente: Elaboración propia, 2022

Para facilitar el procesamiento y minimizar los errores debido a la complejidad del litoral, se digitalizó para cada uno de los años en la respectiva zona, una línea base para el posterior procesamiento con DSAS y poder calcular las tasas de cambio de la LC a partir del análisis de datos en series de tiempo. Después de esto se creó la Geodatabase unificando las líneas costeras de los años de interés, así como una paralela a la línea de costa más reciente (2021), como línea base. Posteriormente, se establecieron una serie de transectos ortogonales desde la línea base hacia las líneas costeras adjuntas, esto para hacer una comparación entre cada una ellas con la más reciente

y así determinar el retroceso o avance de los años anteriores con respecto a la más actual. Los transectos contaron con una longitud de 300 m y fueron separados entre sí a una distancia de 10 m de acuerdo con la extensión de la línea de costa, para obtener mayor detalle en el cálculo de las tasas de cambio, EPR, LRR y NSM, que proveen información acerca de la magnitud y las tendencias de los cambios en la zona estudiada. Sin embargo, la estadística estimada por DSAS de mayor connotación y mayormente empleada en esta investigación fue la tasa de punto final (EPR), dado que es una tasa de cambio que se calcula mediante la división entre la distancia del movimiento de la línea costera y el tiempo transcurrido entre la línea costera más antigua y la más actual (Thieler et al., 2009), por tanto, debe ser comprendida como la cantidad en metros del desplazamiento de la línea costera, en el periodo de análisis.

Se clasificaron los procesos de acreción y erosión (Tabla 3) determinados de acuerdo con las categorías de evolución costera propuestas por (Del Río et al., 2013).

Tabla 3. Clasificación de los procesos de erosión y acreción de la línea costera, con base en estadística EPR.

Clase	Rango EPR (m/año)	Clasificación de los procesos de cambios de la línea costera
1	< -15	Erosión muy alta
2	< -5 a -15	Erosión alta
3	< -2 a -5	Erosión moderada
4	-2 a < 2	Estable
5	>2 a 5	Acreción moderada
6	>5 a <15	Acreción alta
7	>15	Acreción muy alta

Nota: tomado de (Del Río et al., 2013).

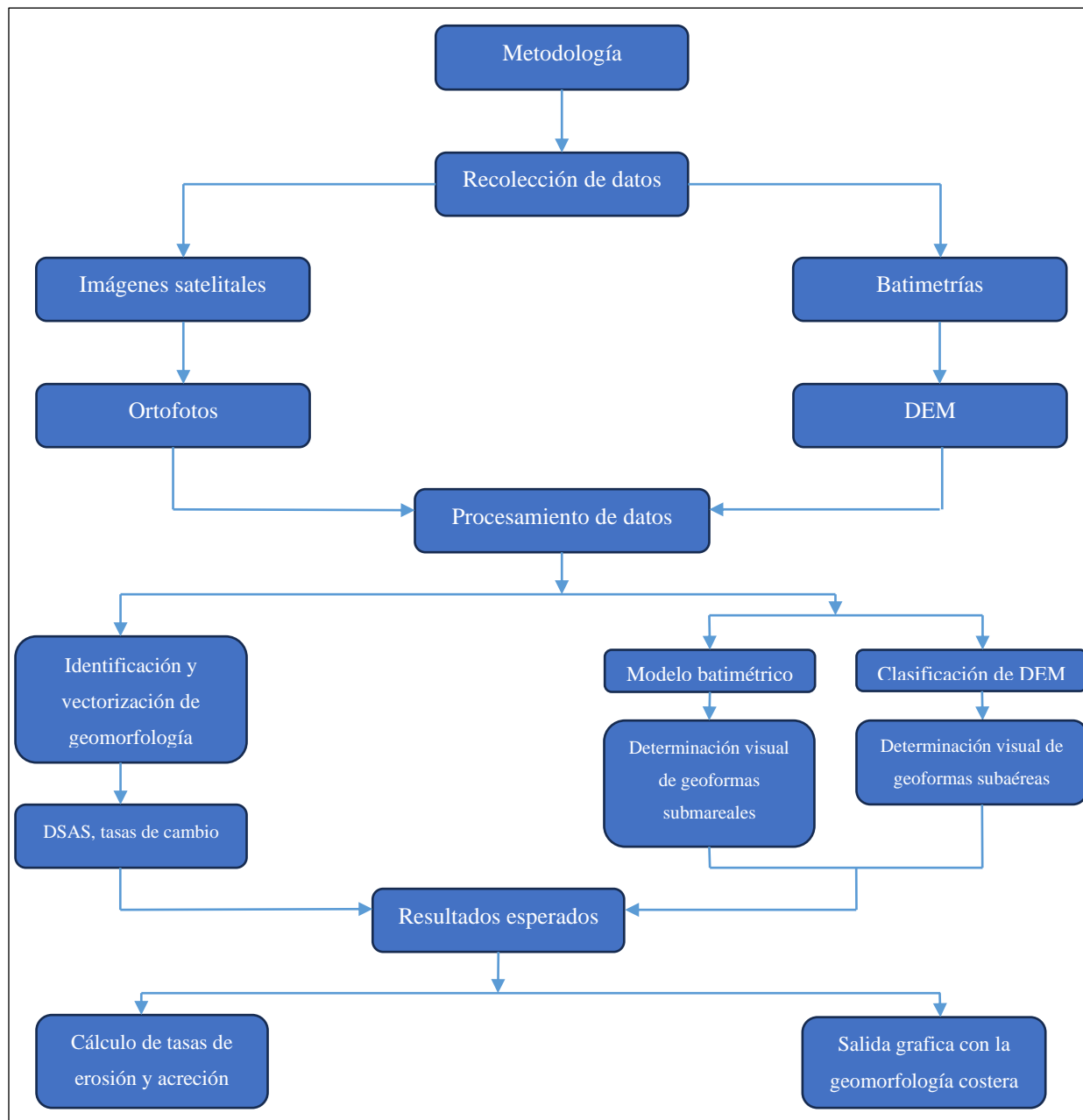
Para determinar las geoformas del fondo de la Bahía de Buenaventura, se utilizaron las batimetrías proporcionadas por DIMAR-CCCP. Este análisis se realizó mediante el software ArcMap de ArcGIS, generando modelos batimétricos (ráster) para las superficies, a partir de los archivos XYZ. Posteriormente y teniendo en cuenta lo estipulado en la guía de identificación de geoformas costeras según la Organización Hidrográfica Internacional (2017) se identificaron las geoformas presentes en la bahía. Mientras que para identificar las unidades geomorfológicas

emergidas por medio de ArcMap se clasificó el DEM y se asignó una gama de colores para distinguir alturas y así caracterizar las unidades presentes.

A continuación, se presenta un esquema de la metodología utilizada en este proyecto de investigación

Figura 8. Esquema metodológico.

Figura 8. Esquema metodológico.



7. Resultados

7.1. Línea de costa.

7.1.1. Zona Norte 1.

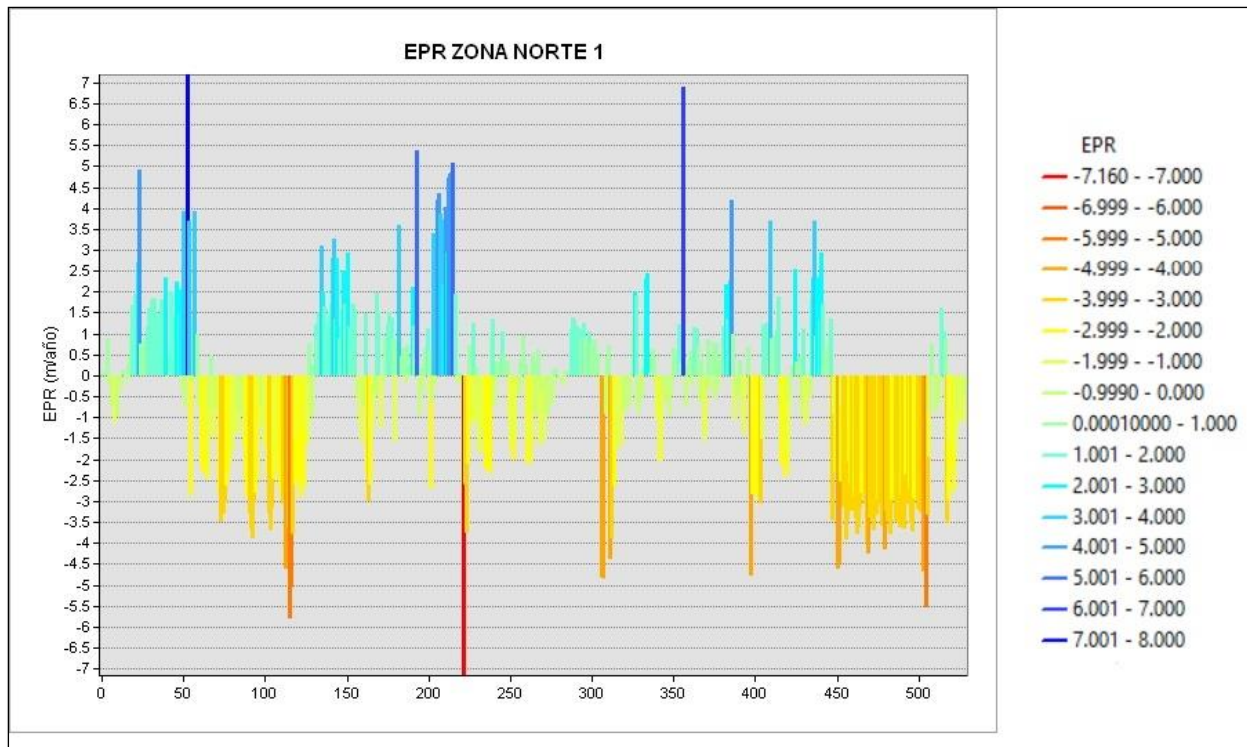
Basados en el análisis de los resultados del estadístico EPR Tabla 4. Resultados de EPR en la LC de la zona norte 1., se logró identificar que un 67.30% de los transectos ortogonales a la LC analizada, presentan un comportamiento que clasifica a esta zona como estable, debido a que los valores de EPR (Fuente: Elaboración propia, 2023

Figura 9) se encuentran en un intervalo entre -2 m/año a 2 m/año (los valores negativos representan erosión y los positivos acreción), sin embargo, el 23.44% de los transectos en la LC se ubican en el intervalo entre -5 m/año a -2 m/año, lo que se traduce como erosión moderada. También se encontró que un 7.75% están entre 2 m/año y 5 m/año, valores que clasifican este porcentaje de la LC en acreción moderada. Por otro lado, en la zona norte 1, se encontraron áreas con alta acreción (intervalos entre 5 m/año a 15 m/año) y áreas con alta erosión (intervalos entre -15 m/año a -5 m/año), cuyos porcentajes de LC son de 0.76% para ambos, siendo 7.19 m/año y -7.16 m/año los cambios más significativos encontrados en esta área, en el tiempo estudiado. En promedio se encontró una tasa de cambio de -0.45 m/año en la LC de la zona norte 1, lo que la mantiene en la clasificación de área estable.

Tabla 4. Resultados de EPR en la LC de la zona norte 1.

Extensión de la LC (%)	Clasificación de los procesos de cambio de la LC (EPR m/año)	Cambios más significativo (EPR m/año)	Promedio (EPR m/año)
0.76	-15 a -5		
23.44	-5 a -2	-7.16	
67.30	-2 a 2		-0.45
7.75	2 a 5	7.19	
0.76	5 a 15		

Fuente: Elaboración propia, 2023

Figura 9. EPR calculado para cada transecto de análisis de las líneas costeras en zona norte 1.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

El análisis basado en los resultados del estadístico NSM (Tabla 5. Resultados de NSM en la LC de la zona norte 1.), arrojó que el 56% de la LC presenta tendencias erosivas, tomando como referencia cualquier valor que refleje pérdida de costa, es decir, números negativos encontrados a lo largo de la LC identificados por el NSM (

Tabla 6. Resultados de LLR en la LC de la zona norte 1.

Extensión de la LC (%)	Cambio más significativo (LRR m/año)	Promedio (LRR m/año)
58	-5.68	
42	8.00	-0.44

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Figura 10).

El proceso de pérdida o inmersión de superficie terrestre más extremo identificado en el análisis de la zona norte 1 corresponde a una distancia de -34.21 m, esto se identificó entre 2018 a 2022 y se ubica en la zona de Pianguá Grande. Por otro lado, se encontró que el 44 % de la LC

presenta tendencias acumulativas, traducido como el movimiento neto que refleja ganancia de costa a lo largo de la LC, es decir, valores positivos de NSM. La acreción más significativa encontrada en esta área corresponde a 34.35 m identificada en el sector de Pianguita. Este movimiento neto en la LC para este punto entre 2016 y 2022, se reconoce como la expansión de la superficie emergida, identificada mediante la comparación de imágenes del sector.

Tabla 5. Resultados de NSM en la LC de la zona norte 1.

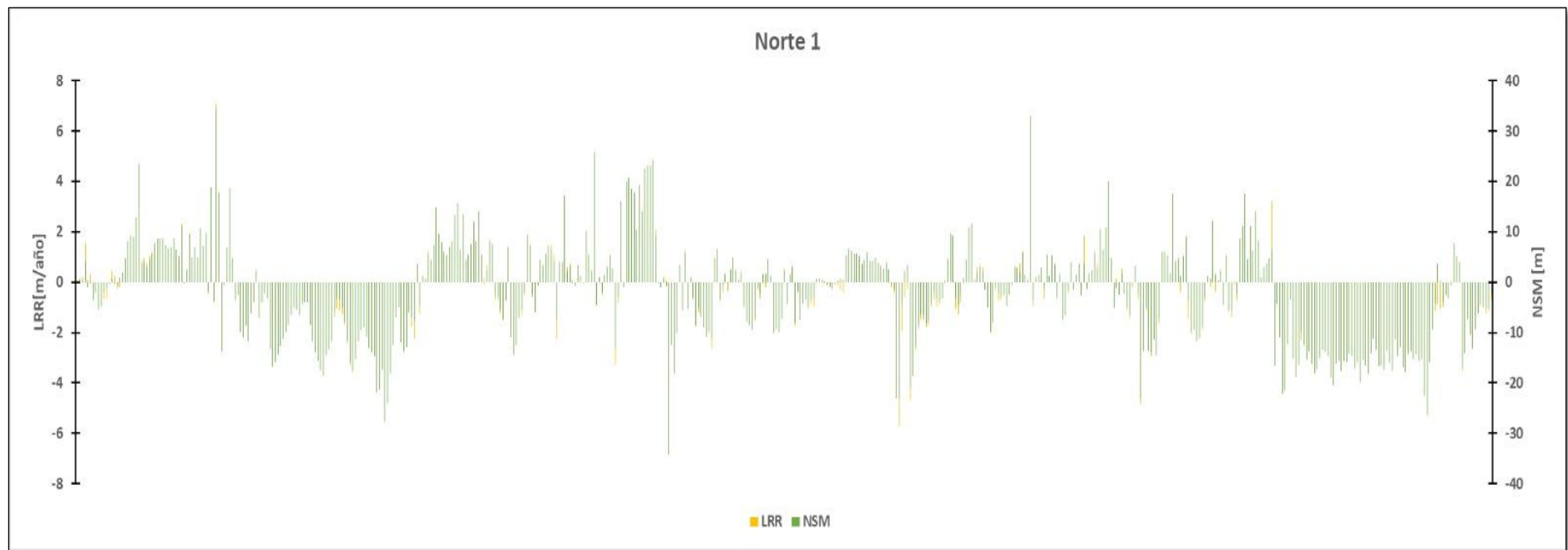
Extensión de la LC (%)	Cambios más significativo (NSM m)
56	-34.21
44	34.35

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla 6. Resultados de LLR en la LC de la zona norte 1.

Extensión de la LC (%)	Cambio más significativo (LRR m/año)	Promedio (LRR m/año)
58	-5.68	
42	8.00	-0.44

Fuente: Elaboración propia, 2023.

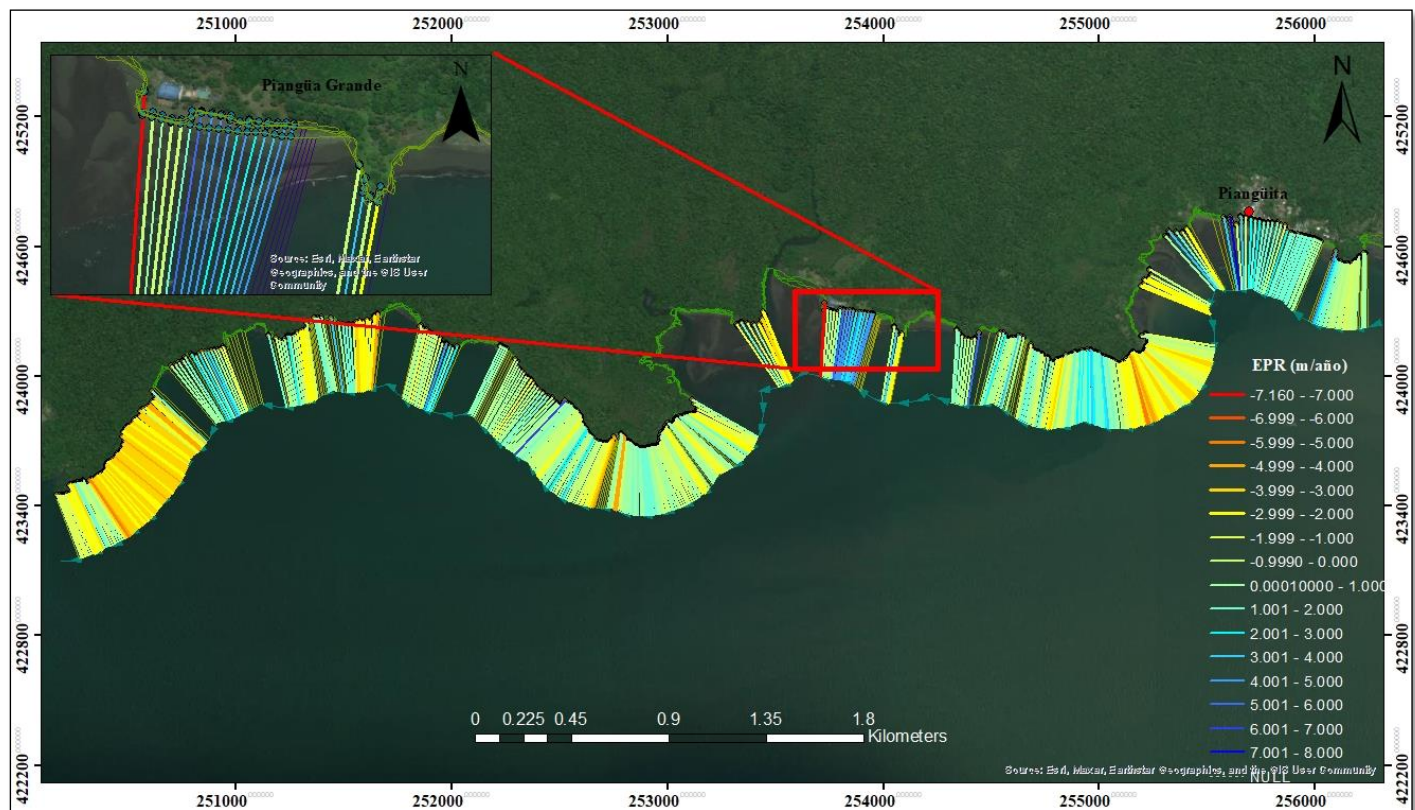
Figura 10. *NSM y LRR calculados para cada transecto de análisis de las líneas costeras en la zona norte 1.*

Fuente: Elaboración propia, 2023.

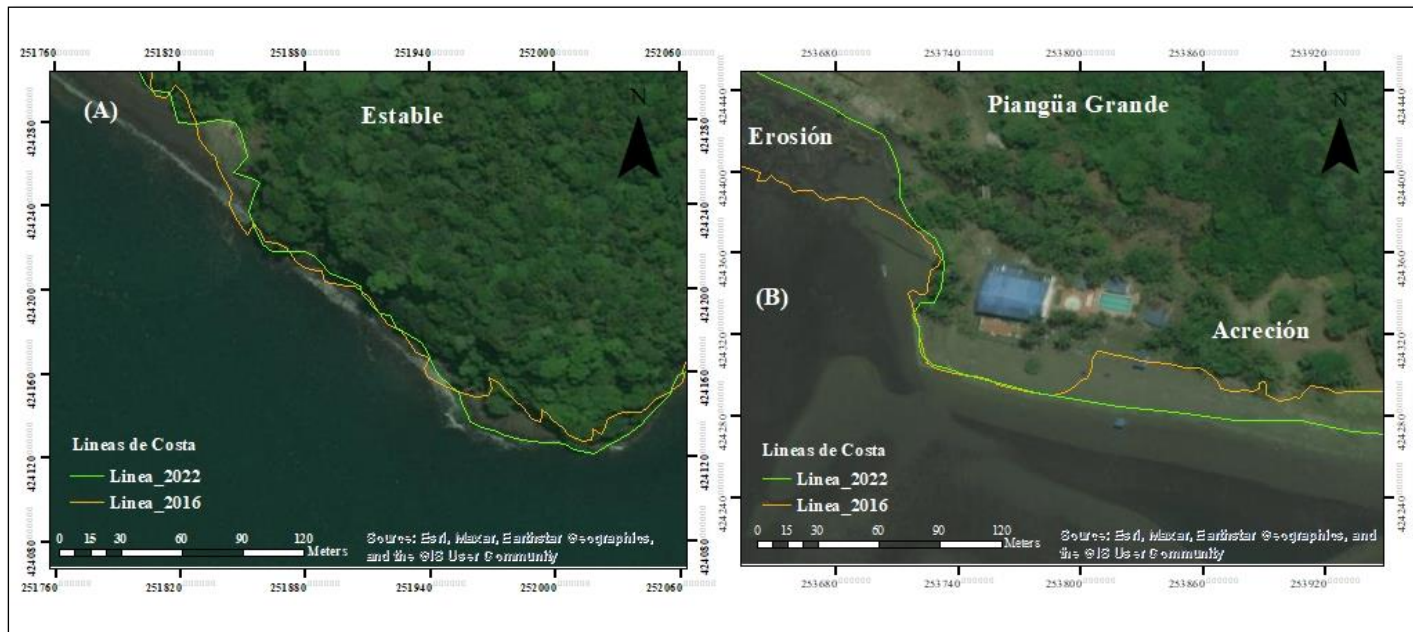
Los resultados del estadístico LRR Tabla 6. Resultados de LLR en la LC de la zona norte 1., arrojaron Figura 10.NSM y LRR calculados para cada transecto de análisis de las líneas costeras en la zona norte 1. una tendencia a la pérdida de terreno marcada en el 58% de la LC, cuyo valor calculado más significativo es de -5.68 m/año y con un promedio general de -0.44 m/año. Correspondiente a lo encontrado en el estadístico NSM, donde se presenta mayores tendencias erosivas, siendo el LRR un complemento del análisis del NSM. Este promedio de LRR, también coincide con la clasificación de estable que recibe la zona por parte del estadístico principal en esta investigación EPR ya que el valor de tasa de cambio se encuentra entre -2 m/año a 2 m/año.

Conforme a los promedios obtenidos en los estadísticos analizados en la zona norte 1, se logra clasificar como un área estable Figura 12. (A), sin embargo, hay áreas con erosión y acreción a lo largo de toda la LC Figura 12. (B), los procesos de pérdida de litoral más significativos en la zona norte 1 (**¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.**) entre 2016 y 2022 están ubicados en el área de Pianguá Grande y al sur de Pianguíta. Por otro lado, los procesos acumulativos más importantes en el tiempo estudiado se encuentran en la playa de Pianguíta y en una zona aledaña a Bazán-Bocana, dejando en evidencia la alta dinámica de la zona.

Figura 11. Procesos de erosión y acreción en la zona norte 1 del área de estudio, fuente: elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Figura 12. LC en la zona norte 1.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

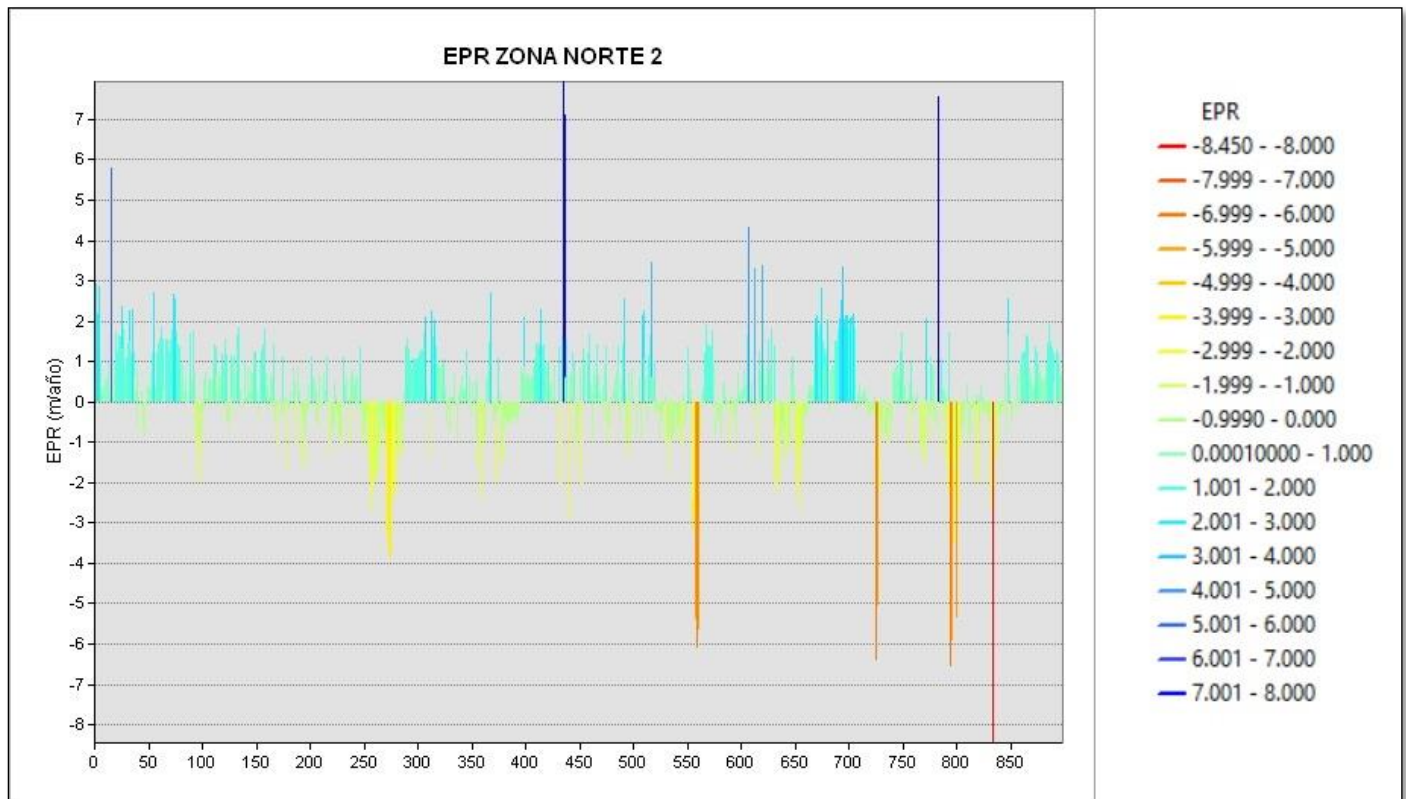
7.1.2. Zona norte 2.

De acuerdo al estadístico EPR Figura 13, se identificó que el 90.21% de transectos de LC analizada presentan comportamientos que la clasifican como estable, esto debido a los valores de EPR se encuentran entre los -2 m/año a 2 m/año, sin embargo, el 3.67% de la LC presenta erosión moderada (valores entre -5 m/año a -2 m/año), el 1% erosión alta (valores entre -15 m/año a -5 m/año), el 4.67% acreción moderada (valores entre 2 m/año a 5 m/año) y el 0.44% acreción alta (valores entre 5 m/año a 15 m/año). Los cambios más significativos de EPR en la zona norte 2 en el tiempo de estudio son -8.45 m/año y 7.94 m/año, y presenta un promedio de 0.19 m/año, afirmando así que dicha zona se clasifica como estable.

Tabla 7. Resultados de EPR en la LC de la zona norte 2.

Extensión de la LC (%)	Clasificación de los procesos de cambio de la LC (EPR m/año)	Cambios más significativos (EPR m/año)	Promedio (EPR m/año)
1.00	-15 a -5		
3.67	-5 a -2	-8.45	
90.21	-2 a 2		0.19
4.67	2 a 5	7.94	
0.44	5 a 15		

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Figura 13. EPR calculado para cada transecto de análisis de las líneas costeras en la zona norte 2.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Los resultados del estadístico NSM Tabla 8. Resultados de NSM en la LC de la zona norte 2. proyectaron que el 60.07% de la LC presenta acreción, tomando acreción como cualquier valor positivo en metros arrojado por este estadístico

Tabla 9. Resultados de LRR en la LC de la zona norte 2.

Extensión de la LC (%)	Cambio más significativo (LRR m/año)	Promedio (LRR m/año)
47	-6.81	
53	8.68	-0.01

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Figura 14, el proceso acumulativo más significativo en esta zona es de 37.96 m y se ubica a la entrada del Estero Santa Delicia en la Bahía interna de Buenaventura, por otro lado, el 39.93% de la LC muestra procesos de pérdida de terreno, el cambio más significativo en cuanto a erosión encontrado en la LC corresponde a -40.3 m y se encuentra ubicado a la entrada de la bahía interna. El movimiento neto promedio basado en el NSM es de 0.91 m para la zona norte 2.

Tabla 8. Resultados de NSM en la LC de la zona norte 2.

Extensión de la LC (%)	Cambios más significativos (NSM m)
39.93	-40.3
60.07	37.96

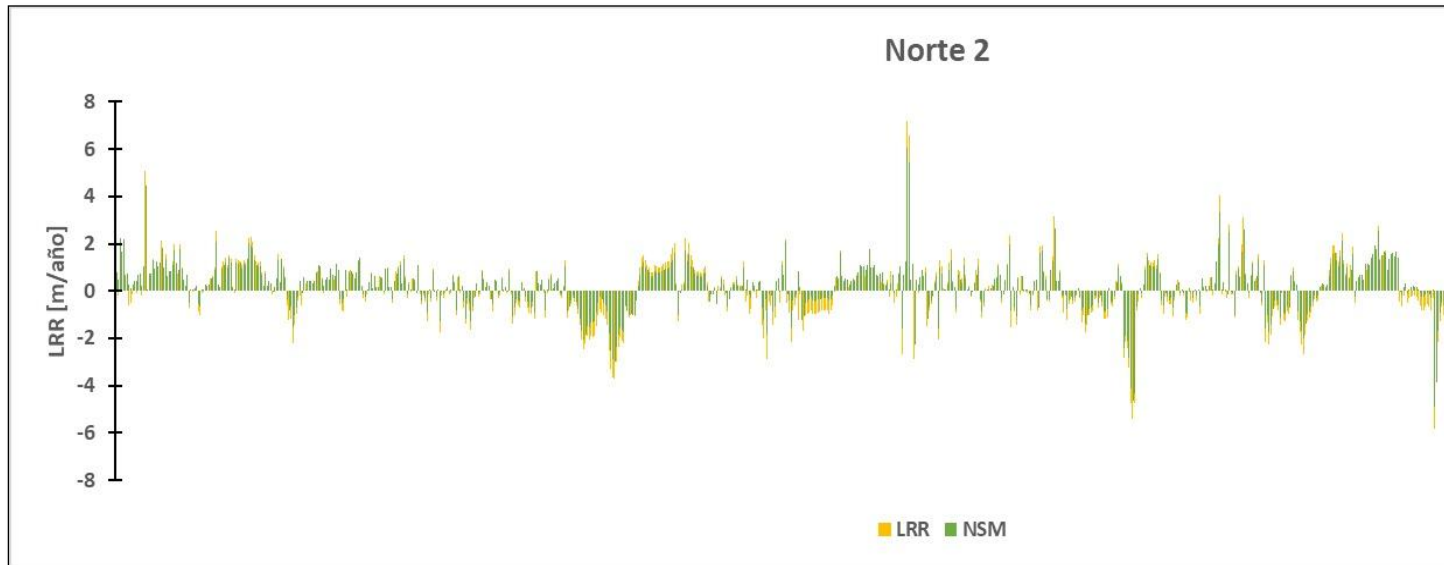
Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla 9. Resultados de LRR en la LC de la zona norte 2.

Extensión de la LC (%)	Cambio más significativo (LRR m/año)	Promedio (LRR m/año)
47	-6.81	
53	8.68	-0.01

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Figura 14. *NSM y LRR calculados para cada transecto de análisis de las líneas costeras en la zona norte 2.*



Fuente: Elaboración propia, 2023.

El análisis de los resultados del LRR Tabla 9. Resultados de LRR en la LC de la zona norte 2. arrojó que el 53 % de la LC presenta acreción y el 47% presenta erosión

Tabla 9. Resultados de LRR en la LC de la zona norte 2.

Extensión de la LC (%)	Cambio más significativo (LRR m/año)	Promedio (LRR m/año)
47	-6.81	
53	8.68	-0.01

Fuente: Elaboración propia, 2023.

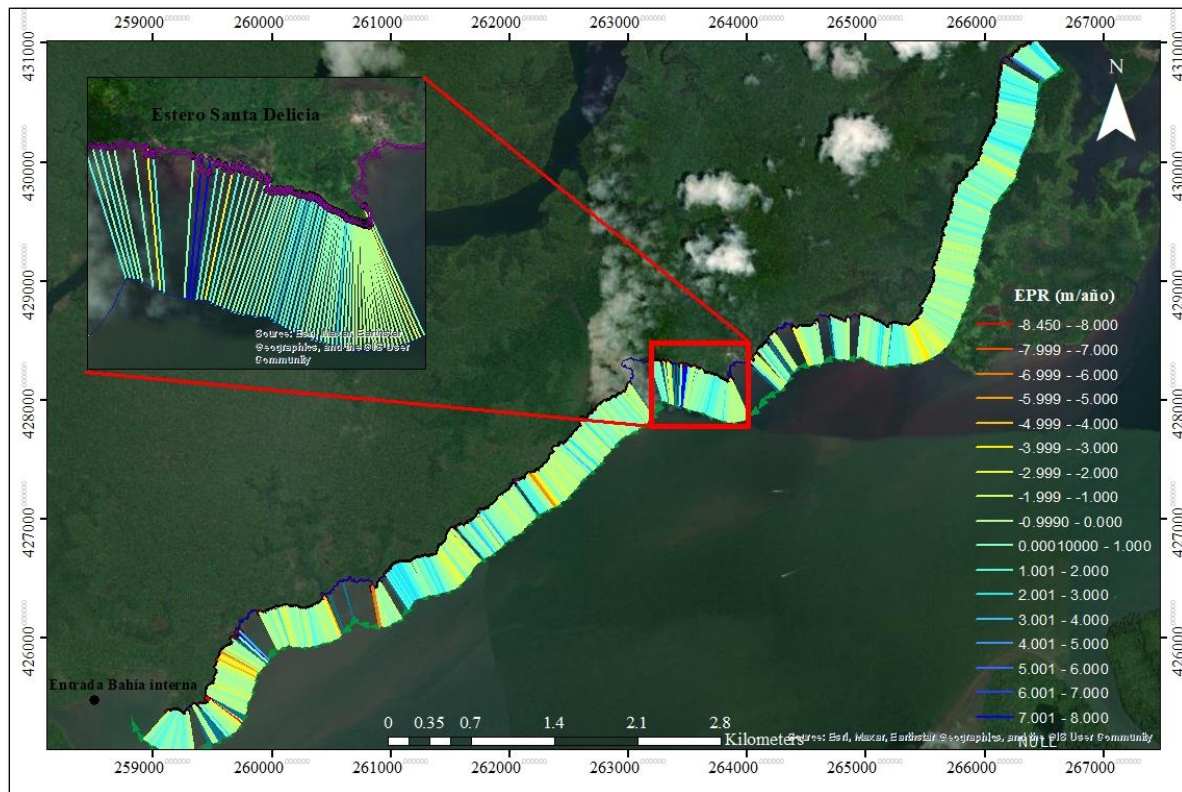
Figura 14, sus cambios más significativos son de 8.68 m/año y -6.81 m/año, con un promedio de 0.01 m/año, afirmando la información hallada por el estadístico NSM y el EPR, ya que se mantiene entre -2 m/año a 2 m/año catalogado como zona estable.

Finalmente, se clasifica a la zona norte 2 como un área estable

Figura 16. (A), basado en el promedio de la información obtenida de los tres estadísticos estudiados, sin embargo, se observa a lo largo de la LC en el intervalo de tiempo estudiado (2016 a 2022), zonas con procesos de pérdida de litoral y acumulativos marcados **Figura 15**, como el ubicado a la entrada de la bahía interna y en el Estero Santa Delicia

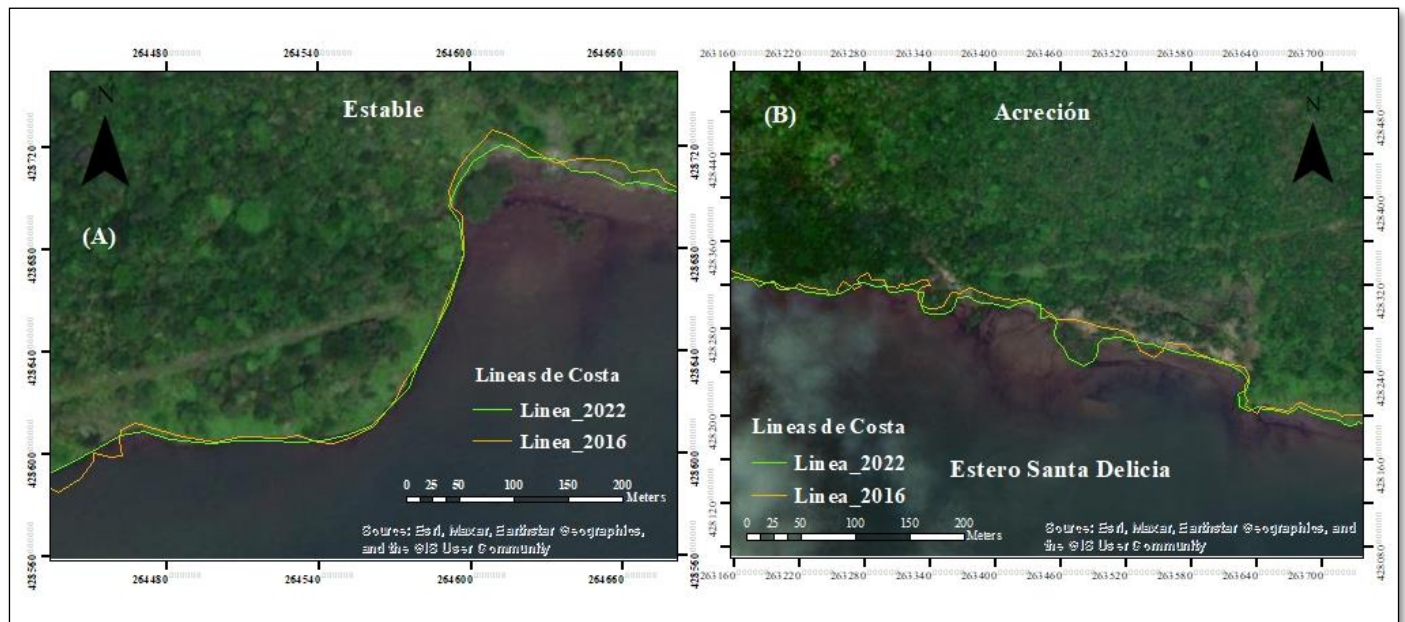
Figura 16., cuyos cambios son los más significativos en erosión y acreción respectivamente.

Figura 15. Procesos de erosión y acreción en la zona norte 2 del área de estudio.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Figura 16. LC estable y con acreción en la zona norte 2.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

7.1.3. Bazán-Bocana

En el área de Bazán-Bocana, el análisis de los resultados del estadístico EPR Tabla 10. Resultados de EPR en la LC de Bazán Bocana. indico que el 60% de la LC, se encuentran en una clasificación estable, con valores entre los -2 m/año a 2 m/año Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla 11. Resultados de NSM en la LC de Bazán Bocana.

Extensión de la LC (%)	Cambios más significativos (NSM m)
65.09	-14.02
34.91	24.84

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla 12. Resultados de LRR en la LC de Bazán Bocana.

Extensión de la LC (%)	Cambio más significativo (LRR m/año)	Promedio (LRR m/año)
66.18	-6.81	
33.45	5.5	0.51

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Figura 17, sin embargo, el 26.55% de la LC corresponde a zonas afectadas por procesos de pérdida de terreno, cuyos valores de EPR se encuentran entre los -2 m/año a -5 m/año, lo que corresponde a erosión moderada, con un valor significativo de -2.94 m/año. Por otro lado, se encontraron zonas con acreción moderada con valores de EPR entre 2 m/año a 5 m/año y acreción alta con valores de 5 m/año a 15 m/año, los que corresponden al 12.73 % y 0.75% respectivamente, con un valor significativo en procesos acumulativos entre 2016 y 2022 de 5.2m/año. En promedio se obtuvo una tasa de cambio para toda la LC de -0.49 m/año, afirmando que esta área se clasifica como estable.

Tabla 10. Resultados de EPR en la LC de Bazán Bocana.

Extensión de la LC (%)	Clasificación de los procesos de cambio de la LC (EPR m/año)	Cambios más significativos (EPR m/año)	Promedio (EPR m/año)
26.55	-5 a -2		
60.00	-2 a 2	5.2	
12.73	2 a 5		-0.49
0.75	5 a 15	-2.94	

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla 11. Resultados de NSM en la LC de Bazán Bocana.

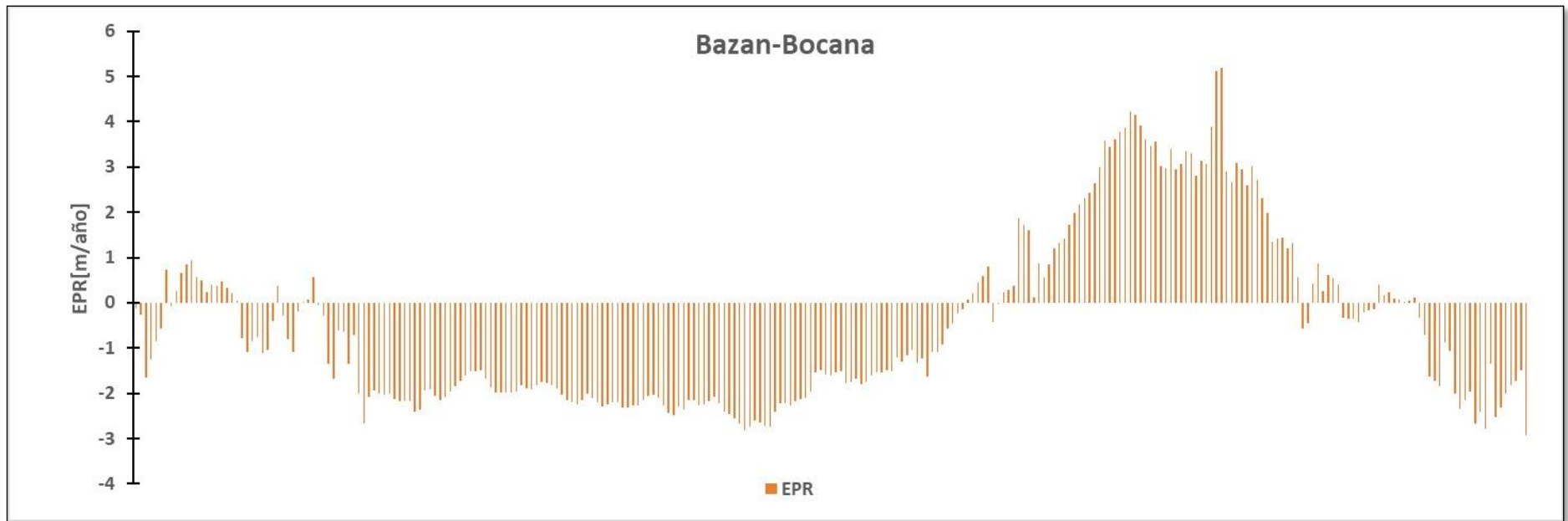
Extensión de la LC (%)	Cambios más significativos (NSM m)
65.09	-14.02
34.91	24.84

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla 12. Resultados de LRR en la LC de Bazán Bocana.

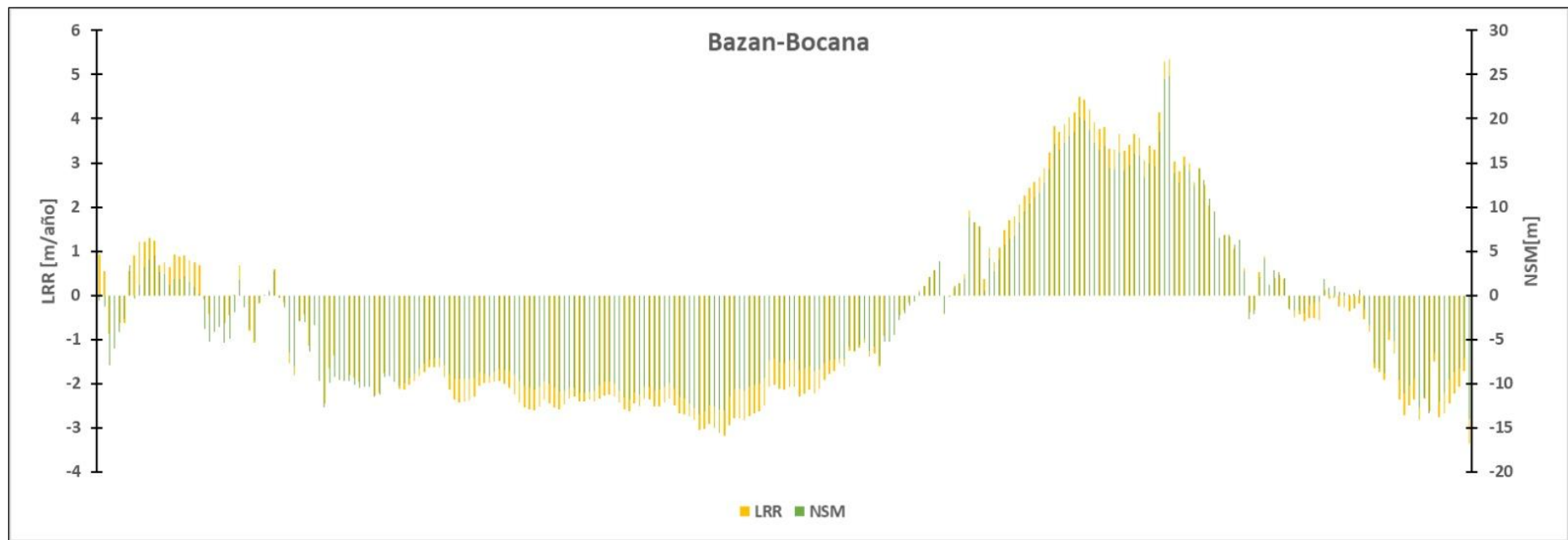
Extensión de la LC (%)	Cambio más significativo (LRR m/año)	Promedio (LRR m/año)
66.18	-6.81	
33.45	5.5	0.51

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Figura 17. EPR calculado para cada transecto de análisis de las líneas costeras en el área Bazán-Bocana.

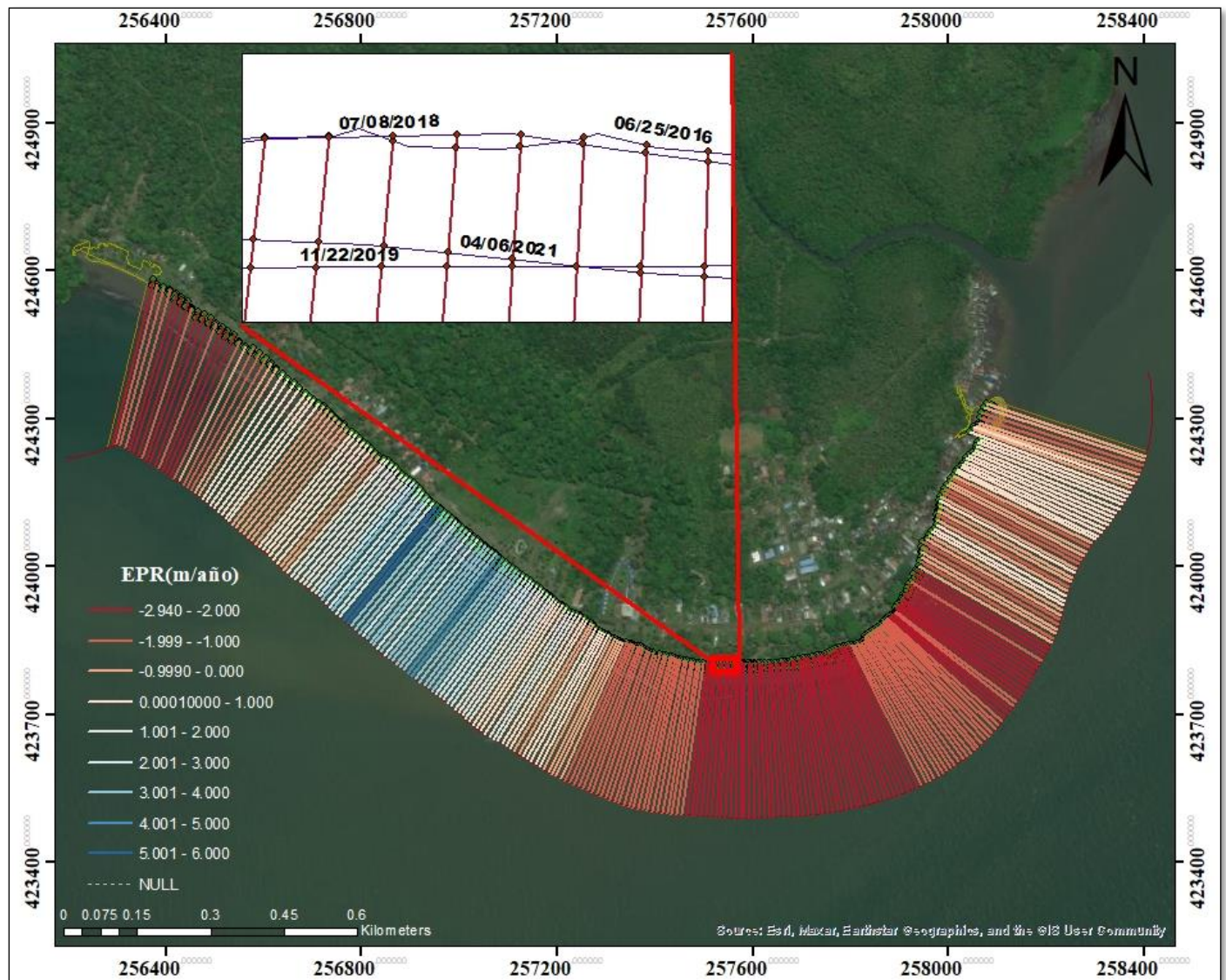
Fuente: Elaboración propia, 2023.

Mientras, en el análisis de los resultados del NSM Tabla 11. Resultados de NSM en la LC de Bazán Bocana. se encontró que el 65.09% de la LC presenta tendencias erosivas, tomando como referencia cualquier valor que refleje pérdida de litoral, es decir, números negativos de NSM Figura 18, esta tendencia es confirmada por medio del estadístico LRR Tabla 12. Resultados de LRR en la LC de Bazán Bocana. que arrojó en esta área procesos erosivos en el 66.18% de la LC. La pérdida de litoral más marcada registrada por el NSM en la LC es de -14.02 m. Correspondiente al 34.91% de la LC (NSM) y el 33.45% (LRR) responden a tendencias acumulativas, su cambio más significativo en cuanto a acreción es de 24.84 m (NSM), el promedio de tasa de cambio LRR es de 0.51 m/año.

Figura 18. *NSM y LRR calculados para cada transecto de análisis de las líneas costeras en el área Bazán-Bocana.*

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Bazán-Bocana Figura 19 se clasifica como un área estable debido a que la mayoría de sus transectos se encuentran en el intervalo entre -2 m/año a 2 m/año, sin embargo, cabe mencionar que en la LC de esta zona también se presentan procesos erosivos y acumulativos marcados que han variado a través del tiempo, demostrando la dinámica susceptible al cambio en el ambiente costero.

Figura 19. Procesos de erosión y acreción en Bazán-Bocana, fuente: elaboración propia.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

7.1.4. Zona Este.

En esta zona se han omitido los resultados, puesto que, solo se tenía una ortofoto del año 2016 y una imagen satelital del año 2022, por ende, el número de LC obtenidas en el área era bajo y la representatividad de los resultados se veía desdibujada por la falta de información con respecto a las demás zonas.

7.1.5. Zona Sur 1.

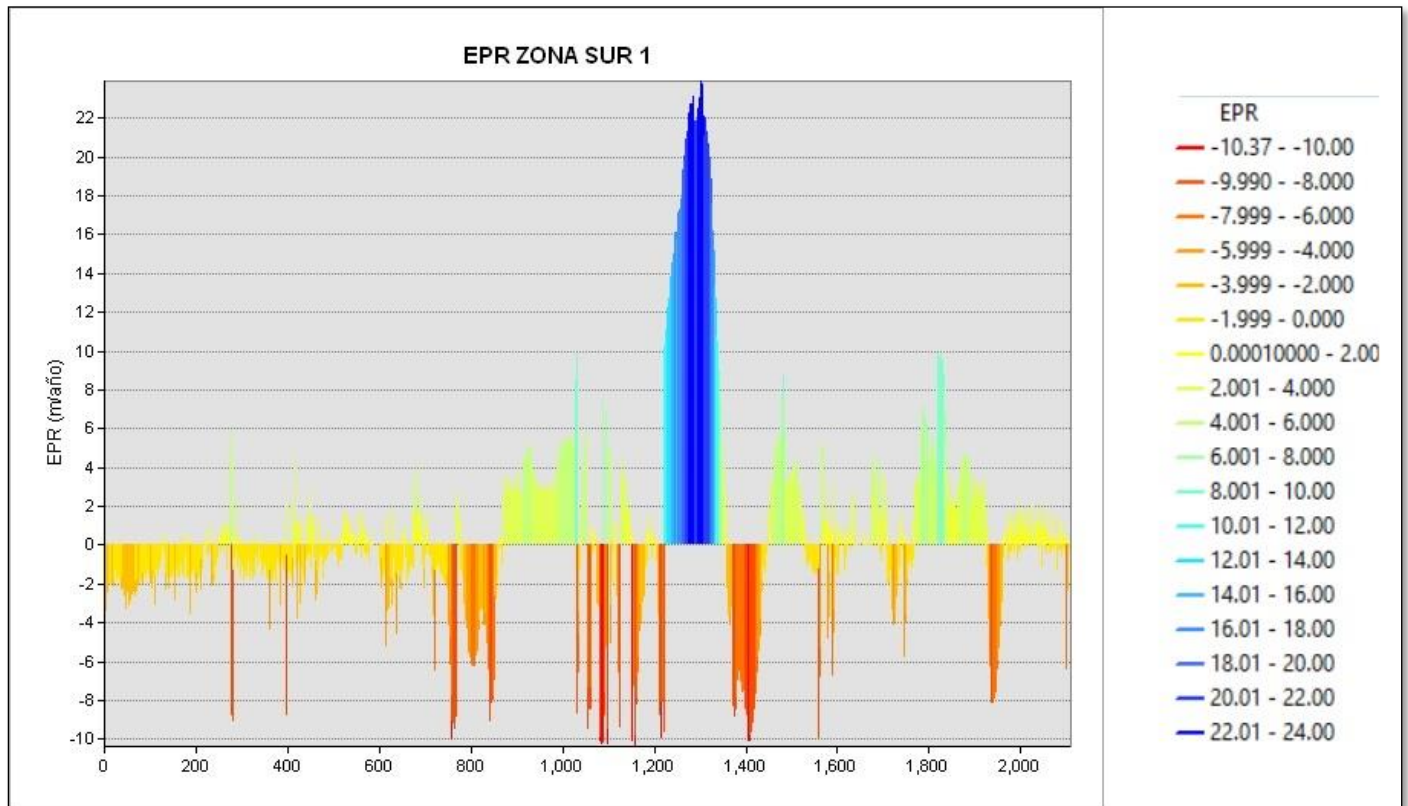
El análisis de los resultados de EPR Tabla 13. Resultados de EPR en la LC de la zona sur 1., en la zona sur 1, permitió identificar que el 53.36% de la LC cuenta con valores de EPR entre los -2 m/año a 2 m/año (

Figura 20), lo que la clasifica este porcentaje de LC como estable. Sin embargo, el 16.64% de los transectos sobre LC se encuentran entre 2 m/año a 5 m/año clasificando este tramo del área con una acreción moderada, el 6.49% entre 5 m/año a 15 m/año catalogado como acreción alta y el 4.22% de la LC con valores de EPR mayores a 15 m/año lo que se traduce como acreción muy alta. Por otro lado, el 9.81% se clasifica como erosión moderada debido a que sus valores de EPR se encuentran entre -5 m/año a -2 m/año y el 9.48% se reconoce como erosión alta, ya que se encuentran en el intervalo entre -5 m/año a -15 m/año, demostrando así lo cambiante y dinámica, en el tiempo estudiado que es la zona sur 1. Los valores máximos de EPR registrados en cuanto a erosión y acreción fueron de -10.3 m/año y 23.92 m/año, respectivamente. En promedio se halló una tasa de cambio de 0.72 m/año en las LC y su análisis (2016 a 2022), confirmando así que la zona sur 1 de la bahía de Buenaventura es un área estable.

Tabla 13. Resultados de EPR en la LC de la zona sur 1.

Extensión de la LC (%)	Clasificación de los procesos de cambio de la LC (EPR m/año)	Cambios más significativos (EPR m/año)	Promedio (EPR m/año)
9.48	-15 a -5		
9.81	-5 a -2		
53.36	-2 a 2	23.92	
16.64	2 a 5		0.72
6.49	5 a 15	-10.3	
4.22	>15		

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Figura 20. EPR calculado para cada transecto de análisis de las líneas costeras en la zona sur 1.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Simultáneamente, los resultados del estadístico NSM Tabla 14. Resultados de NSM en la LC de la zona sur 1. arrojó que el 51.54% de la LC presenta tendencias erosivas, tomando como referencia cualquier valor que refleje pérdida de litoral, es decir, números negativos encontrados a lo largo de la LC identificados mediante este estadístico

Figura 21. El proceso de pérdida o inmersión de superficie terrestre más extremo identificado en el análisis de la zona sur 1 corresponde a una distancia de -49.54 m y se encuentra ubicado en el borde suroeste de Bello Horizonte. Por otro lado, se encontró que el 48.46 % de la LC presenta tendencias acumulativas, traducido como el movimiento neto que refleja ganancia de litoral a lo largo de la LC, es decir, valores positivos de NSM. La acreción más significativa encontrada en esta área corresponde a 114.31 m identificada en el sector de Bello Horizonte en el costado externo hacia la punta de esta área.

Tabla 14. Resultados de NSM en la LC de la zona sur 1.

Extensión de la LC (%)	Cambios más significativos (NSM m)
51.54	-49.54
48.46	114.31

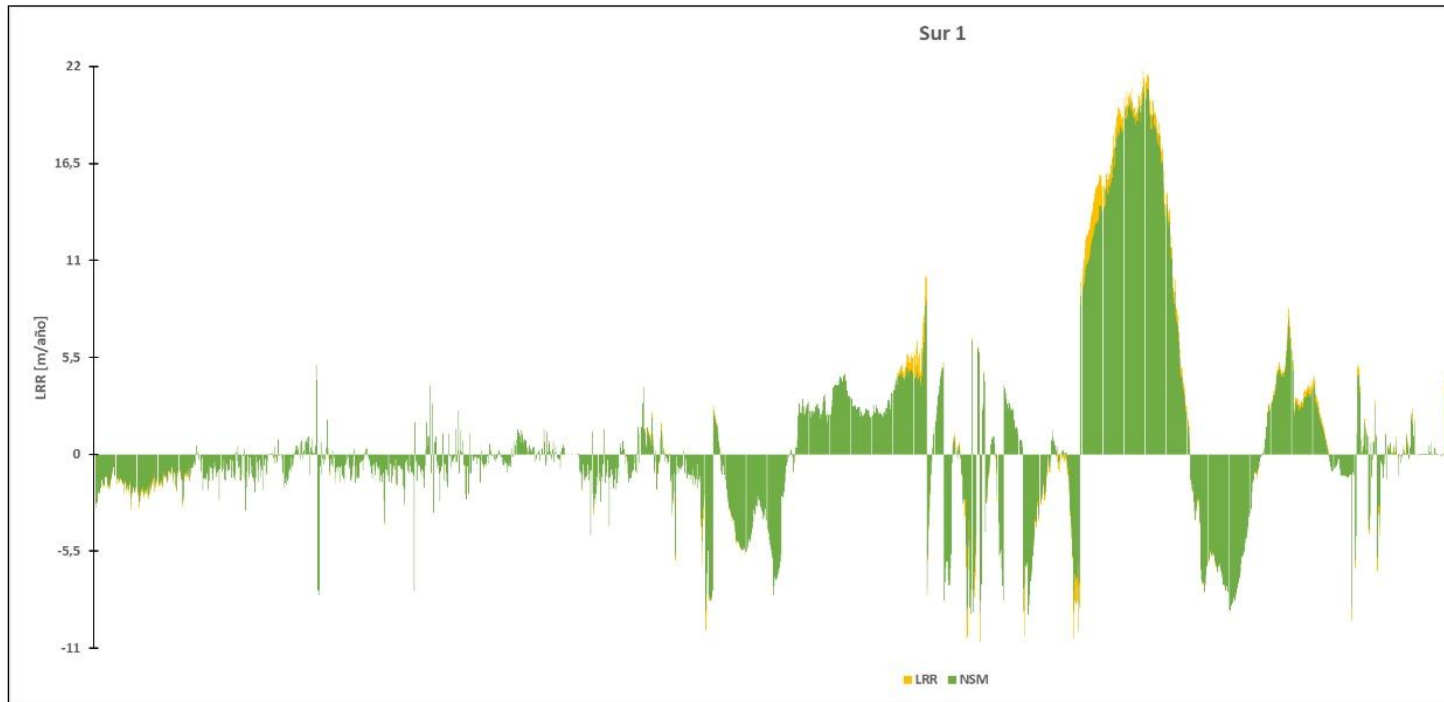
Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla 15. Resultados de LRR en la LC de la zona sur 1.

Extensión de la LC (%)	Cambio más significativo (LRR m/año)	Promedio (LRR m/año)
51.66	-4.14	
45.34	24.00	0.61

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Figura 21. *NSM y LRR calculado para cada transecto de análisis de las líneas costeras en la zona sur 1.*



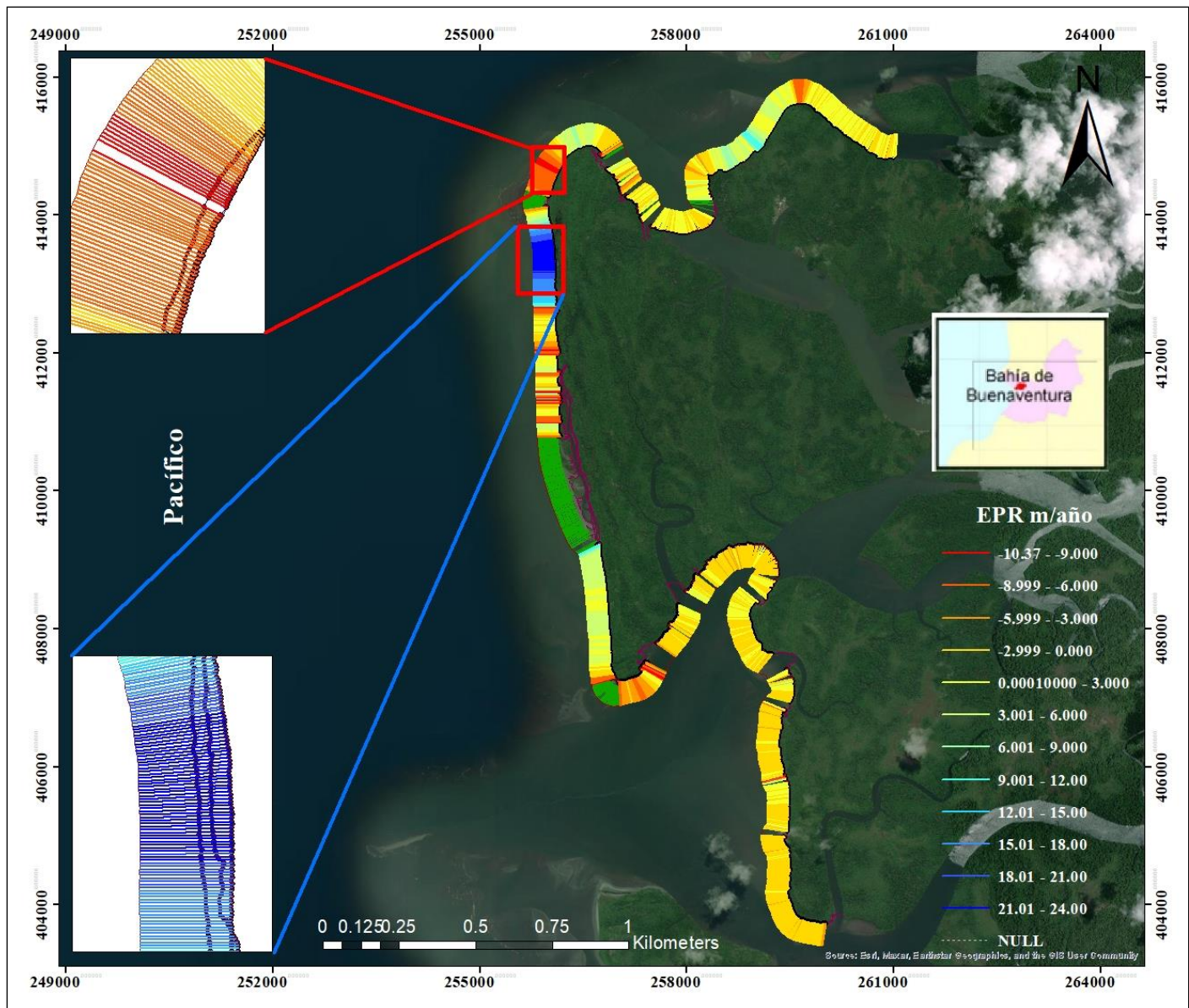
Fuente: Elaboración propia, 2023.

La zona sur 1 de la bahía de Buenaventura según el estadístico NSM presenta tendencias erosivas a lo largo de la LC, esto es confirmado por los resultados del LRR Tabla 15. Resultados de LRR en la LC de la zona sur 1.

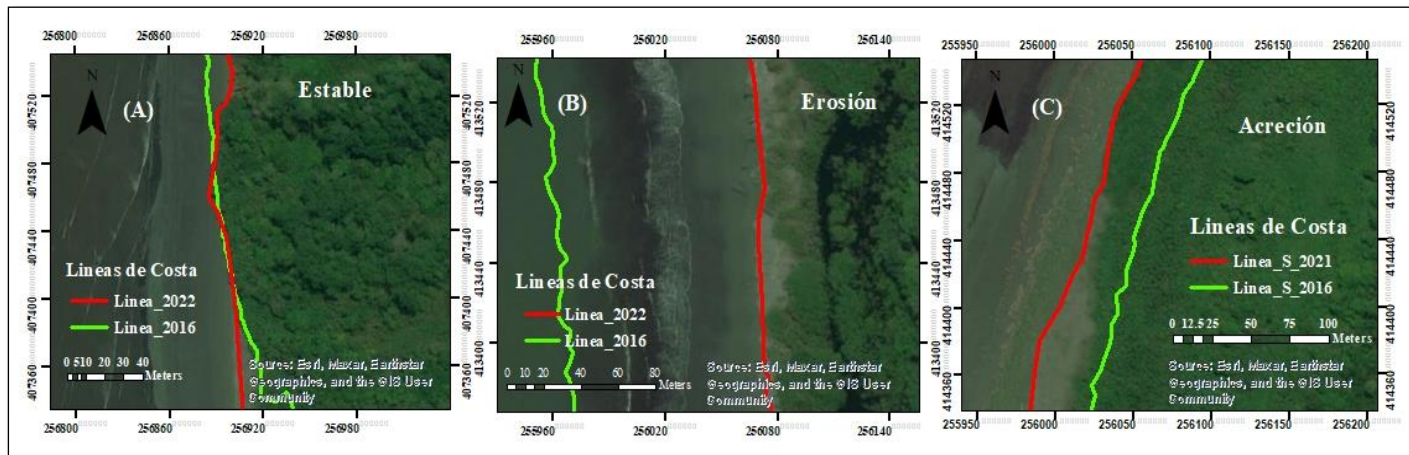
Figura **21**, ya que dicho estadístico identificó que el 51.66% de la LC sufre procesos de pérdida de litoral. Sin embargo, su promedio es de 0.61 m/año debido a los altos valores de acreción en la LC. Cabe mencionar que dicho promedio no supera el intervalo -2 m/año a 2 m/año, por lo tanto, también confirma lo arrojado por el estadístico principal en esta investigación (EPR) y clasifica a la zona sur 1 como un área estable y muy dinámica.

La zona sur 1 **Figura 22** clasifica como un área estable **Figura 23. (A)** debido a que la mayoría de sus transectos se encuentran en el intervalo entre -2 m/año a 2 m/año, sin embargo, cabe mencionar que en la LC de esta zona también se presentan procesos erosivos **Figura 23. (B)** y acumulativos **Figura 23. (C)** marcados que han variado a través del tiempo, demostrando la dinámica susceptible al cambio en el este ambiente costero.

Figura 22. *Procesos de erosión y acreción en la zona sur 1, fuente: elaboración propia.*



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Figura 23. LC estable, con erosión y acreción en la zona sur 1.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

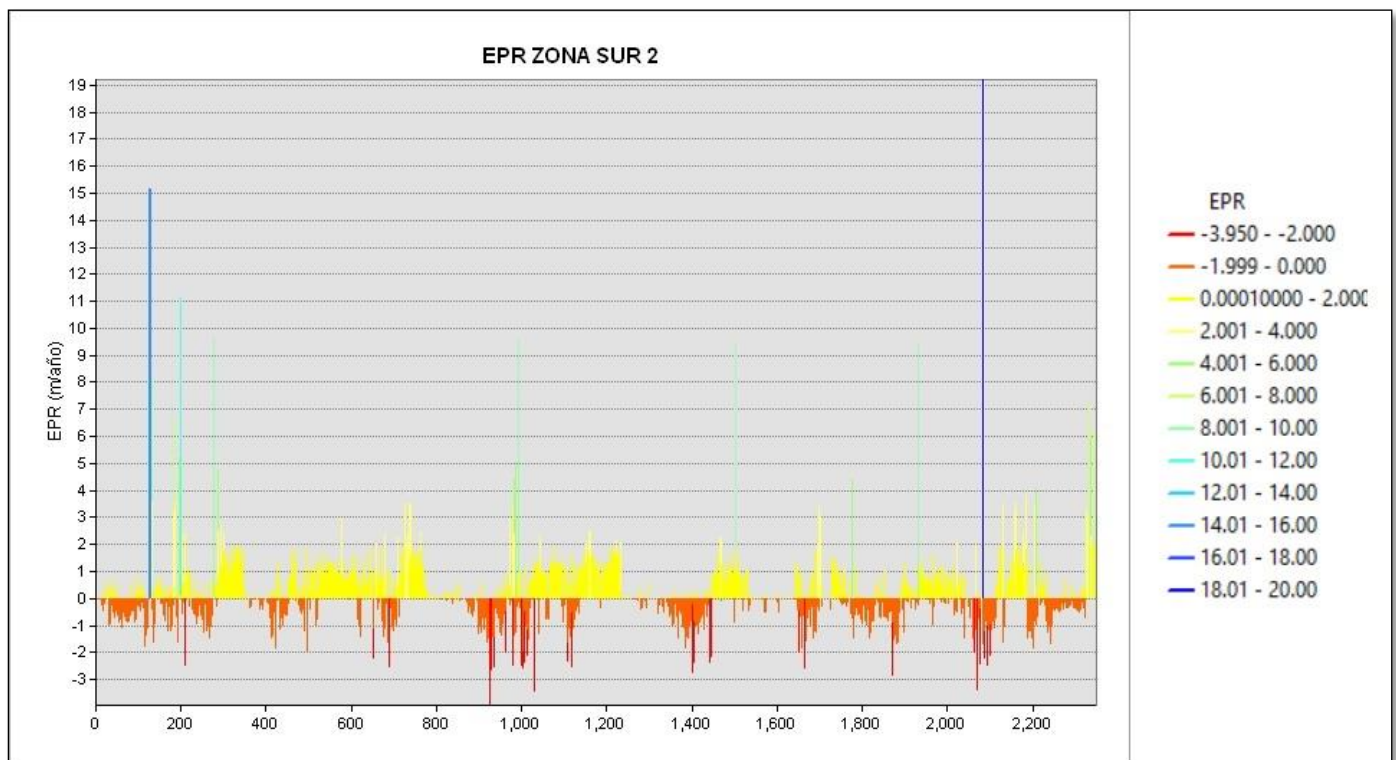
7.1.6. Zona sur 2.

En el análisis del estadístico EPR Tabla 16. Resultados de EPR en la LC de la zona sur 2. en la zona sur 2 se encontró que el 94.56% de los transectos dispuestos sobre la LC arrojaron valores que se ubican en el intervalo entre -2 m/año a 2 m/año **Figura 24** lo que clasifica la zona sur 2 como área estable. Sin embargo, cabe mencionar que en la LC se presentan zonas cuyos valores de EPR reflejan procesos de acreción y erosión. El 3.06% de la LC se encuentra entre 2 m/año a 5 m/año, lo que se clasifica como acreción moderada, el 0.89% se encuentra entre 5 m/año a 15 m/año traducido como acreción alta y el 0.17% de la LC presenta valores de EPR mayores a 15 que clasifica este tramo como zona con acreción muy alta. Por otro lado, se reconocen procesos de pérdida de litoral en el 1.32% de la LC con valores de EPR entre -5 m/año a -2 m/año traducido como erosión moderada, estos cambios a lo largo de la LC reflejan lo dinámica que es la zona. En promedio se encontró una tasa de cambio de 0.25 m/año, confirmando así que la zona sur 2 es un área estable.

Tabla 16. Resultados de EPR en la LC de la zona sur 2.

Extensión de la LC (%)	Clasificación de los procesos de cambio de la LC (EPR m/año)		Cambios más significativos (EPR m/año)	Promedio (EPR m/año)
1.32	-5 a -2			
94.56	-2 a 2		20.0	
3.06	2 a 5			0.25
0.89	5 a 15		-3.95	
0.17	>15			

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Figura 24. EPR calculado para cada transecto de análisis de las líneas costeras en la zona sur 2.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

El análisis de los resultados del estadístico NSM Tabla 17. Resultados de NSM en la LC de la zona sur 2 arrojaron que el 51.60% de la LC presenta tendencias acumulativas, tomando como

referencia cualquier valor que refleje acreción litoral, es decir, números positivos encontrados a lo largo de la LC identificados mediante este estadístico (NSM) Figura 25. El proceso de acreción más significativo identificado en el análisis de la zona sur 2 corresponde a una distancia de 91.76 m y se encuentra ubicado en la salida de brazo seco. Por otro lado, se encontró que el 42.96 % de la LC tiene procesos erosivos, traducido como el movimiento neto que refleja pérdida de litoral a lo largo de la LC, es decir, valores negativos de NSM. La erosión más significativa encontrada en esta área corresponde a -18.85 m identificado en el sector de Estero Hondo, en la Bahía interna de Buenaventura.

Tabla 17. Resultados de NSM en la LC de la zona sur 2.

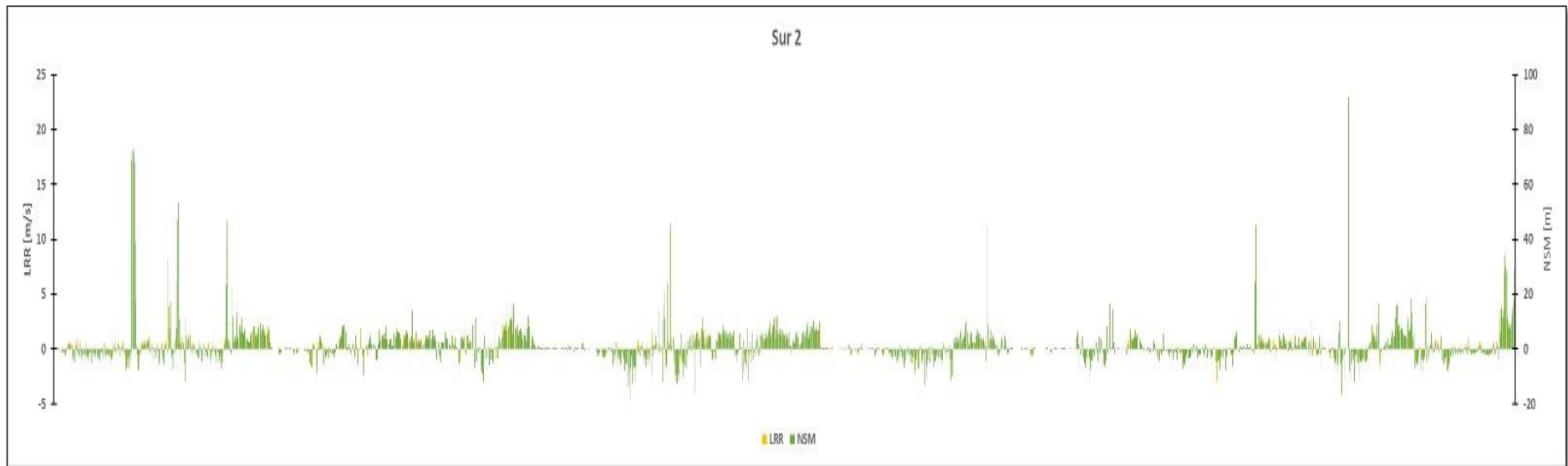
Extensión de la LC (%)	Cambios más significativos (NSM m)
42.96	-18.85
51.60	91.76

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla 18. Resultados de LRR en la LC de la zona sur 2.

Extensión de la LC (%)	Cambio más significativo (LRR m/año)	Promedio (LRR m/año)
45.73	-4.14	
54.27	24.00	0.33

Fuente: Elaboración propia, 2023.

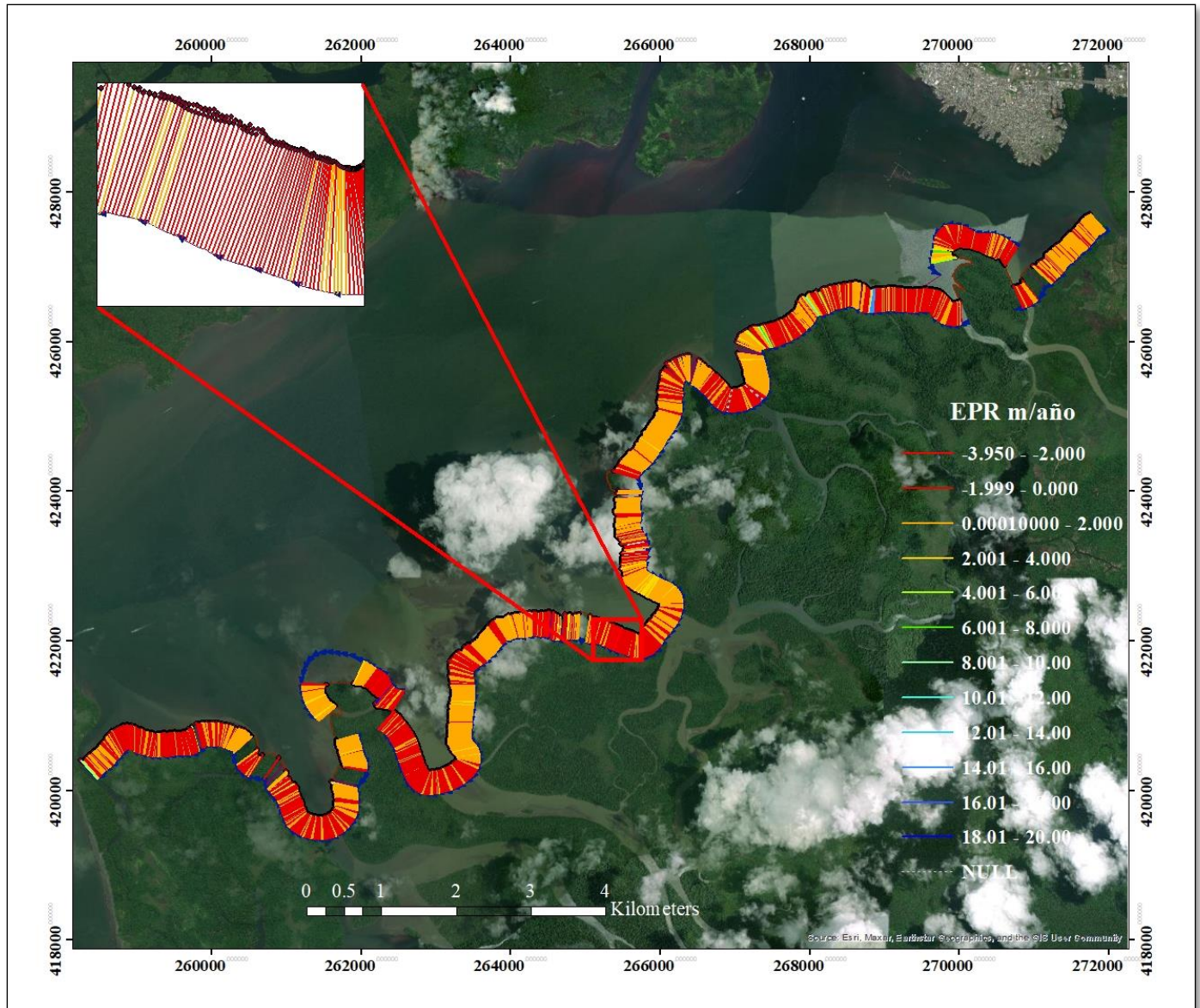
Figura 25. NSM y LRR calculado para cada transecto de análisis de las líneas costeras en la zona sur 2.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

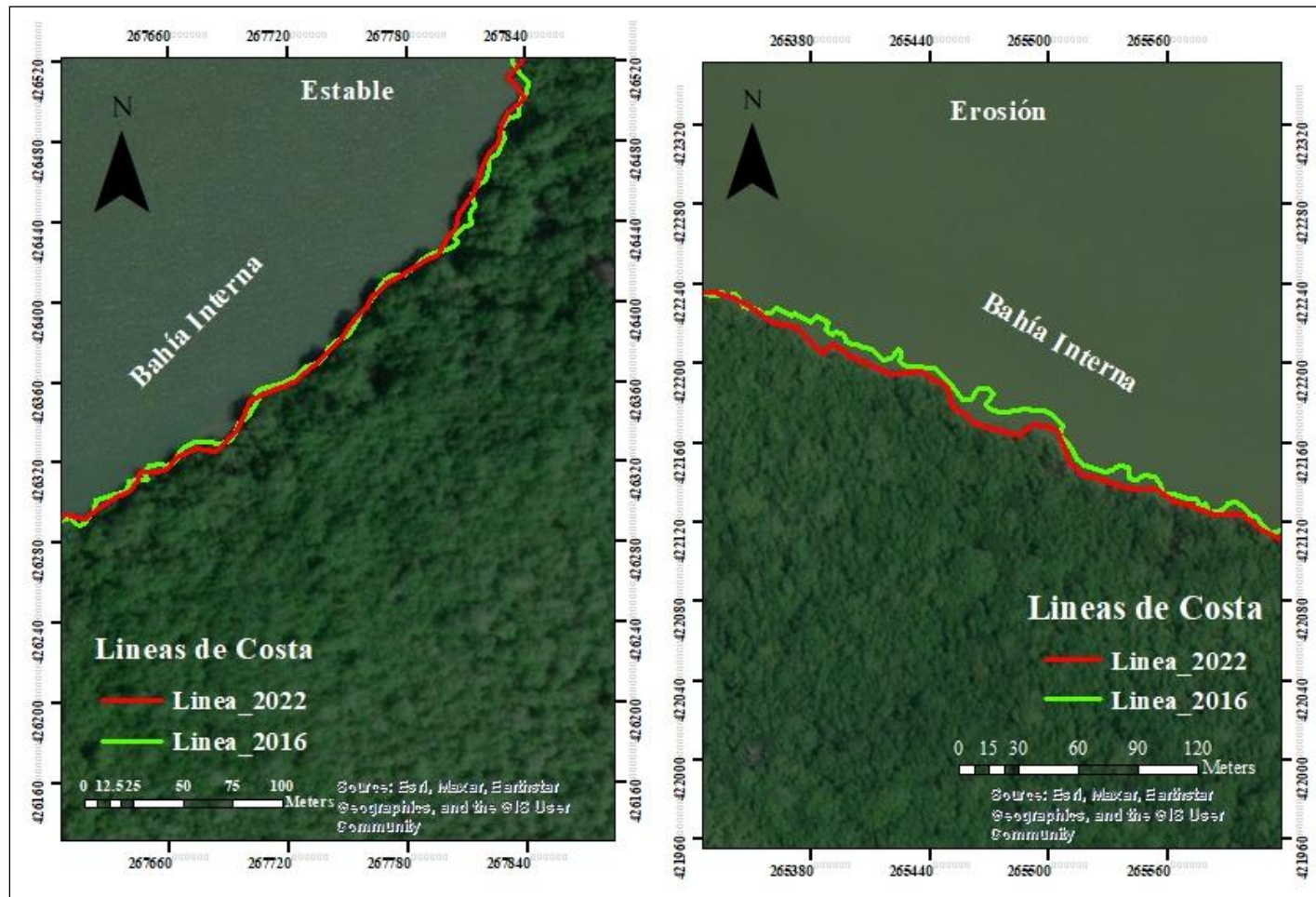
La zona sur 2 de la bahía de Buenaventura según el estadístico NSM tiene tendencias acumulativas en sus áreas a lo largo de la LC de 2016 a 2022, lo que es confirmado por el LRR (Lineal Regression Rate) Tabla 18. Resultados de LRR en la LC de la zona sur 2. Figura 25. NSM y LRR calculado para cada transecto de análisis de las líneas costeras en la zona sur 2. que arrojó como resultado principal una predisposición a la ganancia de terreno marcada en el 54.27% de la LC, cuyo promedio general de 0.33 m/año. Este promedio también coincide con la clasificación de estable que recibe la zona por parte del estadístico principal en esta investigación (EPR), ya que el valor de tasa de cambio se encuentra entre -2 m/año a 2 m/año.

La zona sur 2 Figura 26 se clasifica como un área estable Figura 27. (A) debido a que la mayoría de los transectos ortogonales dispuestos sobre la LC se encuentran en el intervalo entre -2 m/año a 2 m/año, sin embargo, cabe mencionar que en la LC de esta zona también se presentan procesos erosivos Figura 27. (B) y acumulativos marcados que han variado a través del tiempo, demostrando la dinámica susceptible al cambio en el este ambiente costero.

Figura 26. *Procesos de erosión y acreción en la zona sur 2, fuente: elaboración propia.*



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Figura 27. LC estable, y con erosión en la zona sur 2.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

7.1.7. Punta soldado

Punta Soldado es un área de mucho interés en esta investigación debido a la importancia que tiene para la comunidad de la Bahía de Buenaventura y a los fuertes procesos erosivos que viene sufriendo desde hace algunas décadas.

Al realizar el análisis de los resultados del estadístico EPR **Tabla 19**. Resultados de EPR en la LC de Punta Soldado. se encontró que a diferencia de las otras zonas, la mayor parte de los transectos dispuestos sobre la LC Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla 20. Resultados de NSM en la LC de Punta Soldado.

Extensión de la LC (%)	Cambios más significativos (NSM m)
89.83	-105.62
10.17	47.99

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla 21. Resultados de LRR en la LC de Punta Soldado.

Extensión de la LC (%)	Cambio más significativo (LRR m/año)	Promedio (LRR m/año)
89.55	-24.44	
54.27	10.66	-8.68

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Figura 28 presentan tendencias erosivas muy marcadas. El 43.87% de la LC tiene valores de EPR que están entre -5 m/año a -15 m/año, lo que encaja la zona en la clasificación de zona con erosión alta. Sin embargo, el 19.78% de la LC tiene valores de tasa de cambio EPR menores a -15 m/año traducido esto como erosión muy alta, su cambio máximo de EPR en cuanto a pérdida de litoral es de -22.1 m/año. Por otro lado, a lo largo de la LC se encuentran áreas con erosión moderada que corresponde al 10.17% de la LC, con valores entre -2 m/año a -5 m/año y estables el 22.70% de la LC entre -2 m/año a 2 m/año, no obstante, este porcentaje de LC estable es muy bajo comparado con los de procesos erosivos. En promedio en Punta Soldado, Bahía de Buenaventura, se halló una tasa de cambio (EPR) de -7.83 m/año, confirmando así que dicha área se calcifica como zona con alta erosión.

Tabla 19. Resultados de EPR en la LC de Punta Soldado.

Extensión de la LC (%)	Clasificación de los procesos de cambio de la LC (EPR m/año)	Cambios más significativos (EPR m/año)	Promedio (EPR m/año)
19.78	<15		
43.87	-15 a -5	12.0	
10.17	-5 a -2		-7.83
22.70	-2 a 2	-22.1	
1.67	2 a 5		
1.81	5 a 15		

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla 20. Resultados de NSM en la LC de Punta Soldado.

Extensión de la LC (%)	Cambios más significativos (NSM m)
89.83	-105.62
10.17	47.99

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla 21. Resultados de LRR en la LC de Punta Soldado.

Extensión de la LC (%)	Cambio más significativo (LRR m/año)	Promedio (LRR m/año)

89.55

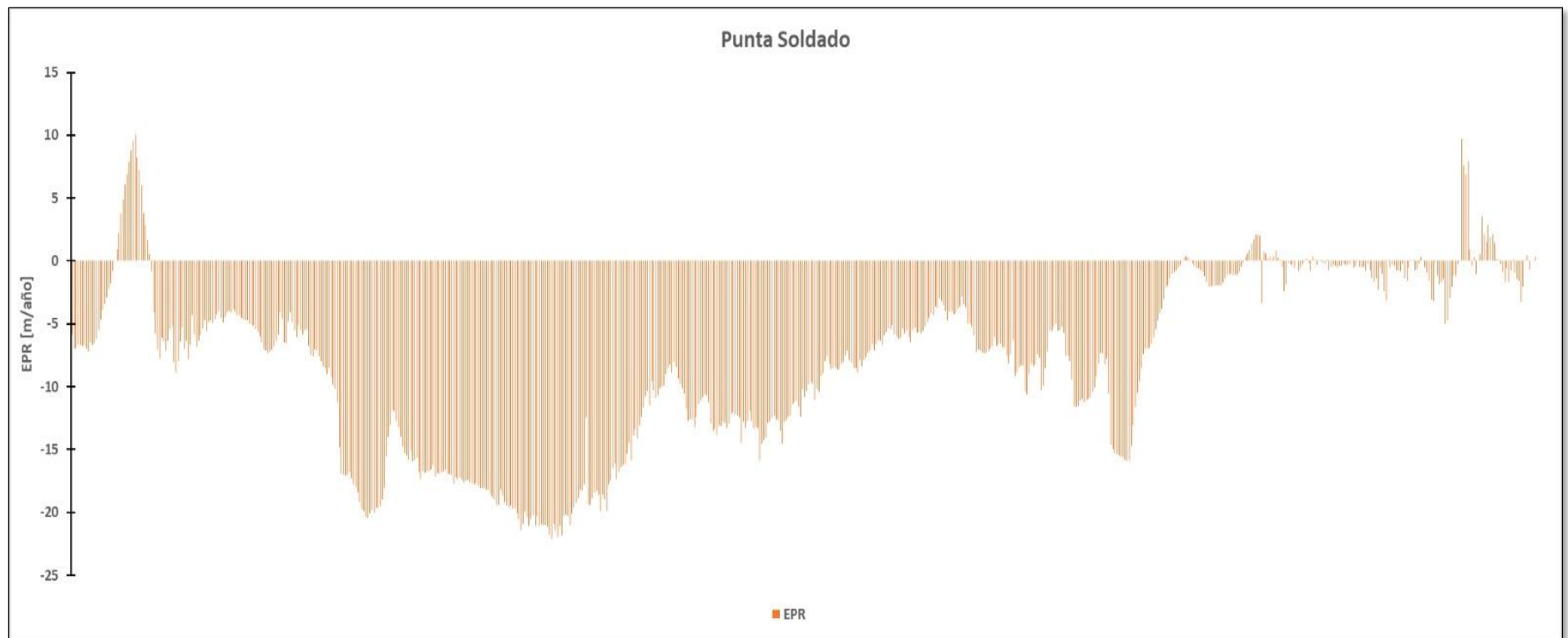
-24.44

54.27

10.66

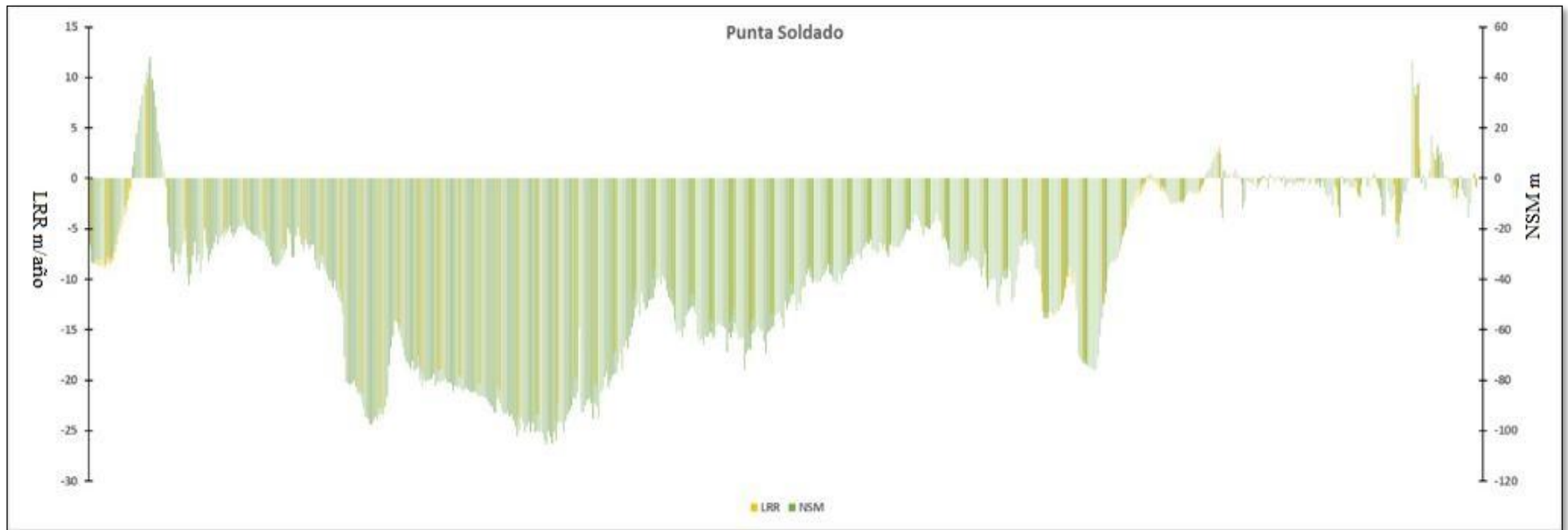
-8.68

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Figura 28. *EPR calculado para cada transecto de análisis de las líneas costeras en Punta Soldado.*

Fuente: Elaboración propia, 2023.

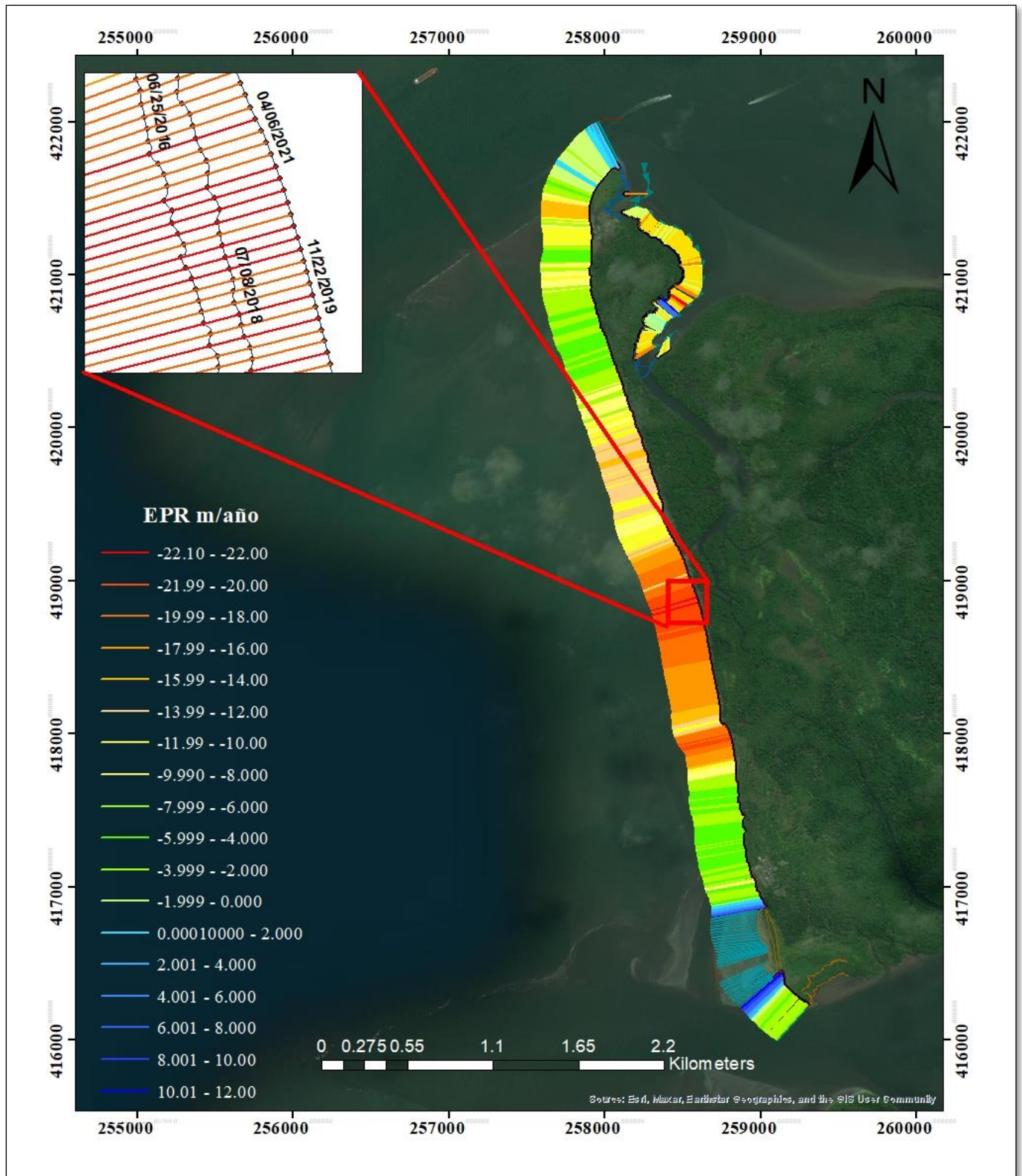
El estadístico NSM (Figura 29) para Punta Soldado, bahía de Buenaventura arrojó como resultado Tabla 20. Resultados de NSM en la LC de Punta Soldado. que el 89.83% de la zona presenta pérdida de litoral, el movimiento neto más significativo corresponde a -105.62 m. Esta tendencia a la erosión es confirmada por el estadístico LRR Tabla 21. Resultados de LRR en la LC de Punta Soldado., donde el 89.55% de la LC presentó retroceso en el tiempo estudiado 2016 a 2022, el promedio de tasa de cambio (LRR) es de -8.68 m/año, lo que nuevamente confirma que Punta Soldado se encuentra clasificado como zona con alta erosión.

Figura 29. *NSM y LRR calculado para cada transecto de análisis de las líneas de costa en Punta Soldado.*

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Punta Soldado se clasifica como zona con alta erosión debido a que sus valores de tasa de cambio se encuentran en el intervalo entre -5 m/año a -15 m/año, sin embargo, cabe mencionar que la LC también presenta zonas con procesos erosivos y acumulativos (Figura 30) marcados que han variado a través del tiempo, demostrando la dinámica susceptible al cambio en el este ambiente costero.

Figura 30. *Procesos de erosión y acreción en Punta Soldado, fuente: elaboración propia.*



Fuente: Elaboración propia, 2023.

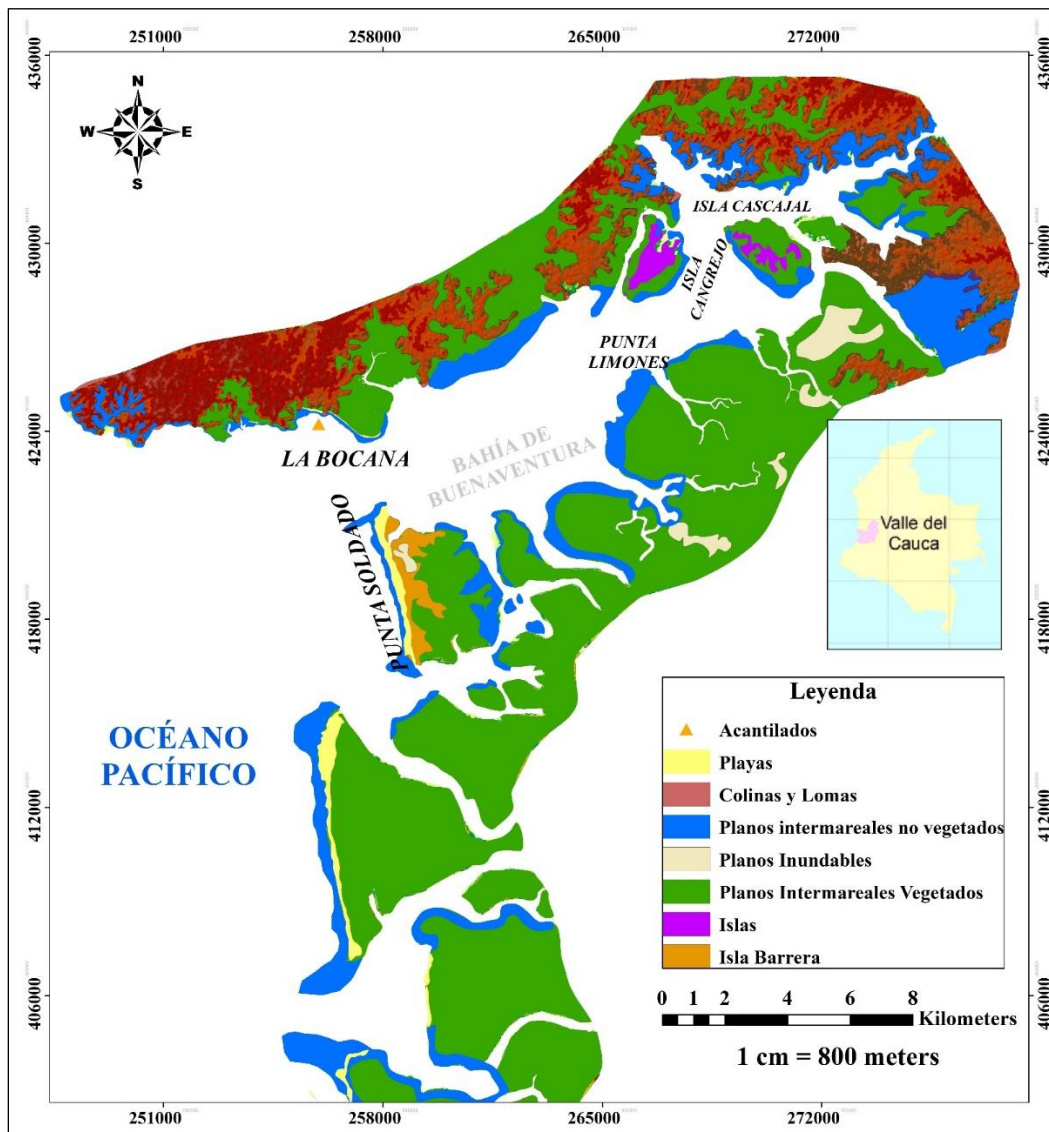
7.2. Geoformas

7.2.1. Geoformas del litoral.

Se logró identificar 7 unidades geomorfológicas y 2 rasgos geomorfológicos a lo largo del litoral de la bahía de Buenaventura (

Figura 31). Donde los planos intermareales vegetados ocupan una mayor extensión en la bahía, seguido de las colinas y lomas.

Figura 31. Unidades y rasgos geomorfológicos de la bahía de Buenaventura.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

7.2.1.1. Unidades Geomorfológicas

Planos intermareales vegetados: Son zonas inclinadas hacia el mar que son cubiertas y descubiertas por la marea, son áreas muy fangosas y generalmente crece vegetación de manglar. Los planos intermareales vegetados ocupan 17786.54 ha, lo que equivale al 58.01% de la cobertura de las unidades geomorfológicas presentes en la bahía de Buenaventura.

Planos intermareales no vegetados: Estos se observan en toda la bahía de Buenaventura junto a los planos intermareales vegetados. Son depósitos de sedimentos no consolidados que constituyen los fondos someros y que están ubicados principalmente a lo largo de la línea de costa. Ocupan 4673.97 ha, esto corresponde al 15.24 % de las geoformas del litoral de la bahía de Buenaventura.

Planos inundables: Se nombró así a las zonas que generalmente no se inundan ya que están a nivel o por encima del mar, son planas y estables debido a que no se anegan constantemente. Sufren encharcamientos periódicos por las altas precipitaciones y el nivel freático característico de la zona de estudio. Esta unidad geomorfológica ocupa 426.52 ha traducido como el 1.39%.

Islas: En la bahía de Buenaventura se identificaron dos islas conocidas como isla Cangrejo e isla Cascajal, y están ubicadas en la bahía interna. Las islas ocupan un área total de 647.59 ha que corresponde al 2.11% de las unidades geomorfológicas de la bahía de Buenaventura

Islas barreras: Esta unidad geomorfológica se encuentra a la entrada de la bahía interna junto a planos intermareales vegetados y no vegetados. Es arenosa y estable debido a que no se inunda por acción de la marea. Esta ocupa 409.02 ha y equivale a 1.33% de la cobertura del área estudiada.

Lomas y colinas: En la bahía de Buenaventura se observaron lomas con vegetación sobre ellas. Las colinas se pueden observar desde en la zona norte, desde la entrada de la bahía interna hacia la externa y alcanzan alturas de hasta 70 metros, presentan rasgos geomorfológicos como los acantilados en la zona de Pianguíta. Su cobertura ocupa 6343.52 ha y equivale al 20.69% de las unidades geomorfológicas de la bahía de Buenaventura.

Playas: Las playas en la bahía de Buenaventura son de arena media, oscuras y con abundantes minerales ferromagnesianos (Álvarez et al., 2016), las principales están ubicadas en

Piangüita y en la Bocana. Estas ocupan 375.19 ha y equivale al 1.22 % de las unidades geomorfológicas identificadas en la zona de estudio.

Tabla 22.

Extensión de las unidades geomorfológicas de la bahía de Buenaventura.

Unidades Geomorfológicas	ha	%
Planos intermareales vegetados	17786.54	58.01
Planos intermareales no vegetados	4673.97	15.24
Planos inundables	426.52	1.39
Islas	647.59	2.11
Islas Barrera	409.02	1.33
Colinas y lomas	6343.52	20.69
Playas	375.19	1.22
Total	30662.36	100

Fuente: Elaboración propia, 2023.

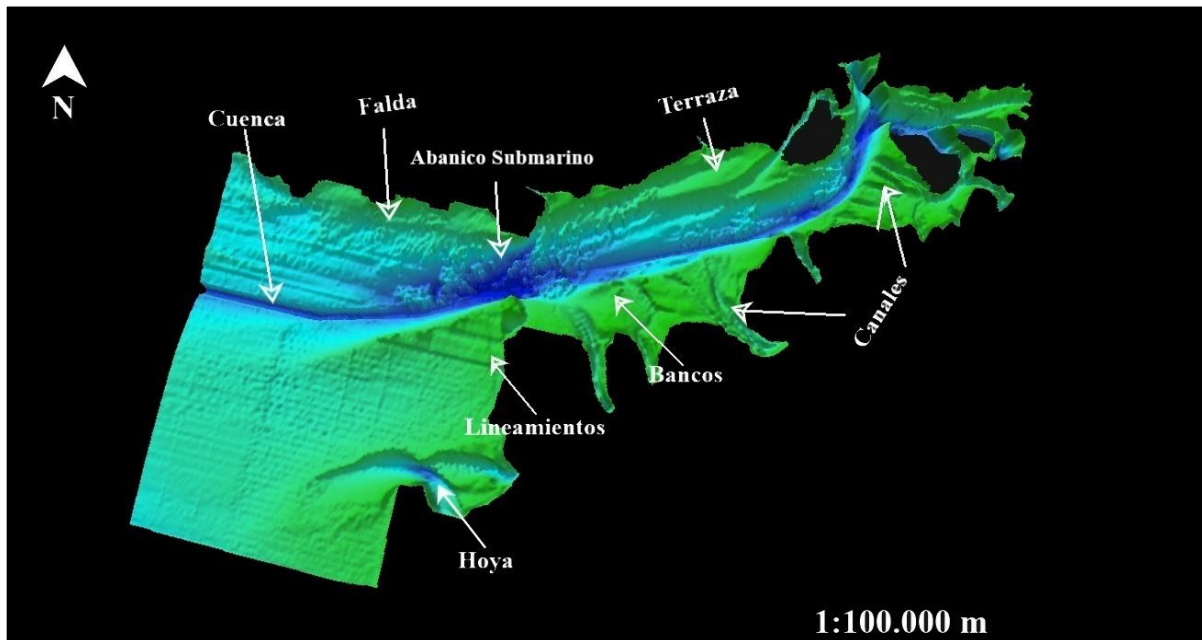
7.2.1.2. Rasgos geomorfológicos.

Los rasgos geomorfológicos encontrados y cartografiados en la Bahía de Buenaventura son acantilados y playas con bloques o escombros, se encuentran en la zona norte hacia el sector de la Bocana en Piangüita y se pueden relacionar con la erosión ya que los escombros son producto del desequilibrio y meteorización en los acantilados en dicha zona.

7.2.2. Geoformas sumergidas.

A partir del levantamiento batimétrico multihaz realizado en la Bahía de Buenaventura, y de la imagen obtenida a partir del mismo, se pudo identificar las geoformas del fondo (OHI, 2017) tales como: falda, abanico submarino, terraza, canales, bancos, lineamientos, hoyo y cuenca (canal) (**Figura 32.** Geoformas de Fondo presentes en la Zona de estudio.).

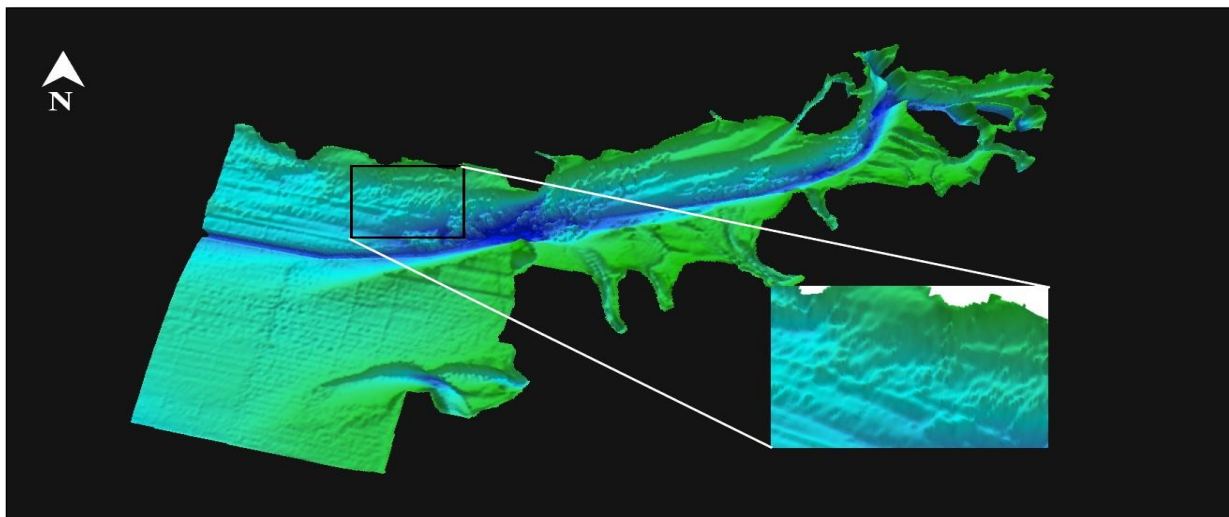
Figura 32. Geoformas de Fondo presentes en la Zona de estudio.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Falda: Talud de pendiente suave y superficie sin rugosidades Figura 33. Falda. (OHI, 2017), en el área de estudio se encuentra ubicada entre las coordenadas $77^{\circ}12'29.553''W$, $3^{\circ}49'22.133''N$ y $77^{\circ}15'3.639''W$, $3^{\circ}49'16.738''N$.

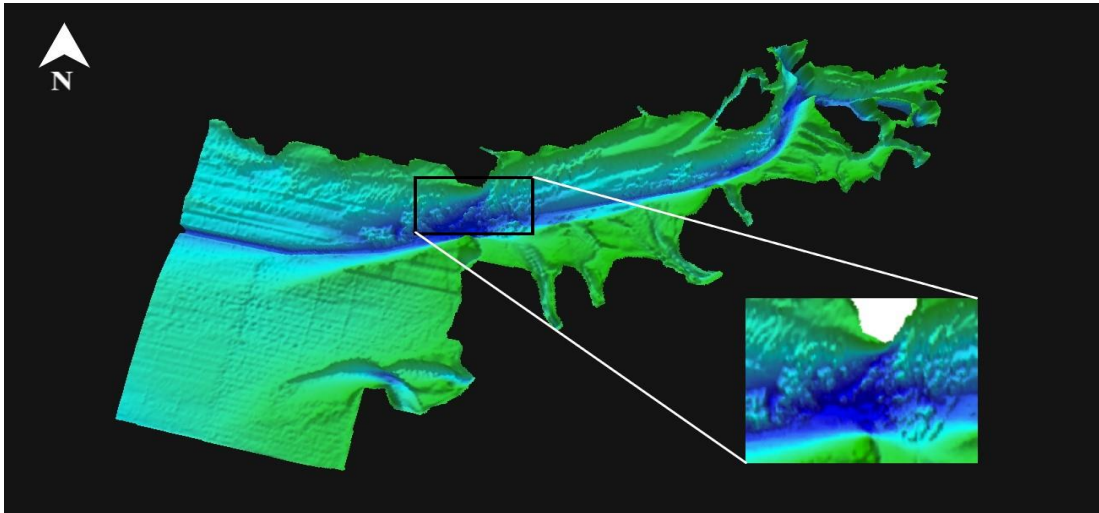
Figura 33. Falda.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Abanico submarino: depósito sedimentario con pendiente baja en forma semi triangular
Figura 34. Abanico Submarino.(OHI, 2017). Está ubicado en el centro de la zona de estudio a la entrada a la bahía interna de Buenaventura. Este refleja la incidencia del flujo submarino.

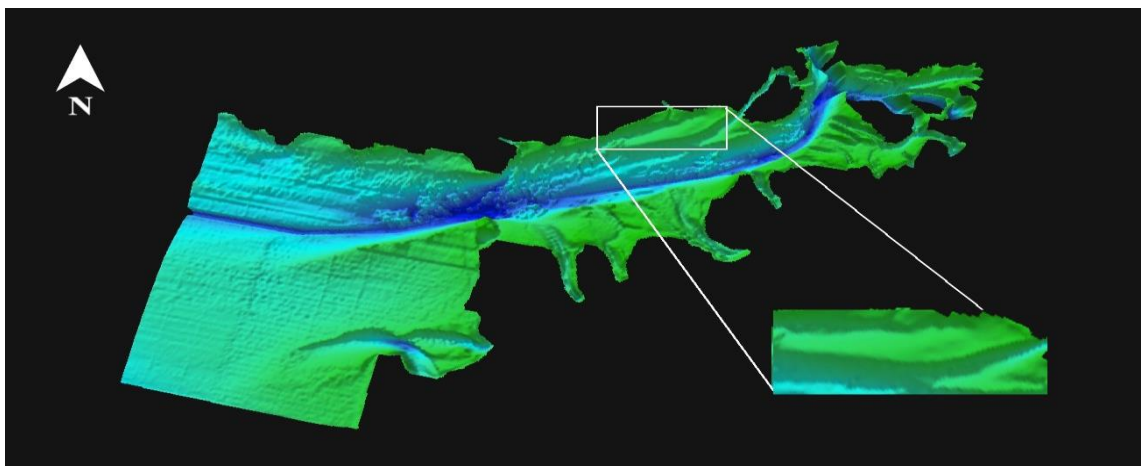
Figura 34. Abanico Submarino.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Terraza: Un área que es plana o ligeramente inclinada, a menudo larga y angosta, con un lado inclinado hacia abajo y el otro inclinado hacia arriba
Figura 35. Terraza. (OHI, 2017).

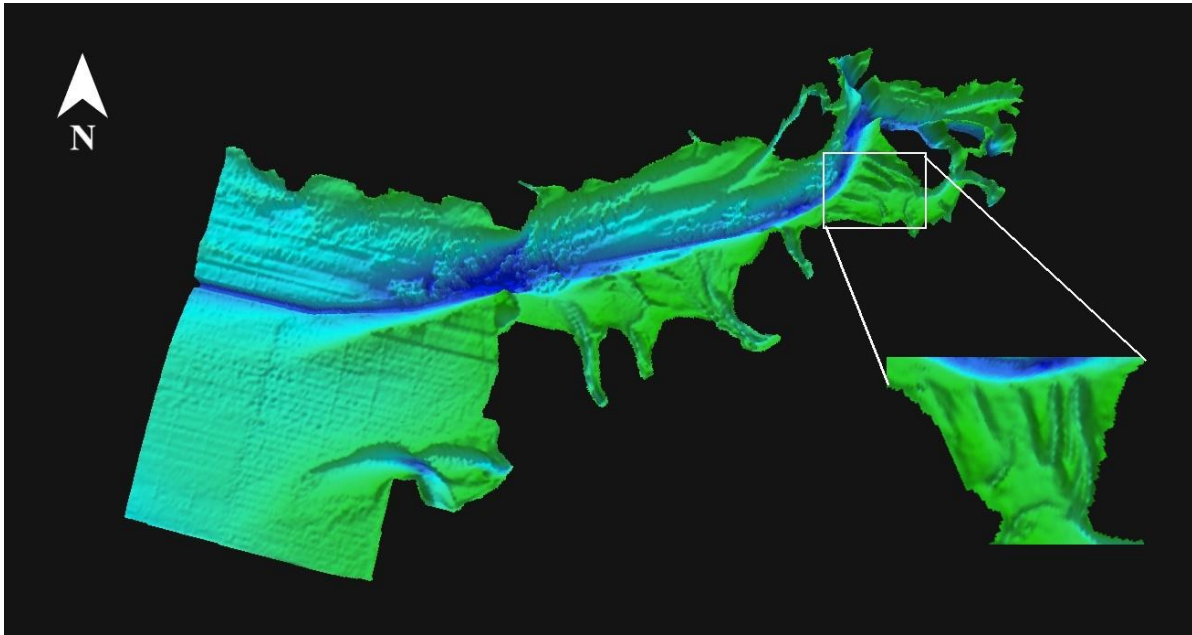
Figura 35. Terraza.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

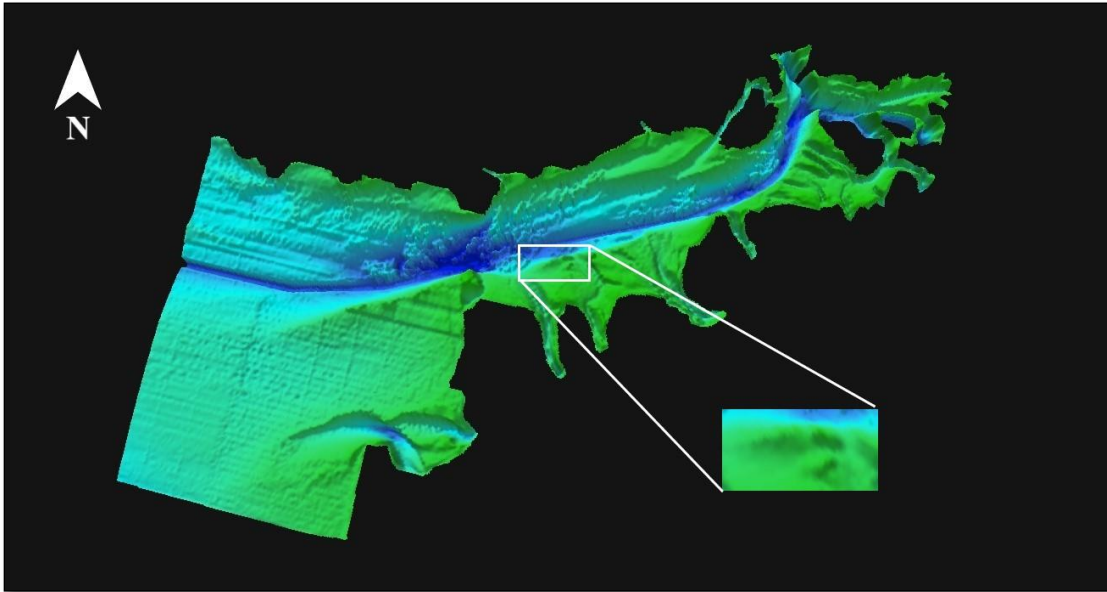
Canales: depresión alargada de profundidad variable, con forma de meandro que usualmente se halla en fondos marinos de pendiente suave Figura 36. Canales. (OHI, 2017). Están ubicados la bahía interna entre las coordenadas $77^{\circ}4'40.445''\text{W}$, $3^{\circ}52'56.649''\text{N}$ y $77^{\circ}5'18.649''\text{W}$, $3^{\circ}51'34.869''\text{N}$.

Figura 36. Canales.



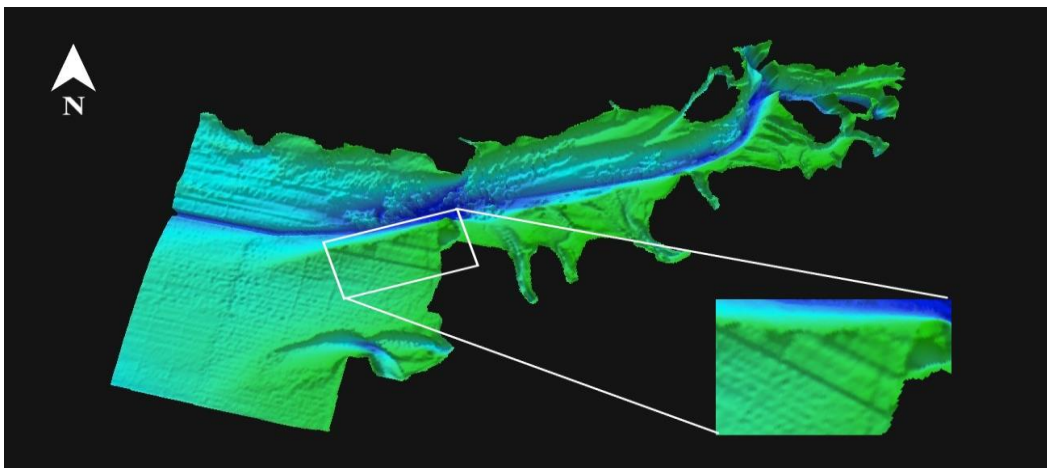
Fuente: Elaboración propia, 2023.

Banco: Elevación del lecho marino cuya profundidad suele ser menor a 200 m, pero suficiente para una navegación segura **Figura 37**. Banco. (OHI, 2017), generalmente se encuentra en la plataforma continental. En la zona de estudio se encuentra en las coordenadas $77^{\circ}9'9.858''\text{W}$, $3^{\circ}49'19.287''\text{N}$.

Figura 37. Banco.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Lineamientos: Son factores condicionantes de los procesos de inestabilidad de ladera y demarcan el cambio de pendiente entre las elevaciones y las cuencas o valles **Figura 38**. Lineamientos.. En el área de estudio se encuentran ubicados en las coordenadas entre $77^{\circ}10'50.281''\text{W}$, $3^{\circ}48'41.596''\text{N}$ y $77^{\circ}12'55.45''\text{W}$, $3^{\circ}47'26.402''\text{N}$.

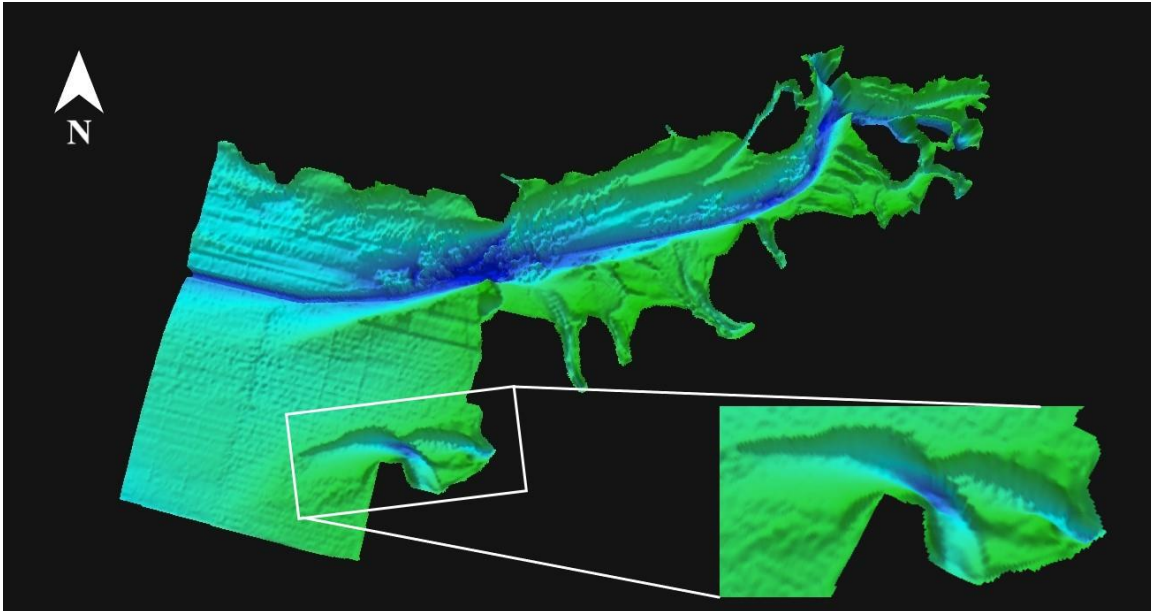
Figura 38. Lineamientos.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Hoya: Una depresión de extensión limitada con paredes empinadas rodeadas por un lecho marino relativamente plano **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (OHI, 2017). En

el área de estudio se encuentran ubicados en las coordenadas entre $77^{\circ}10'59.909''\text{W}$, $3^{\circ}45'7.159''\text{N}$ y $77^{\circ}12'49.425''\text{W}$, $3^{\circ}44'56.672''\text{N}$.

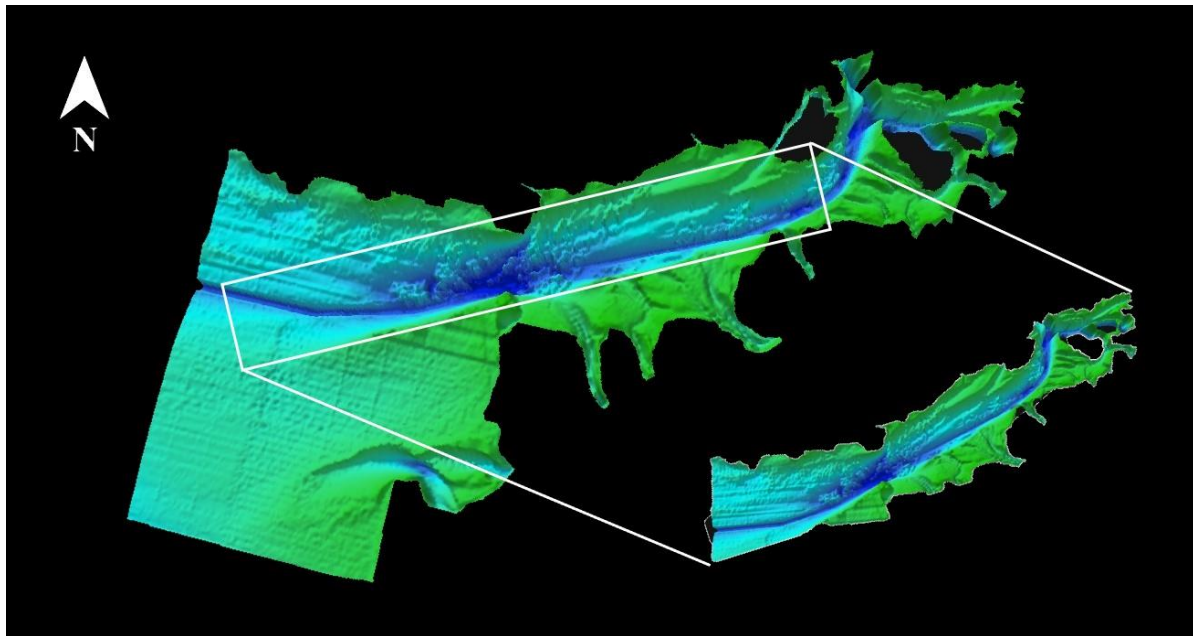
Figura 39. Hoya.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Cuenca: Una depresión de extensión limitada que por lo general se profundiza pendiente abajo con paredes empinadas rodeadas por un lecho marino relativamente plano **Figura 40**. Cuenca.(OHI, 2017). En el área de estudio se encuentra ubicada en el fondo atravesando toda la bahía.

Figura 40. Cuenca.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

8. Discusión

La mayor parte del litoral de la Bahía de Buenaventura se clasifica como área estable debido a que sus tasas de cambio están entre -2 m/año y 2 m/año (Tabla 3. Clasificación de los procesos de erosión y acreción de la línea costera, con base en estadística EPR.), significa que los procesos de pérdida y ganancia de LC no superan los 2 m/año. La bahía tiene una morfología resguardada, alargada y angosta hacia continente, hacia la parte externa de la bahía está constituida por planos intermareales vegetados con ecosistemas de manglar, adicionalmente la presencia de la isla barrera “Isla Soldado” protege a la bahía de la incidencia del oleaje, disminuyendo la pérdida por erosión al interior de esta.

Existen 2 sectores de línea de costa con niveles altos de erosión: Punta Soldado con retrocesos de hasta 22.1 m/año y Pianguía grande con retrocesos de hasta 7.2 m/año; ambos sectores están expuestos a la incidencia del oleaje y a corrientes longitudinales que impiden el depósito de sedimentos, las comunidades asentadas en estos dos sitios se ven afectadas directamente por esta dinámica erosiva.

Los resultados anteriores para Punta Soldado y Pianguía grande coinciden con lo obtenido por Posada et al. (2009), quien ya había descrito los procesos erosivos que han llevado a la reubicación de las comunidades residentes en al menos 3 ocasiones y han afectado extensas áreas del ecosistema de manglar y de playa.

Morfológicamente se identificaron geoformas subaéreas de costas altas y bajas. Las costas bajas están conformadas por planos de inundación, planos intermareales vegetados y no vegetados, islas barreras y playas. La mayor parte de línea de costa corresponde a planos intermareales vegetados (58.01 %). La costa alta presenta lomas y colinas, islas rocosas y acantilados, estos últimos no son cartografiables debido a su pequeña extensión.

Las geoformas submareales identificadas y asociadas a procesos denudativos fueron: lineamientos, canales, cuenca y faldas; las asociadas a procesos de depósito: hoyo, bancos, abanico submarino y terraza (Figura 32. Geoformas de Fondo presentes en la Zona de estudio.).

Las playas de Bazán, Punta Soldado y Pianguita presentan un perfil disipativo (morfología subaérea) con zonas de rompiente amplia y pendientes bajas. La tasa de cambio de EPR arroja acreción alta entre 5 m/año y 15 m/año para Bazán y Pianguita. Extendiendo el perfil de playa disipativo de Pianguita hacia mar adentro (morfología submareal) se encuentra el cambio de

pendiente que continúa con la falda y en esta vertiente se encuentra el canal que termina en el abanico submarino, geoforma submareal correspondiente a un depósito de turbidez que baja desde la falda o vertiente asociada y se deposita en el fondo donde hay cambio de pendiente.

Por otro lado, la geoforma submareal encontrada en Punta Soldado fue Lineamiento, asociado a inestabilidad del terreno y disposición a procesos erosivos que afectan la zona.

9. Conclusiones

Con la recopilación de los datos de esta investigación, se logró describir el comportamiento de la línea de costa de la bahía de Buenaventura desde el 2016 hasta el 2022, mediante el DSAS, arrojando tendencias que la clasifican como estable, sin embargo, cabe mencionar que también se encontraron zonas vulnerables por erosión como Punta Soldado, y zonas donde se encuentra una gran dinámica costera, generando procesos acumulativos a lo largo de la LC.

Los resultados que en este trabajo se presentan, al describir procesos de cambio de la línea costera, en tasas y distancias del movimiento, representan una base científica cuantificable de los procesos erosivos y de redistribución de sedimentos que ocurren en el área de estudio del Pacífico colombiano. Resultados, que se consideran a su vez una base para proyectar potenciales cambios y establecer estrategias pertinentes de adaptación y mitigación de los impactos.

Geomorfológicamente se caracteriza por tener amplios planos intermareales vegetados, planos intermareales no vegetados, planos inundables, playas, islas, islas barrera, colinas y lomas. Los planos intermareales vegetados son las geoformas más dominantes y extensas de la zona del área de la Bahía de Buenaventura.

10. Recomendaciones

La principal limitación de este proyecto corresponde a la falta de datos con cobertura de toda el área de estudio, lo que implica incertidumbres relativamente altas y falta de evidencia fotográfica y geológica de la zona. Por esta razón se recomienda en futuros estudios la toma de

datos en campo por medio de vehículos aéreos no tripulados con puntos de control en tierra y levantamientos batimétricos donde sé que cubran toda la zona de interés.

Para futuras investigaciones se sugiere abordar de manera más detallada los procesos acumulativos que se puedan presentar a lo largo de la bahía de Buenaventura. Así como un monitoreo constante de toda la zona para poder establecer series de tiempo.

Referencias

- Álvarez, M., Bermúdez-Rivas, C., & Niño, D. (2016). Caracterización de la geomorfología costera y sus coberturas vegetales asociadas, a través de sensores remotos en la bahía de Buenaventura, Valle del Cauca. *Bol. Cient. CIOH*, 34, 49–63.
- Anaya, D. (2021). *Geomorfología, ascenso del nivel del mar y evolución de la línea de costa: Análisis en el Golfo de Morrosquillo*. Universidad del Norte.
- Bermudez, C., Alvaréz, M., & Niño, D. (2014). Caracterización de la geomorfología costera y sus coberturas vegetales asociadas, a través de sensores remotos, en la costa de Tumaco, Nariño. *Boletín Científico CIOH*, 27–46.
- Boak, E. H., & Turner, I. L. (2005). Shoreline definition and detection: a review. *Coastal Research*, 21(4), 688–703.
- Cardona, D. (2018). *Actualización de la migración de la línea de costa de acantilados blandos tropicales entre Minuto de Dios y Puerto Rey, sur de la costa Caribe colombiana*. Universidad EAFIT.
- Castañeda, D. J. (2017). *Análisis de línea de costa en el municipio de Buenaventura (Valle del Cauca, Colombia)*. Universidad distrital Francisco José de Caldas.
- Cifuentes, M., Rosero, L., & Josephraj, J. (2017). Detección de cambios de la línea costera al norte del distrito de Buenaventura mediante el uso de sensores remotos. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 46, 137–152.
- Coca, O., & Ricaurte, C. (2019). Análisis de la evolución litoral y respuesta de las comunidades afrodescendientes asentadas en la zona costera: caso de estudio La Barra, Buenaventura, Pacífico Colombiano. *Entorno Geográfico*, 17, 7–26.
- Coca, O., & Ricaurte-Villota, C. (2022). Regional Patterns of Coastal Erosion and Sedimentation Derived from Spatial Autocorrelation Analysis: Pacific and Colombian Caribbean. *Coasts*, 2, 125–151.
- Correa, I., Ríos, A., González, D., Toro, M., Ojeda, G., & Restrepo, I. (2007). Erosión litoral entre Arboletes y Punta San Bernardo, costa Caribe colombiana. *Boletín de Geología*, 29, 115–129.
- Correa, I., & Vernet, G. (2004). Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes - Turbo) costa Caribe colombiana. *Boletín Investigaciones Marino-Costeras*, 33, 7–28.

- Del Río, L., Garcia, J., & Benavente, J. (2013). Shoreline change patterns in sandy coasts. A case study in SW Spain. *Geomorphology*, 196, 252–266.
- DIMAR CCCP. (2023). *Pronóstico de mareas Centro de investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico, CCCP*. <https://Cccp.Dimar.Mil.Co/Mareas>.
- Duncan, F., Michael, F., Birtt, A., & Ilya, B. (2008). Coastal Impacts Due to Sea-Level Rise. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 601–647.
- Ferrucho-Maloof, I. E., Otero-Díaz, L. J., & Cueto-Fonseca, J. E. (2022). Cambios recientes de la línea de costa entre Bocas de Ceniza y Puerto Velero (Atlántico, Colombia). *Boletín de Geología*, 44(3), 159–178.
- Giraldo, L., & Lonin, S. (1997). Cálculo del oleaje y el transporte de sedimentos en la costa caribe colombiana. *Boletín Científico CIOH*, 18, 39–49.
- Gob. ANT, udea, UNAL, & UNINORTE. (2021). *Erosión costera en el litoral Antioqueño. Compilación de resultados* (G. S. A. S. Litografía, Ed.).
- Gómez, J., Carvajal, J., & Otero, J. (2012). *Propuesta de estandarización de levantamientos geomorfológicos en la zona costera del Caribe Colombiano* (Invemar, Vol. 20). Serie de publicaciones especiales.
- González, J. L., & Correa, I. D. (2001). Late Holocene Evidence of Coseismic Subsidence on the San Juan Delta, Pacific Coast of Colombia. *Journal of Coastal Research*, 17(0749–0208), 459–467.
- González JL, & Correa ID. (2001). Late Holocene evidence of coseismic subsidence on the San Juan Delta, Pacific Coast of Colombia. *J Coastal Res*, 17, 459–467.
- Guzmán, Ruíz, & Cadena. (2014). Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual, a través análisis de componentes principales (ACP). *IDEAM*.
- Himmelstoss, E., Henderson, R., Kratzmann, M., & Farris, A. (2021). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 5.1 User Guide*.
- Hugguett, R. (2011). *Fundamentals of Geomorphology* (J. Gerrard, Ed.; Third edition, Vol. 3). ROUTLEDGE FUNDAMENTALS OF PHYSICAL GEOGRAPHY SERIES.
- IDEAM. (2019). Pronóstico de Pleamares y Bajamares Costa Caribe Colombiana. *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*.
- INEGI. (2003). Manual de procedimientos de ortofotografía. *Instituto nacional de estadística, geografía e informática*.

- INVEMAR-GEO. (2015). *Evolución reciente de la zona costera del departamento del Valle del Cauca*.
- Kelletat, D. (1996). *Atlas of Coastal Geomorphology and zonality* (CERF).
- Kratzer, S., Harvey, E. T., & Philipson, P. (2014). The use of ocean color remote sensing in integrated coastal zone management—A case study from Himmerfjärden, Sweden. *Marine Policy*, 43, 29–39.
- Kroon, A., Magnus, L., Möller, I., Yokoki, H., Rozynski, G., Cox, J., & Larroude, P. (2008). Statistical analysis of coastal morphological data sets over seasonal to decadal time scales. *Coastal Engineering*, 55, 581–600.
- Kumar, A., Narayana, A. C., & Jayappa, K. S. (2010). Shoreline changes and morphology of spits along southern Karnataka, west coast of India: A remote sensing and statistics-based approach. *Geomorphology*, 120, 133–152.
- Lam, N., Arenas, H., Brito, P., & Lui, K. (2014). Assessment of Vulnerability and adaptive capacity to coastal hazards in the Caribbean Region. *Journal of Coastal Research*, 70.
- Lantada, N., & Nuñez, M. (2002). *Sistemas de información geográfica* (Edicions UPC, Ed.).
- Locarnini, R. A., Mishonov, A. V., Baranova, O. K., Boyer, T. P., Zweng, M. M., Garcia, H. E., Reagan, J. R., Seidov, D., Weathers, K. W., Paver, C. R., & Smolyar, I. V. (2019). *World Ocean Atlas 2018* (NOAA Atlas NESDIS 81, Vol. 1). Temperature. A. Mishonov, Technical Editor.
- Masselink, G., Hughes, M., & Knight, J. (2011). *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology* (2nd Edition). Earth Sciences, Geography.
- Meza, V., & Pastrana, M. (2020). *Actualización de la posición de la línea de costa e identificación de focos erosivos recientes en el tramo Punta Rey – La Rada, departamento de Córdoba, Colombia*. Universidad EAFIT.
- Organización Hidrográfica Internacional. (2017). NORMALIZACIÓN DE LAS FORMAS DEL RELIEVE SUBMARINO. *Organización Hidrográfica Internacional*, 6.
- Otero, L. (2004). DETERMINACIÓN DEL RÉGIMEN MEDIO Y EXTREMAL DEL NIVEL DEL MAR PARA LA BAHÍA DE BUENAVENTURA. *Boletín Científico CCCP*, 11, 30–41.

- Otero, L. (2005). Aplicación de un Modelo Hidrodinámico Bidimensional para Describir las Corrientes y la Propagación de la Onda de Marea de la Bahía de Buenaventura. *Boletín Científico CCCP*, 12, 9–21.
- Oviedo-Barrero, F., Niño-Pinzón, D. C., Aguirre-Trapiero, M. P., Pantoja-López, D. N., & Sánchez-Manco, L. (2020). Particularidades geográficas de la Cuenca Pacífica Colombiana. In M. Maza (Ed.), *En Compilación Oceanográfica de la Cuenca Pacífica Colombiana II* (Vol. 2, pp. 34–64). Dirección General Marítima. Bogotá, D. C. Editorial Dimar.
- Pajak, M., & Leatherman, S. (2002). The High Water Line as Shoreline Indicator. *Coastal Research*, 18(2), 329–337.
- Paniagua, J. (2013). *Migración histórica actualizada y predicción de la posición de la línea de costa en sectores acantilados críticos del litoral Antioqueño considerando escenarios de ascenso del nivel del mar* [Magíster en ciencias de la tierra]. Universidad EAFIT.
- Peña, J. (2006). Sistemas de Información Geográfica aplicados a la gestión del territorio. *Revista de Geografía Norte Grande*, 36, 97–101.
- Peña, J. (2007). *Guía técnica de estudios litorales* (Senior). Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Posada, B., Henao, W., & Guzman, G. (2009). *Diagnóstico de la erosión y sedimentación en la zona costera del Pacífico colombiano* (17th ed.). INVEMAR.
- Prüssmann, J. (2012). *Nuevos elementos para el manejo integrado de la región de Urabá, costa Caribe colombiana*. Universidad EAFIT.
- Restrepo, J. (2006). *Los sedimentos del río Magdalena: reflejo de la crisis ambiental* (Universidad EAFIT). Fondo editorial de la universidad EAFIT.
- Robin Davidson-Arnott. (2010). *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology* (C. C. 8RU, U. Cambridge University Press The Edinburgh Building, Ed.).
- Rodriguez, O., & Arredondo, H. (2005). *Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto modis de la nasa, aplicado en estudios de ingeniería civil* [magister]. Pontificia universidad javeriana.
- Silva, R., Martinez, L., Hesp, P., Catalan, P., Osorio, A., Martel, R., Fossati, M., Da Silva, G., Tapia, I., Pereira, P., Cienguegos, R., Klein, A., & Govaere, G. (2014). Present and Future Challenges of Coastal Erosion in Latin America. *Journal of Coastal Research*, 71, 1–16.

- Thieler, R., Himmelstoss, E., Zichichi, J., & Ergul, A. (2009). *The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0—an arcgis Extension for Calculating Shoreline Change*.
- Tomlinson, R. (2003). *Thinking About GIS: Geographic Information System Planning for Managers* (ESRU press). WADSWORTH99.
- Velasco, E. R., & López, G. I. (2016). Marco conceptual para investigaciones Tsunamigénicas: Caso litoral Pacífico colombiano. *Boletín de Geología*, 38(4), 76–106.
- Vernette, G., Correa, I., & Bernal, G. (2012). *Introducción a los cambios del nivel de mar y sus consecuencias sobre la zona costera* (Vol. 1). Centro editorial de la facultad de minas.
- Vivas, J., Vargas, M., Guillen, K., Villarraga, M., & Sánchez, D. (2014). Vulnerabilidad de la población costera frente a la contaminación orgánica y microbiológica en la bahía de Buenaventura. *Serie de Publicaciones Generales Del Invemar*, 76, 24.
- Zambrano, J. A., & Andrade, C. A. (2011). Cambios en la línea de costa del Cayo Serranilla entre 1944 y 2009, Archipiélago de San Andrés, Colombia. *Boletín Científico CIOH*, 29(0120–0542), 87–103.